

Christophe Gerber
Martin Portmann
Christian Kündig

Fours à chaux, four à fer et charbonnières dans le Jura bernois

*Vestiges archéologiques médiévaux et modernes découverts
entre Moutier et Roches sur le tracé de l'autoroute A16, 1995-1997*



Fours à chaux, four à fer et charbonnières dans le Jura bernois

Christophe Gerber

Fours à chaux, four à fer et charbonnières dans le Jura bernois

Vestiges archéologiques médiévaux et modernes découverts
entre Moutier et Roches sur le tracé de l'autoroute A16, 1995-1997

En collaboration avec Martin Portmann et Christian Kündig
Avec une contribution de Vincent Serneels

Publications périodiques de la Direction de l'instruction publique du canton de Berne
réalisées par le Service archéologique du canton de Berne

Schriftenreihe der Erziehungsdirektion des Kantons Bern
herausgegeben vom Archäologischen Dienst des Kantons Bern

Rédaction / Redaktion:
Christophe Gerber, Daniel Gutscher

Page de titre / Titelbild:
Max Stöckli

Disponible chez / Bezugsort:
Verlag Paul Haupt Bern/Stuttgart/Wien
Falkenplatz 14, CH-3001 Bern
Telefon 031 301 23 45 – Telefax 031 301 46 69
Internet: <http://www.haupt.ch> E-Mail: buchhandlung@haupt.ch

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme
Gerber, Christophe; Portmann, Martin et Kündig, Christian:
Fours à chaux, four à fer et charbonnières dans le Jura bernois :
Vestiges archéologiques médiévaux et modernes découverts entre Moutier et Roches
sur le tracé de l'autoroute A16, 1995–1997 / Christophe Gerber.
Avec la collab. de Vincent Serneels et Ludwig Eschenlohr. –
Bern ; Stuttgart ; Wien : Haupt, 2002
ISBN 3-258-06459-8

Imprimerie: Paul Haupt AG, Bern, 2002

Table des matières

Préface	7	<i>D. Laboratoire</i>	36
Introduction	9	<i>E. Manteau</i>	36
I. Présentation de la région	9	3. Structures annexes	36
II. Construction de la route nationale A16 et impact archéologique	10	4. Catalogue des objets et datations	37
1. Méthodes de prospection	10	5. Les fours à chaux de Moutier en comparaison de quelques fours du pied du Jura (Court, Ligerz et Attiswil)	40
<i>A. La prospection pédestre</i>	10	<i>A. Court - Pâturage aux Bœufs 1998</i>	40
<i>B. Les sondages mécaniques préventifs</i>	11	<i>B. Ligerz - Tiefgarage 1998</i>	40
<i>C. Documentation de fouille</i>	11	<i>C. Attiswil - Wybrunne 1996</i>	43
2. Aperçu des résultats	11	6. Reconstitution	43
III. Fabrication du charbon de bois	12	<i>A. Voûte</i>	43
1. Approche technique	12	<i>B. Laboratoire</i>	46
<i>A. La carbonisation en fosse</i>	12	<i>C. Manteau</i>	46
<i>B. La carbonisation en meule circulaire</i>	12	7. Approche quantitative de la production	49
<i>C. Une variante: la meule suédoise</i>	14	<i>A. Les roches</i>	49
2. Etat de la recherche	14	<i>B. La calcination</i>	49
IV. Fabrication du fer	16	<i>C. Le combustible</i>	50
1. Approche technique	16	<i>D. Travail et coûts</i>	51
<i>A. La méthode directe de réduction du minerai de fer</i>	16	8. Conclusion	52
<i>B. La méthode indirecte de réduction du minerai de fer</i>	19	Partie 2: Roches - Combe Chopin	55
2. Etat de la recherche	19	I. Présentation du site et déroulement des travaux	55
V. Fabrication de la chaux	20	II. Les fours à chaux	56
1. Approche technique	21	1. Description des vestiges	56
<i>A. Architecture</i>	21	<i>A. Four 1</i>	56
<i>B. Les fours périodiques</i>	22	<i>B. Four 2</i>	58
<i>C. Fours industriels à production continue</i>	24	<i>C. Four 3</i>	59
<i>D. Les chaux</i>	25	2. Conclusion	60
<i>E. Conditionnement et transport</i>	25	3. Datation	60
<i>F. Usages</i>	25	III. Les Charbonnières	61
2. Etat de la recherche	25	1. Description des vestiges	62
Partie 1: Moutier - Combe Tenon 1997	27	<i>A. Charbonnière 1</i>	63
I. Présentation du site et déroulement des travaux	27	<i>B. Charbonnière 2</i>	63
II. Les fours à chaux	29	<i>C. Charbonnière 3</i>	63
1. Fours de surface 1-3 et 5	29	<i>D. Charbonnière 4</i>	64
<i>A. Banquette</i>	29	2. Charbon de bois et sidérurgie	64
<i>B. Chambre de chauffe</i>	29	3. Exploitation des forêts	65
<i>C. Voûte</i>	29	IV. La route des gorges de Moutier	66
<i>D. Gueule</i>	30	1. Description des vestiges	66
<i>E. Laboratoire</i>	30	<i>A. La route: premier état</i>	67
<i>F. Manteau</i>	31	<i>B. La route: avant-dernier et ultime états</i>	68
<i>G. Aire de chauffe et structures connexes</i>	31	2. Datations	68
2. Fours semi-enterrés 6 et 8	32	3. Cadre historique	69
<i>A. Chambre de chauffe</i>	32	V. Le bas fourneau par V. Serneels et Ch. Gerber (Relecture critique L. Eschenlohr)	72
<i>B. Voûte</i>	36	1. Présentation du site et déroulement des travaux	72
<i>C. Gueule</i>	36	2. Description du bas fourneau	74
		3. Reconstitution de l'architecture et comparaisons archéologiques	77

4. Four 93	81	<i>B. La consommation de charbon de bois du bas fourneau</i>	106
5. Matériel archéologique et datation	83	<i>C. Approvisionnement en charbon de bois</i>	106
<i>A. Céramique</i>	83	9. Apport de l'étude du bas fourneau	107
<i>B. Métal</i>	84	10. Synthèse générale sur l'industrie sidérurgique dans le Jura central	107
<i>C. Catalogue des objets</i>	85	VI. Bilan final	108
<i>D. Datations archéologiques</i>	90	1. Activités artisanales et impacts sur l'environnement	108
<i>E. Datations physico-chimiques</i>	90	<i>A. L'industrie du fer</i>	108
6. Scories et autres déchets métallurgiques associés ...	91	<i>B. La verrerie</i>	109
<i>A. Les différentes catégories de déchets métallurgiques</i>	92	<i>C. La fabrication de la chaux</i>	110
<i>B. Les fragments de paroi</i>	93	2. Modes d'exploitation de la forêt et impacts	110
<i>C. Les scories noires vitreuses</i>	96	3. Voie de communication et transports	111
<i>D. Les scories grises denses</i>	97	4. Impacts socio-économiques	113
<i>E. Les verres noirs</i>	98	Annexes	115
<i>F. Les scories ferreuses</i>	98	Analyses chimiques des déchets métallurgiques de Roches - Combe Chopin et du Sidérolithique de la région	115
<i>G. Les scories de Roches: comparaison avec les autres sites étudiés</i>	99	Bibliographie	122
7. Le minerai et sa préparation	99	Résumé	126
<i>A. Les minerais de fer dans la chaîne du Jura</i>	99	Zusammenfassung	128
<i>B. Les minerais de fer dans les environs immédiats du site</i>	100	Summary	130
<i>C. Les concrétions ferrugineuses provenant des couches archéologiques</i>	101	Crédit iconographique	132
<i>D. La question de la préparation du minerai</i>	101		
<i>E. La nature et la qualité des minerais sidérolithiques du Jura</i>	102		
<i>F. L'origine du minerai utilisé dans le bas fourneau de Roches</i>	102		
<i>H. Approche quantitative de la production</i>	104		
8. Le charbon	105		
<i>A. Les essences charbonnées</i>	105		

Préface

Il est de petits sites archéologiques qui paraissent d'un intérêt réduit au moment de leur découverte, mais qui avec le recul et l'accumulation d'informations et de données nouvelles, prennent soudain une place singulière. Il en va ainsi de quelques interventions archéologiques réalisées au fil du tracé autoroutier de l'A16, entre Roches et Court. Après la sortie de presse de la Route romaine transjurane de Pierre Pertuis en 1997, nous avons jugé opportun de publier le résultat des recherches évoquées ci-dessus, sous la forme d'un volume unique.

Cette publication aborde l'exploitation historique des matières premières locales, calcaire, bois et minerai de fer par le biais des vestiges de techniques de production restés largement méconnus. Leur étude et leur compréhension est d'autant plus importante que les industries jurassiennes actuelles, cimenteries, aciéries ou verreries, sont encore aujourd'hui les témoins de l'utilisation de ces matériaux d'origine locale. De même, cette économie de production, largement basée sur la présence de forêts abondantes, a transformé le paysage jurassien au cours du temps jusqu'à en laisser des traces encore visibles de nos jours.

Si les techniques de fabrication de la chaux sont connues depuis l'Antiquité, elles ne furent mises en pratique dans l'arc jurassien que beaucoup plus tardivement. Si l'on excepte les constructions gallo-romaines disséminées sur le territoire jurassien, l'usage de la chaux se répandit surtout à partir du Moyen Âge dans les constructions maçonnées: premières chapelles et églises romanes en pierre, puis fondation des villes et bourgs, et enfin dès le XVI^e siècle pour les habitats ruraux. Les fours à chaux découverts au fil de la Transjurane sont un peu plus récents, puisque les premiers datent du XVII^e siècle. Parents pauvres de l'archéologie industrielle, ces vestiges n'en restent pas moins des témoignages intéressants d'une activité aujourd'hui supplantée par les grandes cimenteries, mais qui reste encore pratiquée de manière traditionnelle dans de nombreux pays du monde.

Les fouilles de Moutier ont révélé une exceptionnelle concentration de neuf fours à chaux aménagés dans un environnement particulièrement favorable, où calcaire et bois abondent. L'étude de leur mode de construction permet aujourd'hui de distinguer deux familles de fours intermittents jurassiens: les fours de surface et les fours semi-

enterrés. La chaux fabriquée était destinée à l'activité édilitrice, mais également à l'industrie, notamment la tannerie.

Autre richesse naturelle, le minerai de fer fut exploité et réduit dans la région de Roches durant le Bas Moyen Âge, comme l'attestent les fouilles récentes. L'installation mise au jour ne présente pas de tuyère et appartient au type de fourneau fonctionnant avec un tirage naturel, encore assez méconnu. A proximité, plusieurs charbonnières des XVIII^e-XIX^e siècles sont apparues et témoignent de la carbonisation de bois tirés des forêts environnantes. Un des rares tronçons de l'ancienne route des gorges, dont l'origine antique ou médiévale n'est pour l'heure toujours pas précisée, a également été fouillé. Enfin, trois fours à chaux modernes, comparables aux exemplaires de Moutier, forment les vestiges les plus récents apparus sur ce site. Les fouilles entreprises à Roches constituent un exemple synthétique de l'exploitation des richesses naturelles jurassiennes, que sont le minerai de fer, la pierre et le bois. D'ailleurs un projet de mise en valeur de ces témoignages archéologiques, destiné à un large public, est soutenu par les Routes nationales.

L'organisation des divers chantiers, le suivi scientifique ainsi que l'étude archéologique étaient assurés par Christophe Gerber, épaulé par Vincent Serneels (Institut de minéralogie et de pétrographie de l'Université de Fribourg) pour l'analyse du bas fourneau de Roches, sous la direction générale de Daniel Gutscher, responsable de la section Moyen Âge du Service archéologique du canton de Berne. La réalisation de l'iconographie a été prise en charge par Max Stöckli, secondé par Eliane Schranz et Christian Kündig. Armand Baeriswyl et Clare Keller ont traduit les résumés. Notre gratitude va à Jürg Rub qui a assuré la mise en page et à l'imprimerie Paul Haupt SA à Berne. Enfin, nous tenons à remercier pour leur engagement et leur patience les collaboratrices et collaborateurs associés d'une manière ou d'une autre aux recherches présentées dans ce volume, ainsi que les représentants des Routes nationales pour leur soutien constant.

Berne, janvier 2002

Cynthia Dunning
Archéologue cantonale

Introduction

I. Présentation de la région

Les deux sites qui font l'objet de la présente publication, se situent au coeur de l'arc jurassien, à mi-chemin entre le Plateau Suisse, la vallée du Doubs et la plaine du Rhin, aux confins septentrionaux du canton de Berne (fig. 1). Une succession de montagnes élevées généreusement boisées (altitude moyenne au-delà de 1'000 m) et de petites vallées transversales (altitude entre 500 et 700 m) recoupées par une série de cluses, caractérisent le paysage de cette partie de l'arc jurassien. Excepté la découverte de quelques objets isolés du Néolithique, et de l'Age du Bronze, l'occupation des lieux à l'époque préhistorique n'est pour l'heure pas attestée dans la région de Moutier. Une voie de communication emprunta peut-être la cluse de Moutier dès l'époque romaine, mais la mise en valeur du territoire et l'occupation du sol (création de hameaux et villages) paraissent ne remonter qu'au Haut Moyen Age¹. Les rares ressources naturelles dont bénéficie la région sont le bois, le minerai de fer, la roche calcaire et l'eau.

Moutier

Situé entre les deux vallées principales de Tavannes et de Delémont, Moutier (fig. 2) occupe le point le plus ouvert et le plus bas (530 m) à la jonction de deux vallons: le Petit-Val et le Grand-Val ou Cornet. Les travaux entrepris sur le tracé de la route nationale A16 au sud-ouest de la localité, dans une petite combe au pied nord de la montagne de Graiteray, ont révélé de nombreux vestiges de fours à chaux. Avant l'intervention archéologique, le site était couvert d'une forêt mixte dominée par l'épicéa et le hêtre.

Roches

Le second site étudié dans le cadre du présent ouvrage se trouve quelques kilomètres plus au nord, juste après le passage de la cluse de Moutier (fig. 2). Il se développe pour l'essentiel sur le coteau bordant la rive gauche de la Birse, à une altitude moyenne de 520 m. Le hameau de Hautes-Roches, construit à 730 m d'altitude, domine l'ensemble de ce petit val transversal aux pentes prononcées. Le site fouillé se trouve un peu plus au nord, dans la Combe Chopin, qui se développe vers l'est entre deux arêtes rocheuses de la chaîne du Mont-Raimeux, au boisement irrégulier. Un ruisseau au débit irrégulier parcourt la moitié méridionale de la combe.



Fig. 1: Localisation générale des deux sites archéologiques. Extrait de la carte du Jura physique. Echelle 1:750 000.



Fig. 2: Moutier et Roches: emplacement des deux sites fouillés. Données cartographiques PK100, © 1996.

¹ Müller 1997, 45–48.

II. Construction de la route nationale A16 et impact archéologique

Dans le cadre de la planification des travaux de l'A16, l'étroite collaboration mise en place dès 1992 entre l'Office des ponts et chaussées du canton de Berne² et le Service archéologique, a permis de coordonner les différents travaux de prospection, notamment les sondages préliminaires dans le secteur de Roches dès 1995.

Avant 1995, l'Inventaire cantonal des sites archéologiques ne comptait que 17 positions (fig. 3) dans la vallée de Tavannes, à Moutier et à Roches: quatre habitats médiévaux (certains hypothétiques), cinq bâtiments religieux médiévaux, quatre exploitations artisanales médiévales ou modernes, quatre sites routiers antiques ou médiévaux. Les trouvailles isolées, quoiqu'inventoriées, ne sont pas prises en considération dans cette liste. En 2001, le nombre de sites a plus que doublé, grâce surtout aux campagnes de prospection.

1. Méthodes de prospection

Dans le cadre de la construction de l'autoroute A16 Transjurane, ce sont des méthodes traditionnelles de prospection pédestres et mécaniques qui sont engagées. Au préalable, le périmètre d'installation du futur tracé est parcouru à pied, si possible à différentes saisons, avant d'être sondé. Cette première approche a en général été confiée au responsable scientifique local du projet. Puis, pour l'engagement de sondages systématiques, le Service arché-

logique cantonal a mis sur pied une équipe de deux à trois collaborateurs. Au vu des résultats obtenus depuis 1992 sur le tracé bernois de la Transjurane, il incombe à la Section médiévale du service de gérer les campagnes de reconnaissance et de sondages.

A. La prospection pédestre

La prospection pédestre constitue une approche intéressante du terrain; elle ne doit à notre avis pas être délaissée, car elle permet d'une part de se familiariser avec l'environnement (morphologie, couverture végétale, microréseau hydrique...) et d'autre part de détecter des anomalies au sein du modelé. Certains terrains ne se prêtent pas à la prospection pédestre: les zones d'éboulis actifs, les marais, tourbières, les zones bâties... Les champs ouverts et mêmes les pâturages sont les zones d'observation privilégiées, mais exigent une certaine discipline de parcours et un oeil aiguisé. Dans l'idéal, la prospection pédestre précède la prospection mécanisée.

2 Nous tenons ici déjà à exprimer toute notre gratitude à MM. Kurt Jenk, ingénieur en chef responsable des routes nationales, Jean-Pierre Zürcher, Robert Roth et Etienne Aubry de l'Office des ponts et chaussées du canton de Berne pour l'intérêt et le soutien permanents qu'ils nous ont témoignés. Nos remerciements vont également à l'entreprise Teiler + Kalbermatten AG, en particulier à son chef de chantier Pius Bürge, pour son aide logistique et l'intérêt porté à nos recherches.

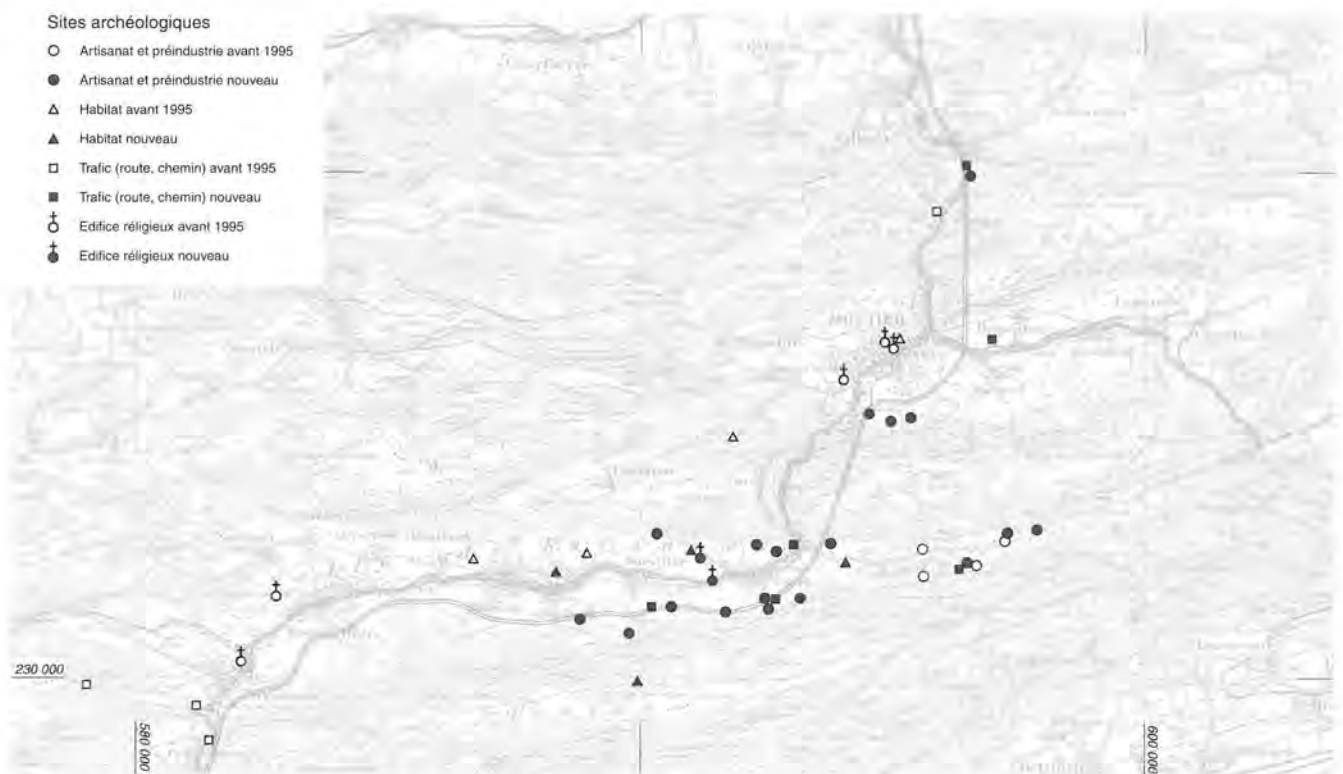


Fig. 3: Carte de répartition des sites archéologiques à l'Inventaire cantonal, complétée par les découvertes en prospection pédestre et mécanique faites le long du tracé de l'autoroute A16 depuis 1995. Echelle 1:150'000. PK100, © 1996.

Dans le cas particulier de la Vallée de Tavannes, les campagnes de prospection pédestre ne se limitèrent pas uniquement à la future bande autoroutière, mais à un périmètre élargi de 400 à 500 m de part et d'autre du tracé. Les anomalies observées furent ensuite cartographiées sur des plans à l'échelle 1:1000, puis introduites dans la base de données informatisée du Service archéologique. La prospection pédestre n'autorise pas la détection de sites totalement enfouis, surtout dans les zones de pâturage. De ce fait, les anomalies repérées remontent-elles au Moyen Age ou à l'époque moderne; il s'agit pour l'essentiel de sites de production temporaire à caractère artisanal: fours à chaux, charbonnières, crassiers de bas fourneaux, et d'anciens chemins abandonnés.

B. Les sondages mécaniques préventifs

Il ne nous appartient pas ici de revenir en détail sur la raison d'être de ces sondages. Rappelons simplement que leur but est de mettre en évidence les traces d'occupation ou d'activités laissées par nos ancêtres, d'en définir l'extension, afin d'établir les méthodes de sauvegarde appropriées (fouilles, prélèvements). Leur caractère est préventif dans la mesure où ils permettent de libérer les terrains après fouille, en tenant compte du calendrier des travaux de l'aménageur.

Les sondages archéologiques engagés dès 1995 furent exécutés de manière traditionnelle, en creusant au moyen d'une rétro-pelle mécanique³ des tranchées de 5 m de long et d'une largeur de 1,50 m, distantes de 20 m et disposées de manière alternée. Le creusage s'effectue par décapages réguliers, jusqu'au niveau du terrain naturel. La coupe stratigraphique est ensuite grossièrement nettoyée sur une ou deux colonnes de 30 cm de largeur, afin d'observer les strates du sol; les colonnes stratigraphiques sont relevées selon un protocole ad hoc. Les stratigraphies ne sont dessinées que lorsqu'elles présentent des anomalies à caractère archéologique. Deux piquets de bois sont plantés aux extrémités de chaque sondage, dans le prolongement du côté documenté. Lorsqu'une structure apparaît, celle-ci est immédiatement dégagée, photographiée, dessinée et enfin fait l'objet d'une mensuration précise. Tous les sondages, qu'ils soient négatifs ou non, sont systématiquement levés par un géomètre, soit en méthode traditionnelle au théodolite, soit par GPS, lorsque les conditions le permettent et pour autant qu'aucun vestige archéologique dut être levé.⁴

Les sondages ne se limitent pas au tracé autoroutier proprement dit, mais concernent toutes les surfaces susceptibles d'être modifiées par des mesures liées au chantier autoroutier: pistes de chantier, sites d'entreposage de matériaux temporaires ou définitifs, mesures compensatoires nécessitant des creusages, etc.

Ces creusages préliminaires permettent d'estimer et de planifier une intervention ultérieure.

C. Documentation de fouille

Les méthodes de documentation sont elles aussi classiques. Chaque sondage fait en principe l'objet d'une fiche descriptive particulière sur laquelle figurent toutes les informations topographiques et sédimentologiques utiles. Elle peut être complétée d'une esquisse ou d'un relevé détaillé, ainsi que de photographies.

Les zones fouillées font l'objet de relevés détaillés sur calque, généralement à l'échelle 1:20, de photographies au format professionnel 6/6 cm en couleur et en noir-blanc. Les observations et premières interprétations sont consignées dans un descriptif détaillé complet écrit au crayon sur du papier non chloré garantissant un archivage optimal.

2. Aperçu des résultats

Les résultats des prospections sont assez stupéfiants. Ainsi, pour la vallée de Tavannes, l'Inventaire cantonal des sites ne portait-il mention, avant 1995, que d'un unique four à chaux; à l'heure actuelle, nous en connaissons plus de 50, regroupés sur une douzaine de sites, la commune de Court se taillant la part du lion (fig. 3).

La présence de charbonnières est souvent révélée par les taupes qui rejettent en surface des restes charbonneux. Elles se concentrent souvent sur de larges replats, où il n'est pas rare de rencontrer quelque bas fourneau ou four à chaux. Les bas fourneaux se repèrent assez aisément à leur crassier, amas de déchets plus ou moins ferreux (scories) dispersés sur plusieurs mètres de diamètre, sur lesquels la végétation se développe mal. D'anciens chemins (chemins creux, layons, empierrés ou non) parfois organisés en faisceau, apparaissent çà et là dans les pâturages de l'envers de la vallée. Il s'agit parfois de chemins pédestres ou muletiers qui passaient la montagne pour atteindre la vallée voisine.

Tous ces vestiges, même s'ils ne devaient guère remonter au-delà du XVII^e siècle, constituent une mine d'information quant à l'exploitation des terroirs. Les réseaux de chemins nous permettent d'appréhender certains éléments de l'organisation du territoire. Silencieuses et discrètes, les archives du sol demandent à être interrogées et exploitées par le biais de la recherche historique et archéologique.

C'est ainsi, au cours d'une prospection pédestre en pleine forêt, au pied de pentes raides, partiellement couvertes d'éboulis calcaires, que fut découvert en 1996 le site chaux-fournier de Moutier - Combe Tenon. Celui-ci fit l'objet d'une fouille intensive en 1997. En parallèle à la fouille

3 La taille de l'engin mécanique dépend de la nature du terrain et du rendement envisagé; en général nous avons utilisé des machines de 11 à 22 tonnes équipées d'un godet lisse.

4 Nous tenons à remercier ici les collaborateurs du Bureau technique Waelti à Moutier pour leur engagement rapide et efficace.

des fours, une campagne de sondages complémentaires fut engagée dans l'ensemble du périmètre déboisé pour le chantier A16 (portail nord de la galerie de Graiter), ce qui permit la localisation d'un four à chaux supplémentaire. Par contre, les centaines de tranchées creusées jusqu'ici entre Sonceboz et Roches n'ont révélé aucune trace d'occupation pré- ou protohistorique, ni même romaine. Ce résultat conforte l'idée d'une faible occupation ou fréquentation des vallées de Moutier, Tavannes et Saint-Imier à ces époques, alors que la vallée de Delémont et l'Ajoie révèlent des habitats régulièrement disséminés sur l'ensemble du territoire. D'ailleurs, ce vide d'occupation du Jura bernois est confirmé de manière indirecte par la rareté des trouvailles préhistoriques anciennes au XIXe siècle et au début du XXe siècle.

III. Fabrication du charbon de bois

La fabrication du charbon de bois, attestée dès l'Antiquité, mais aujourd'hui tombée en désuétude, était à l'origine étroitement liée à l'industrie, en particulier la métallurgie. Dans l'arc jurassien, les charbonnières ont disparu du paysage au début du XXe siècle, suite à l'introduction très concurrentielle des charbons d'origine minérale. De nos jours, la production de charbon suisse selon des méthodes traditionnelles se limite surtout au massif du Napf, autour de la commune de Romoos⁵ (canton de Lucerne). Si les volumes produits demeurent assez confidentiels, les charbonniers lucernois n'en gardent pas moins de mérite, puisqu'ils assurent la survivance d'un savoir-faire traditionnel. D'autres manifestations ou démonstrations ponctuelles se déroulent régulièrement dans quelques écomusées, tel le Freilichtmuseum du Ballenberg de Brienz⁶ (canton de Berne) ou l'écomusée d'Alsace (Ensisheim, Haut-Rhin).

1. Approche technique

Le charbon de bois constitue le résidu solide d'une cuisson à l'abri de l'air, appelée carbonisation. Cette cuisson se déroule en général dans un espace confiné, à une température située autour de 300°C. On utilise du bois sec, de préférence du feuillu, coupé 6 à 12 mois auparavant. Sous l'effet de l'échauffement, le bois se transforme et perd près de 75% de son poids. Le carbone se concentre grâce à l'élimination de toute une série de produits plus ou moins volatils: gaz combustibles, goudron et liquide appelé vinaigre de bois contenant notamment de l'acide pyrolygneux, de l'alcool méthylique et de l'acétone. On désigne parfois cette opération de transformation du bois par le terme de distillation. Il existe différentes techniques de carbonisation.

A. La carbonisation en fosse

Cette technique attestée dès l'Antiquité semble être la plus ancienne. Elle est encore décrite par V. Biringuccio⁷ au XVIe siècle. Dans une fosse de dimensions réduites (environ 80 à 100 cm de diamètre et 100 à 120 cm de profondeur, on entasse des branches auxquelles on boute le feu. Lorsque celles-ci se sont embrasées suffisamment on les recouvre de terre. Au bout d'une journée, l'opération est terminée et le charbon prêt à l'emploi. Cette méthode ne permet pas une production massive de charbon. Le passage de la carbonisation en fosse à la carbonisation en meule, nettement plus productive, demeure peu évident à situer.

B. La carbonisation en meule circulaire

Méthode traditionnelle aujourd'hui encore, il semble que la carbonisation en meule ne soit pas connue dans l'Antiquité, à tout le moins n'est-elle jamais mentionnée ou décrite. Les premiers témoignages écrits remontent au XVIe siècle. Le développement de cette technique paraît associé à l'accroissement de la consommation de charbon de bois par l'industrie du fer en plein essor à partir de cette époque (hauts fourneaux, forges...).

Quoiqu'il existe de petites variations locales, le principe de construction d'une meule circulaire est relativement simple. On choisit un endroit abrité du vent, facile d'accès, situé à proximité d'un point d'eau (source, ruisseau, étang...). L'illustration (fig. 4) tirée de *L'Art du charbonnier* par Duhamel du Monceau illustre parfaitement les principales étapes de la fabrication du charbon. Dans un premier temps, le site choisi est aplani, puis on y dessine l'emplacement circulaire de la meule à dresser, dont le diamètre peut atteindre jusqu'à 10 m. La base de la meule est en principe convexe, afin de faciliter le ruissellement des résidus liquides. Il arrive que le charbonnier prélève ce jus d'exsudation et donne une forme concave ou en entonnoir au fond de sa meule. Ensuite, on rassemble avec soin au centre du disque une dizaine de rondins autour de quatre quartiers de bois résineux qui ménagent un vide appelé cheminée. Le vide ainsi créé accueillera ultérieurement un mât central. Cette base de cheminée est placée sur un plancher qui repose sur une série de rondins disposés en étoile. Le plancher isole la meule de l'humidité du sol et facilite le passage de l'air sous la meule jusqu'à la cheminée centrale où se développe le foyer. On arrange ensuite avec soin les rondins de longueur uniforme les uns contre les autres, en évitant de créer des espaces qui pourraient être nuisibles à la cuisson du bois. Le premier étage terminé, on construit un nouveau plancher avant d'arranger le second

5 Duss 1982; Siegwart 1925.

6 Gschwend 1980.

7 De la pirotechnia 1540, d'après Pelet 1983, 265.



Fig. 4: Gravure représentant les différentes étapes de la fabrication du charbon. (Duhamel du Monceau, 1761, pl.1).

étage. Et ainsi de suite jusqu'au sommet de la perche centrale, à quatre ou cinq mètres de hauteur. On recouvre alors l'ensemble de la meule de mottes de gazon, de feuilles, de mousse ou de branchages que l'on enduit de poussier⁸ humide. Ce manteau assure à la meule une bonne isolation thermique ainsi qu'une protection contre le vent, qui pourrait attiser le feu. Enfin, on aménage parfois tout autour de la meule un échafaudage sommaire en rondins et planchettes qui remplace les échelles et assure l'accès au dôme de bois pour le contrôle de la carbonisation. On enlève alors la perche centrale, afin de libérer la cheminée qui sera remplie de charbons ardents. Lorsque le foyer est allumé, la cheminée est obturée par un couvercle (plaque métallique ou pierre plate) et des orifices sont percés sur

les flans du dôme, afin d'assurer l'élimination des gaz. La durée de cuisson s'étend sur plusieurs jours et varie selon la taille de la meule; on compte généralement entre 10 et 14 jours pour une meule de 50 et 80 stères de feuillus (Duss 1982 et Gschwend 1980). La carbonisation se développe du haut vers le bas de la meule et nécessite une surveillance constante de la part du charbonnier. On procède à l'extraction du charbon par étage au fur et à mesure de la progression de la carbonisation. Après son refroidissement,

⁸ Le poussier est constitué de restes de charbon récupérés sur une ancienne charbonnière.

dissement, le charbon est conditionné dans des sacs ou transporté en vrac vers un entrepôt abrité. L'endroit où l'on procède à la fabrication du charbon de bois au milieu des forêts porte le nom de charbonnière.

C. Une variante: la meule suédoise

J. A. Scopoli décrit la meule suédoise qui diffère par la forme et par la manière d'entasser les longs rondins de bois (environ 250 cm). La base de la meule a une forme rectangulaire (fig. 5) et les bois sont disposés horizontalement. La hauteur de la meule augmente progressivement d'un bout à l'autre. L'ensemble est recouvert de poussier et les quatre côtés de la meule sont enserrés dans une sorte de coffrage de planches ou de rondins soutenus par des pieux. L'allumage s'effectue par une porte ménagée au centre du petit côté le moins haut ou dans un angle. Cette méthode de carbonisation n'est pas attestée en Suisse.

Nous ne nous attarderons pas sur la méthode développée au XIXe siècle, de fabrication du charbon de bois dans des fours en maçonnerie. Il semble que les techniques de carbonisation divergent peu dans l'ensemble de l'Europe moderne; seule la mise en oeuvre des meules diffèrent quelque peu. Il n'y a pas eu non plus d'évolution fondamentale depuis la fin du Moyen Age jusque vers 1900. Les techniques sont le reflet d'habitudes ancestrales.

Si la préférence est donnée aux bois de feuillus qui produisent un charbon plus dur, en définitif c'est le peuplement forestier qui détermine le bois utilisé. Ainsi, les feuillus sont-ils carbonnés du nord au sud de l'Europe sans distinction particulière⁹, le bouleau ayant la faveur des charbonniers dans les pays scandinaves. Dans les régions de montagnes, les résineux sont abondamment exploités et ce fut aussi le cas dans l'arc jurassien.

2. Etat de la recherche

Rares sont les écrits antérieurs à la Renaissance qui relatent la carbonisation: Théophraste en parle au IVe siècle avant J.-C. dans son Histoire des plantes.¹⁰ Le développement de l'industrie sidérurgique et la généralisation des

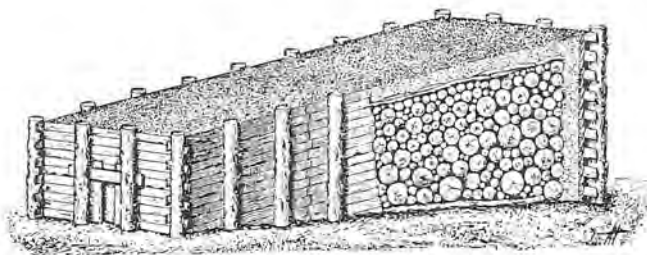


Fig. 5: Gravure représentant une meule carrée dite aussi meule suédoise. (Berthelot, Grande Encyclopédie, vers 1885, tome 10, p. 588).

hauts fourneaux en Europe provoquera dès le milieu du XVIe siècle la multiplication des écrits relatifs aux méthodes de carbonisation, aux avantages et aux qualités intrinsèques des différents charbons. En 1540 déjà, Biringuccio signale la carbonisation en meule. Au XVIIIe siècle, le français Duhamel du Monceau décrit avec soin les étapes de la construction de la meule, sa mise à feu, le principe de carbonisation, ainsi que l'extraction du charbon produit. En 1771, Scopoli traite de la carbonisation et discute d'une meule verticale un peu différente et souligne la nécessité de changer le mode de recouvrement de la meule (bannir rameaux et petites branches de sapins verts ou mottes de gazon) dans un souci de protection de la forêt et des jeunes pousses. Il encourage même l'utilisation de la paille. Il s'intéresse également à la meule suédoise où les bois sont disposés horizontalement sur une aire rectangulaire. Enfin, il décrit encore d'autres variantes moins courantes. Les charbonniers jurassiens ont, semble-t-il, surtout pratiqué la méthode de la meule hémisphérique ou conique. La tradition se perd au début du XXe siècle, peut-être un peu avant, avec l'accès généralisé aux charbons de terre (houille, anthracite). Toutefois, quelques expérimentations teintées de nostalgie ont vu le jour à Saint-Ursanne (1977), puis à Bassecourt (1982) et récemment encore à Péry (1999). Enfin, en 1996 dans le cadre d'un programme d'archéologie expérimentale mené par Ludwig Eschenlohr, des charbonniers alsaciens ont réalisé deux meules à Lajoux (fig. 6), dont le produit servait à alimenter les bas fourneaux à fer expérimentaux de Boécourt - Les Boulies.¹¹ Le choix des bois a été établi sur la base des analyses anthracologiques réalisées sur différents sites de production de fer jurassien.

En Suisse, on continue à produire du charbon de bois, selon des méthodes traditionnelles, dans le massif du Napf. En 1850, la commune lucernoise de Romoos comptait plus de 100 charbonnières; en 1982, une douzaine de charbonniers y étaient encore actifs et produisaient annuellement près de 50 tonnes de charbon de bois.¹² A l'écomusée bernois de Ballenberg (près de Brienz) quelques charbonniers pratiquent encore la carbonisation en meule à des fins didactiques et de conservation des savoir-faire.

L'intérêt pour les charbonnières est assez récent. Il découle des recherches en histoire de l'environnement, dont les pionniers sont à chercher dans les Pyrénées françaises où des travaux ont démarré dans les années 1970 déjà. Un programme interdisciplinaire de recherches sur les charbonnières et leur lien avec la métallurgie a même été engagé dès 1988.¹³

9 Pelet 1983, 265.

10 Livre III, chap. 8 et 9.

11 Eschenlohr 1993 et 1997.

12 Duss 1982, 103.

13 Dubois et al. 1994, y.c. bibliographie; Bonhôte J., Vernet J.-L., Fruhauf C., Métailié J.-P. et Izard V. en sont les principaux chercheurs.



Fig. 6: Lajoux 1996: réalisation de charbonnières par des charbonniers de l'Ecomusée d'Alsace.

En Suisse, si l'on excepte les travaux de P.-L. Pelet¹⁴ la question des charbonnières n'a à notre connaissance pas fait l'objet de recherches importantes. De telles études n'ont d'intérêt que dans la mesure où elles permettent d'appréhender l'exploitation forestière à une échelle spatio-temporelle suffisamment grande, par exemple dans une vallée ou une région sur une période de plusieurs siècles. A cet égard une étude de l'industrie sidérurgique, si florissante dans la vallée de Delémont entre les XVIe et XIXe siècles, au travers des nombreux documents d'archives et des charbonnières, permettrait de saisir un peu mieux les modes d'exploitation forestière et leurs impacts environnementaux.

IV. Fabrication du fer

Le fer est un métal gris bleuté assez ductile et possédant un point de fusion très élevé (1530 °C).¹⁵ Un alliage à base de fer contenant un peu de carbone (de 0,02 à 2%) est un acier. Les aciers sont plus durs que le fer et leur dureté augmente en fonction de la quantité de carbone présente. Ils gardent cependant une bonne résistance aux chocs ce qui en fait un matériau performant pour la fabrication des outils et des armes. Les aciers peuvent être mis en forme à la forge par déformation plastique. En procédant à des traitements thermo-chimiques (trempe, recuit, etc.), le forgeron peut obtenir des propriétés physiques particulièrement remarquables. Lorsque l'alliage contient plus de 2% de carbone, on parle de fonte. Le point de fusion des fontes est variable mais le minimum est de 1150 °C à 4% de carbone environ. Ces alliages sont très durs et très cassants. Ils ne peuvent pas être travaillés à la forge ni être utilisés pour fabriquer des objets qui doivent résister aux chocs. Par contre, les fontes sont d'excellents matériaux de fonderie et peuvent être facilement moulées.

Dans la nature, le fer métallique ne se rencontre qu'en très faible quantité, principalement sous forme de météorites. Au contraire, les minerais de fer, c'est-à-dire les roches contenant une forte proportion de minéraux riches en fer (magnétite, hématite, goëthite, etc.), sont abondants à la surface de la Terre et en général à forte teneur.

On admet généralement que l'usage du fer se développe à partir de la fin du second millénaire avant notre ère au Proche-Orient.¹⁶ A cette période, la métallurgie des alliages à base de cuivre et des métaux précieux est déjà largement développée. La maîtrise de la technologie du fer gagnera lentement le bassin méditerranéen puis les régions septentrionales de l'Europe. C'est vers 800 av. J.-C. que les premiers objets en fer arrivent au Nord des Alpes. Tout au long de la Protohistoire, de l'Antiquité et du Haut Moyen Age, le fer a été produit au bas fourneau par la méthode directe. On fabrique ainsi du fer ou de l'acier. Cette technique fut encore pratiquée au XIXe siècle dans certaines régions d'Europe et au XXe siècle en Afrique. Avec le Moyen Age, la technique du haut fourneau se développe

en Europe et s'y généralise au cours du XVIe siècle. Cette technique permet de produire de la fonte qu'il faut décarburer partiellement de manière à la rendre forgeable. Plus tard, à partir de 1695 (Darby), le coke va progressivement remplacer le charbon de bois comme combustible. C'est l'invention du convertisseur, peu après 1850 (Bessemer), qui a permis de fabriquer de grandes quantités d'acier à l'état liquide. Le haut fourneau moderne atteint plusieurs dizaines de mètres de haut et produit quotidiennement des centaines de tonnes de métal.

Les bas fourneaux sont des structures de petites dimensions ne demandant qu'un investissement réduit pour leur construction (Fig. 7 et 93a). On les installe généralement à proximité des mines et des forêts pour minimiser les transports. Les hauts fourneaux anciens sont construits au bord des cours d'eau de manière à pouvoir utiliser l'énergie hydraulique pour actionner la soufflerie (fig. 7). L'investissement est notablement plus important. Le minerai et le charbon sont souvent transportés jusqu'au fourneau et stockés sur place avant utilisation. Les industries sidérurgiques modernes sont implantées dans les grands ports de manière à faciliter la circulation des matières premières et des produits.

1. Approche technique

A. La méthode directe de réduction du minerai de fer

Le minerai, contenant principalement des oxydes de fer, est introduit dans le bas fourneau avec du charbon de bois. En brûlant, celui-ci dégage du monoxyde de carbone. Les oxydes de fer réagissent avec ce gaz et sont réduits à l'état métallique. Ce processus est mené à bien à une température voisine de 1200 °C, insuffisante pour provoquer la fusion du métal qui demeure donc à l'état solide. Les impuretés contenues dans le minerai et les oxydes de fer qui n'ont pas réagi, forment une scorie dont le point de fusion est suffisamment bas pour qu'elle puisse s'écouler.

Le bas fourneau peut être une construction assez rudimentaire mais de nombreuses variantes sont possibles (Fig. 8). La cuve isole la charge de l'extérieur pour permettre la montée en température et le confinement des gaz. Le revêtement interne doit être suffisamment réfractaire pour ne pas subir une fusion trop importante. Le manteau externe peut être renforcé par des pierres ou des moellons. La cuve doit posséder une ouverture supérieure

14 Pelet 1973, 1978 et 1983.

15 Pour plus d'informations sur les aspects généraux de l'archéologie du fer, on trouvera une abondante bibliographie dans Serneels 1998.

16 L'origine de la métallurgie du fer en Europe est sans doute à rechercher au Moyen Orient. Par contre, pour d'autres régions et en particulier l'Afrique de l'Ouest, les recherches récentes apportent des arguments solides pour un développement autonome et précoce de la sidérurgie.

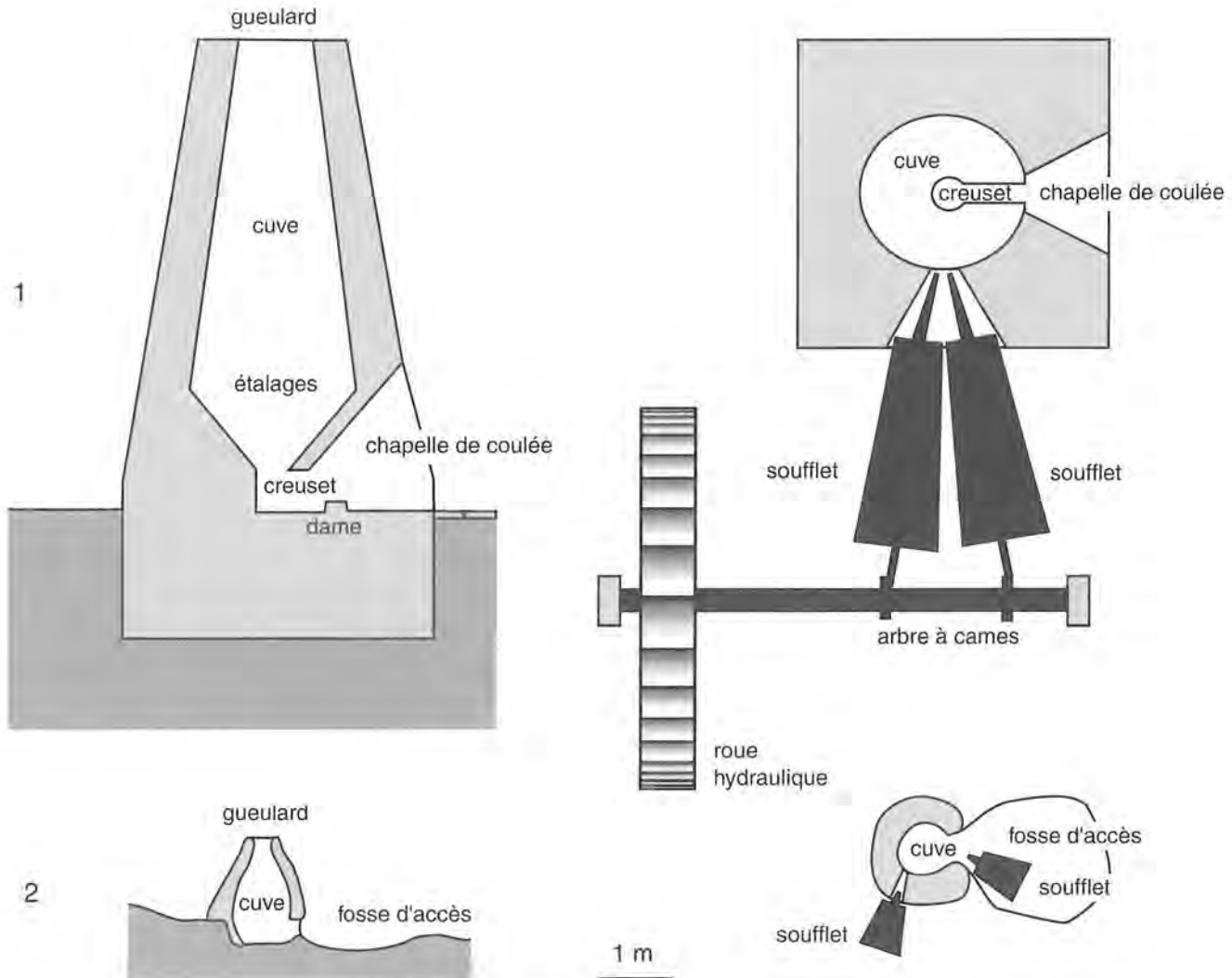


Fig. 7: Plans et coupes schématiques des deux grandes familles de fourneaux pour la réduction du minerai de fer. 1) Haut fourneau ancien (d'après les modèles classiques de l'Encyclopédie); 2) bas fourneau à scorie coulée (d'après les modèles jurassiens du Haut Moyen Age)

qui permet de charger le minerai et le combustible. Généralement, cette ouverture possède la forme d'une cheminée. A la base, il faut un dispositif d'aéragé de manière à introduire assez d'air pour permettre la combustion du charbon. La ventilation peut être naturelle (effet de tirage) ou artificielle (soufflet). L'ouverture peut être un simple trou ou bien une véritable tuyère, c'est-à-dire une pièce en forme de tuyau spécialement fabriquée.

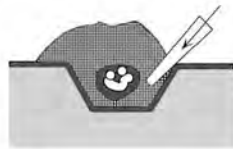
Le produit et les déchets de la réduction peuvent être récupérés tout simplement par l'ouverture sommitale, en particulier dans les plus petits fourneaux où la séparation entre métal et scorie est incomplète.

On peut aussi détruire les parois de la cuve pour procéder à l'enlèvement du produit. Les fourneaux à scorie piégée (slag pit furnace) sont construits au-dessus d'une fosse qui est remplie de bois ou de paille avant l'opération. Au cours du travail, la scorie liquide s'y accumulera et comblera petit à petit ce trou. A la fin, on démonte les parois de la cuve ce qui permet de récupérer le métal. Le bloc de scorie est abandonné et un nouveau fourneau est construit sur un nouvel emplacement.

Dans certains cas, le bas fourneau est muni d'une porte dans la partie inférieure qui permet, au cours de l'opération, de faciliter l'écoulement des scories et, à la fin du travail, d'évacuer le produit métallique. Ces fourneaux sont construits plus solidement et peuvent être réutilisés un grand nombre de fois.

Dans la cuve, une partie des oxydes de fer sont réduits à l'état métallique par le gaz de combustion. Cette réaction débute à la périphérie des grains de minerai et dans les fractures. Elle gagne petit à petit vers l'intérieur des morceaux de minerai. Les particules métalliques croissent lentement. La matière interstitielle est constituée par les oxydes de fer non réduits et les impuretés du minerai. Ce mélange forme une scorie, fusible à des températures supérieures à 1150°C, selon sa composition chimique particulière. Lorsque la température de fusion est largement dépassée, la scorie, surchauffée et donc fluide pourra se séparer facilement du métal et s'écouler soit vers le fond soit vers l'extérieur du fourneau (fig. 92h). Les particules de métal entrent alors en contact et se soudent plus ou

Groupe 1
FOURNEAUX SANS SEPARATION DE LA SCORIE



1.1



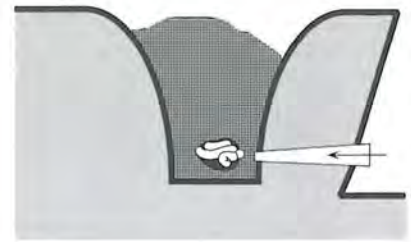
Eponge de fer



Scorie

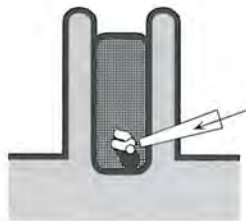


Charbon de bois



1.2

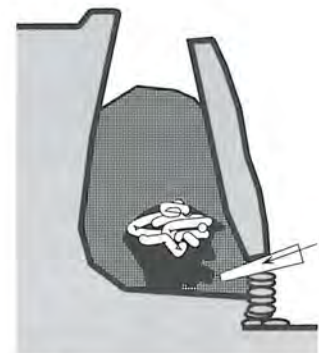
Groupe 2
FOURNEAUX AVEC SEPARATION VERTICALE DE LA SCORIE



2.1



2.2



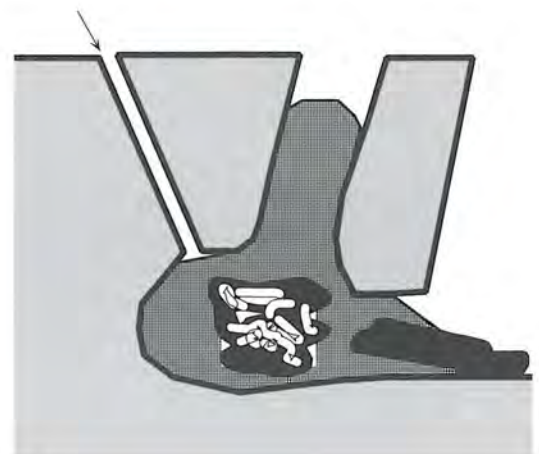
2.3

Groupe 3
FOURNEAUX AVEC SEPARATION ET ECOULEMENT EXTERNE DE LA SCORIE



3.1

env. 1 m



3.2

Fig. 8: Schéma de classification des bas fourneaux basée sur le mode de séparation entre le fer et la scorie (Serneels 1998). Les autres critères de classification ne sont pas pris en compte (type et disposition de la ventilation, etc.).

1.1 Foyer en fosse (Afrique contemporaine: Celis 1991).

1.2 Fourneau en entonnoir (Norvège XVIIe–XVIIIe siècle: Espelund 1991).

2.1 Petit fourneau cheminée (Pays de Galles, Age du Fer: Crew 1991).

2.2 Grand fourneau cheminée à utilisation unique (Europe de l'Est et du Nord, Age du Fer – Haut Moyen Age, en particulier Pologne, Montagne Sainte Croix: Bielenin 1992).

2.3 Fourneau cheminée à utilisations multiples (Europe de l'Est et du Nord, Age du Fer – Haut Moyen Age, en particulier Bohême: Motykova et Pleiner 1987).

3.1 Fourneau cuve à scorie coulée (Europe de l'Ouest, Age du Fer – Haut Moyen Age, en particulier Jura suisse: Eschenlohr et Serneels 1991, Pelet 1993).

3.2 Fourneau à cuve abritée de l'air (Haut Moyen Age, Zelechovice, Slovaquie: Pleiner 1958).

moins les unes aux autres. Cependant, comme le métal est solide ou simplement pâteux, il forme une masse irrégulière possédant une porosité importante et contenant de nombreuses inclusions de scorie et de charbon de bois. Le tout possède une texture plus ou moins spongieuse (fig. 93b).

Ce bloc impur, l'éponge de fer, est le produit brut du bas fourneau. Avant de pouvoir être utilisé, il doit être compacté et purifié. Le travail de purification ou «raffinage» peut être mené à bien de différentes manières en fonction de la nature de l'éponge. Dans le cas d'un produit brut assez compact et ne contenant qu'une faible proportion d'inclusions non métalliques, l'éponge est réchauffée dans un foyer et compactée par martelage de plus en plus intensif. Au contraire, pour un produit faiblement séparé et peu compact, on procèdera au préalable à un concassage et un tri du matériel. Les pièces riches en métal, reconnaissables à leur poids et à leur ductilité, seront ensuite soudées les unes aux autres à la forge. Quelle que soit la manière dont elle est effectuée, cette opération aboutit à la fabrication d'une barre ou d'un lingot qui pourra être travaillé à la forge.

B. La méthode indirecte de réduction du minerai de fer

Si on augmente la température et le temps de réaction, c'est-à-dire si l'on utilise un fourneau plus grand et une soufflerie plus forte, l'opération va devenir très différente. La réduction, d'abord, sera plus complète et donc le déchet plus pauvre en fer. Ensuite, le carbone provenant du combustible aura le temps de diffuser dans le métal et de former une fonte qui, en raison de son point de fusion relativement bas, passera à l'état liquide. Dans le haut fourneau, il se forme donc deux liquides, l'un métallique et l'autre silicaté. Ils ruissellent tous deux vers le fond du haut fourneau, le creuset. La fonte, plus dense, se rassemble à la base et le laitier s'accumule au-dessus d'elle. On évacue alternativement chacun de ces liquides à intervalle régulier, en ouvrant les trous de coulée.

C'est donc un processus continu. Une fois le haut fourneau mis en marche, il doit être chargé continuellement par l'ouverture sommitale tandis que l'on soutire régulièrement le métal et le laitier par l'ouverture de coulée qui se trouve à la base.

Le haut fourneau ancien est déjà une construction imposante (fig. 7). Il mesure 3 à 6 mètres de haut au moins. C'est une structure en pierres, fixe et solide, qui doit pouvoir fonctionner sans interruption pendant plusieurs semaines ou même plusieurs mois. Le revêtement interne doit être très réfractaire pour supporter ce traitement. La géométrie de la cuve est variable mais la forme classique est celle de deux cônes inégaux accolés par la base. Les parois du cône supérieur forment un angle plus aigu que celles du cône inférieur. Les soufflets de grande taille sont actionnés au moyen d'une roue hydraulique. Cette installation demande en général une retenue d'eau avec son sys-

tème de digue et de canaux. Des locaux permettant de stocker au sec les matières premières pour toute une campagne de fonte ainsi que des chemins carrossables facilitant les transports lourds, sont nécessaires.

Le produit métallique du haut fourneau est une fonte. Elle peut être moulée directement à la sortie du haut fourneau, en particulier pour fabriquer de très grosses pièces mais en général on préfère produire de gros lingots allongés, les gueuses. Celles-ci peuvent être ensuite refondues pour le moulage à la poche.

On peut aussi décarburer la fonte en la réchauffant en milieu oxydant, c'est-à-dire en dirigeant sur elle l'air du soufflet. Dans ce cas, l'excès de carbone présent dans le métal réagit avec l'air et s'échappe avec les gaz. Ce traitement, l'affinage, permet de produire un bloc d'acier qui s'accumule au fond du foyer. Il doit ensuite être compacté par un martelage vigoureux, souvent à l'aide d'un martinet, c'est-à-dire un gros marteau mû par la force hydraulique. Le métal affiné est alors utilisable à la forge.

2. Etat de la recherche

La sidérurgie ancienne a fait l'objet de nombreuses recherches dès la seconde moitié du XIXe siècle. A cette époque du triomphe de la révolution industrielle, le développement considérable de l'industrie sidérurgique moderne a causé la mise au jour de nombreux vestiges antiques dans les mines et à proximité (Serneels 1992). Dans les différents pays européens, quelques ingénieurs ont porté témoignage de ces découvertes. Un des premiers fut A. Quiquerez, ingénieur des mines de fer du Jura bernois et passionné d'histoire locale (Quiquerez 1866). Il faut ensuite attendre les années 1950 pour voir d'autres chercheurs s'intéresser à ces vestiges, en particulier dans les régions de l'Est et du Nord de l'Europe. En Suisse, W.U. Guyan entreprend les premières fouilles scientifiques d'un atelier de réduction du minerai de fer (Guyan 1946). Avec les travaux de P.-L. Pelet dans le Jura vaudois, l'industrie sidérurgique et son évolution technique est approchée dans la longue durée (Pelet 1993, 1978, 1983). Une véritable réflexion sur la technologie et sur l'économie de cette industrie est mise en place. A la fin des années 1980, en partant d'une approche archéométrique basée sur les analyses chimiques, de nouvelles recherches sont menées à bien, mettant l'accent principalement sur la chaîne opératoire technique de la sidérurgie et la distinction entre les scories issues de la réduction du minerai de fer et celle provenant du travail de forgeage. L'approche quantitative des vestiges a aussi été développée. A côté de la démarche analytique, un important effort a été fait pour une prise en compte systématique des déchets métallurgiques au cours de fouilles archéologiques ce qui permet une approche plus globale de la sidérurgie ancienne, menant à une perspective à la fois sociale et économique. Actuellement, ce domaine de la recherche est particulièrement vivant en Suisse et dans les pays voisins.

Le district sidérurgique du Jura central suisse a fait l'objet, au cours des dernières années, de recherches approfondies, en particulier dans le cadre de la thèse de L. Eschenlohr (Eschenlohr 2001). Ces travaux proposent une vision considérablement renouvelée des connaissances régionales. Dans le Jura central, plus de 400 sites avec des amas de scories de réduction ont été recensés et une centaine de datations par la méthode du carbone 14 ont été effectuées sur des charbons trouvés parmi ces scories.

Jusqu'à maintenant, aucun amas de scories n'a pu être attribué à une période précédant le Haut Moyen Age. Ce fait ne suffit pas à démontrer qu'il n'y a eu aucune exploitation antique, par contre, on peut penser que l'activité fut au mieux d'importance limitée. Dans les autres parties du Jura, on aboutit à des conclusions similaires même s'il est incontestable que du fer a été produit à l'époque romaine dans la région du Mormont près de La Sarraz VD (Pelet 1993). A l'échelle de la Suisse dans son ensemble, il ne semble pas que l'exploitation des ressources en minerais de fer locales ait pu permettre l'approvisionnement de la population du Plateau à l'époque romaine. Il faut donc envisager à cette époque d'importantes importations de fer. Les volumes de fer produits dans d'autres parties de l'Empire, en Gaule ou ailleurs, et la sécurité des routes commerciales rendent cette hypothèse parfaitement plausible (Serneels et Mangin 1996).

Pour la période du Second Age du Fer (La Tène), au vu de la documentation archéologique et de la maigreur des vestiges liés à la production du fer en Suisse, on est obligé de proposer une explication identique même si celle-ci semble moins facilement acceptable dans ce contexte chronologique.

Au cours du Haut Moyen Age, la production se développe. L'ensemble des sites du Grand-Val est daté de cette période ainsi que plusieurs amas de scories dans la vallée de Delémont. Les bas fourneaux fouillés à Boécourt - Les Boulies fonctionnent avec un écoulement externe des scories et une double soufflerie disposée à deux niveaux (Eschenlohr et Serneels 1991). Ils sont très proches des fourneaux de la même époque fouillés dans la région du Mormont (Pelet 1993) et sur d'autres sites en Lorraine (Leroy 1995) et en Bourgogne (Dunikowski et Cabboï 1995).

Au cours de cette période, la consommation de fer par an et par habitant est certainement inférieure à ce qu'elle était sous l'Empire romain. Dans le Jura, la demande a pu être satisfaite par la production locale et il est fort probable que la région produisait même un surplus exportable.

Le Moyen Age voit se poursuivre l'expansion de l'exploitation. La période qui couvre la seconde moitié du XIIe siècle et le XIIIe siècle correspond à une intense activité, centrée sur la zone des Franches-Montagnes et du Petit-Val. A ce moment au moins, l'industrie présente les caractères d'une activité intensive tournée vers l'exportation. Des vestiges plus anciens (IXe et Xe siècles) et plus récents (jusqu'au XVIIe siècle) ont également été mis en évidence et il ne semble pas y avoir eu d'arrêt de la production par la méthode directe. La part de marché repré-

sentée par la production locale reste très difficile à évaluer. Au cours du Moyen Age, il semble que plusieurs types de fourneau ont été utilisés dans le Jura central. L'état des connaissances permet de constater cette diversité mais faute de fouilles en nombre suffisant, elle demeure difficile à interpréter.

En plus des données de Quiquerez, deux autres fourneaux ont fait l'objet d'observations archéologiques récentes et concordantes: sites de Lajoux - Grand Pré (Joos 1994) et Monible - Sous ce Mont 2 (Eschenlohr 2002). Il s'agit de fourneaux possédant une cuve de plus de deux mètres de hauteur, inclinée ou même hélicoïdale. Aucun dispositif de soufflerie artificielle n'a pu être mis en évidence et tout porte à croire que ces appareils fonctionnent avec un tirage naturel. Les parois sont constituées d'un épais amoncellement de matériaux divers entouré d'un parement externe en pierres. Ce sont probablement ces fourneaux que l'on trouve sur les sites des Franches-Montagnes pendant la période de production principale.

Ce n'est pas le seul type de fourneau fonctionnant à cette période comme en témoignent les vestiges du site d'Undervelier - Montepoirgeat 1 (Eschenlohr 2001). Le fourneau, bien que mal conservé, est nettement plus grand que ceux de Boécourt et fonctionne avec une tuyère latérale de diamètre plus important.

Il semble aussi que des ferrières hydrauliques, c'est-à-dire des bas fourneaux produisant du fer selon la méthode directe de réduction mais activés au moyen d'une soufflerie mue par la force hydraulique, aient fonctionné pendant cette période et même dès le XIe siècle. Le fourneau que décrit Quiquerez pour le site de Boécourt - La Favoirgeatte appartiendrait à cette catégorie et se présente sous la forme d'un imposant massif carré de trois mètres de côté et autant de haut enserrant une cuve cylindrique assez étroite (diamètre 50 cm). La cuve montre un revêtement interne s'appuyant sur un parement en blocs de grès. Le fourneau possède une porte à la base et une tuyère latérale. Si le site de l'ancienne fouille de Quiquerez a été correctement identifié sur le terrain, alors l'installation pourrait être datée des XIVe et XVe siècles.

C'est probablement seulement au XVe siècle que le véritable haut fourneau produisant de la fonte est introduit dans cette partie du Jura (Quiquerez 1866, Steiner documentation inédite compilée par Eschenlohr). Cependant, les vestiges découverts à Langenbruck - Dürstel BL, près du col du Hauenstein, appartiennent à un haut fourneau primitif et sont datés des XIe-XIIIe siècles (Tauber 1998, étude en cours H. Winkel). D'autres hauts fourneaux précoces sont maintenant connus dans différentes régions d'Europe (Magnusson 1988, Knau et al 1998).

V. Fabrication de la chaux

La chaux est un liant issu de la calcination de la roche calcaire. Elle est utilisée dans la préparation de mortier et de crépi de construction. La chaux ne se trouve pas à l'état naturel, elle se fabrique par cuisson d'une roche riche en

carbonate de calcium (CaCO_3), comme les calcaires, dolomies et marbres à une température de 1000°C environ. La calcination du calcaire provoque l'élimination du gaz carbonique (CO_2) contenu dans la roche; le produit restant est un oxyde de calcium (CaO), couramment appelé chaux vive. L'équation de cette réaction chimique est simple: $\text{CaCO}_3 + \text{Chaleur} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CaO}$. Le produit obtenu se présente sous la forme de blocs pulvérulents en surface qu'il est nécessaire d'hydrater pour obtenir le liant recherché. Les blocs cuits gardent leur volume, mais perdent environ 45% de leur poids. L'immersion des blocs de chaux vive provoque leur dislocation et leur transformation en une pâte plastique, la chaux hydratée ou chaux éteinte: $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$.

Tab. 1: Equations des réactions chimiques discutées.

Calcination :	$\text{CaCO}_3 + \text{Chaleur} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{CaO}$
Hydratation :	$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$
Carbonatation :	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$

Sous sa forme hydratée la chaux se conserve longtemps à condition toutefois de l'entreposer à l'abri de l'air. Une solution simple consiste à la stocker dans une fosse étanche creusée en terre. C'est ce matériau qui lié à un agrégat (sable ou gravier) constitue le mortier. Les mortiers sont en général grossiers et servent de liant pour les maçonneries, alors que les crépis ou enduits possèdent une granulométrie plus fine qui permet un lissage de surface.

La chaux hydratée réagit ensuite avec le gaz carbonique présent dans l'air. Cette réaction libère de l'eau (séchage, évaporation) et provoque la cristallisation du carbonate de chaux; la chaux durcit et retourne progressivement à l'état de pierre. Pour des maçonneries massives, ce durcissement peut prendre plusieurs années.

La cuisson de la pierre semble être une activité très ancienne. Les plus anciens fours à chaux ou à gypse ont été localisés en Mésopotamie et en Egypte; ils remonteraient au milieu du 2e millénaire av. J.-C.¹⁷ Dès l'Antiquité, une certaine standardisation se dessine et les fours à chaux traditionnels de la région méditerranéenne restent proches des prototypes antiques.

1. Approche technique

Pour fabriquer de la chaux à partir de roches calcaires dures, la construction d'un véritable four s'avère nécessaire. De manière générale, si l'on considère les fours postmédiévaux connus en Europe, on remarque de nombreuses variations au niveau d'éléments de détail (gueule, élévation, matériau de réalisation...). Mais en fait, on peut distinguer deux grandes familles: les fours à usage périodique et les fours industriels fonctionnant en continu. Néanmoins, tous ont une architecture générale proche.

A. Architecture

Le four à chaux est constitué de plusieurs parties distinctes (fig. 9). Des pierres soigneusement disposées et entassées en cercle délimitent la chambre de chauffe et parfois même le laboratoire¹⁸ (chambre de calcination). La chambre de chauffe est fermée par une voûte qui prend appui sur le sol ou sur une banquette aménagée à cet effet. Elle est munie d'une ouverture de section quadrangulaire construite en gros blocs ou en dalles: la gueule. Cette ouverture sert à l'alimentation du foyer et au réglage de la ventilation. Fourcroy de Ramecourt¹⁹ indique que cette ouverture doit être protégée par un appentis en bois (fig. 10) qui préserve le four des coups de vent et de la pluie, qui pourraient nuire à la régularité du feu. Mais nous n'avons pas trouvé trace de cet aménagement en bois, qui était peut-être plutôt destiné aux fours maçonnés. Le laboratoire, situé au-dessus de la voûte, renferme la charge de pierre calcaire destinée à la cuisson. La partie de la charge qui émerge du sol est recouverte d'une couche terreuse ou argileuse isolante, le manteau, qui évite une trop grande déperdition de chaleur. Dans certains cas, ce revêtement est maintenu par un boisage (fig. 40, var. 1 et 41) constitué de rondins et de piquets, voire d'un tressage.²⁰ Ce mode de construction a été appliqué à Moutier, Court et peut-être à Roches, mais les traces archéologiques restent souvent difficiles à repérer²¹ (voir p. 29 et 40). Par contre, cette technique n'est apparemment pas attestée dans les pays balkaniques, méditerranéens et anglo-saxons, puisque E. Reusche, J.-P. Adam et R. Williams n'y font jamais allusion.

Suivant leur taille et leur implantation, ces fours sont munis d'une ou de plusieurs ouvertures supplémentaires, les événements, destinées à améliorer le tirage. Elles se situent au-dessus de la gueule, sur le dôme ou dans le parement de moellons, à fleur du sol extérieur.²²

Revenons brièvement sur deux éléments importants du four: la voûte et le manteau. La première délimite, nous l'avons vu, la chambre de chauffe de la charge à cuire. Par les interstices laissés entre les blocs, la chaleur dégagée par le foyer se transmet progressivement au laboratoire. De sa bonne réalisation dépend la réussite de la calcination: elle ne doit céder ni sous le poids de la charge (parfois plusieurs dizaines de tonnes) ni sous l'intensité du feu. En théorie, deux types de voûte sont envisageables dans ces constructions: la vraie voûte, où les gros blocs calcaires sont entassés de manière à former des arcs autopor-

17 Williams 1989, 3-4; Adam 1995, 69.

18 Terminologie empruntée à Flach 1982.

19 Fourcroy de Ramecourt 1766, 10.

20 Hassenfratz 1825, pl. I, fig. 4; Cop 1993.

21 Les restes d'une sorte de clayonnage ont été identifiés autour du manteau argileux d'un four à chaux fouillé à Court - Pâturage aux Boeufs (1998).

22 Adam 1995, 71-72.

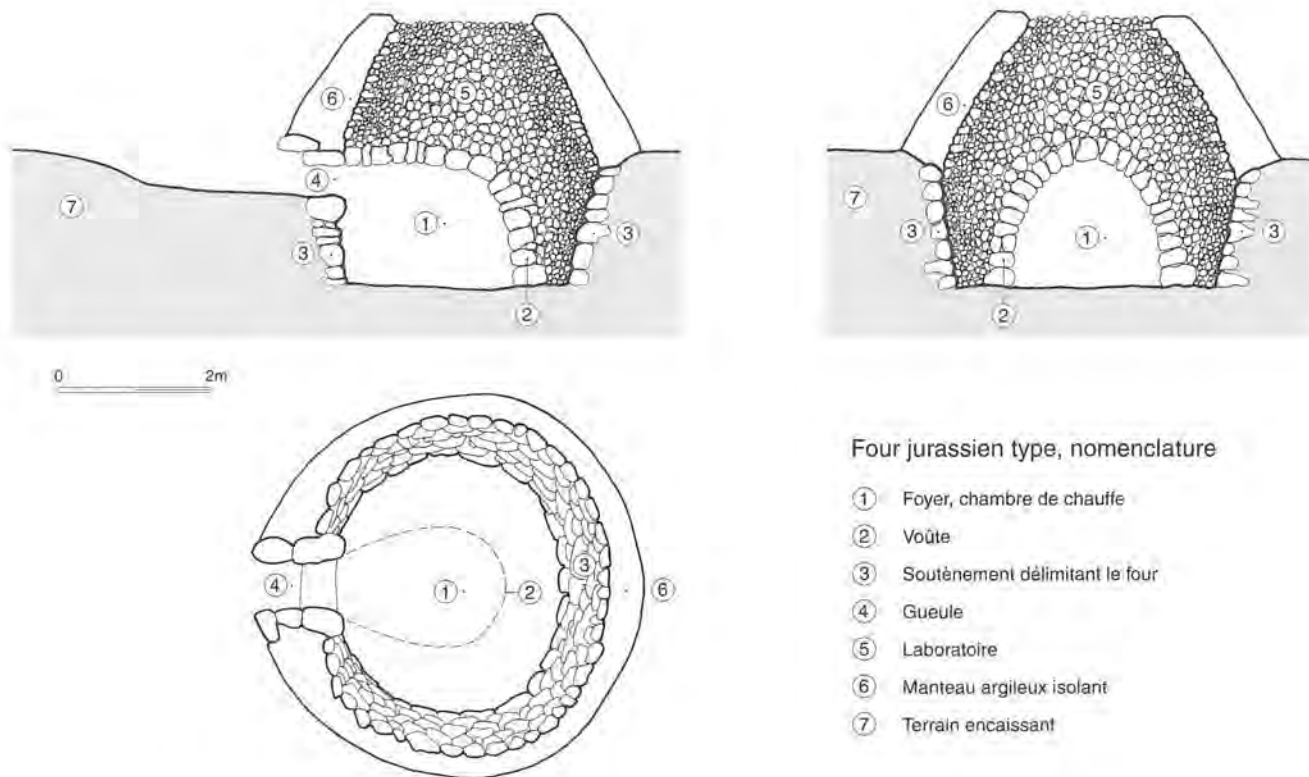


Fig. 9: Schéma d'un four à chaux jurassien semi-enterré.

teurs (voûte en berceau), ou la fausse voûte, constituée de dalles ou blocs superposés, disposés en encorbellement. Mais, comme cette partie du four n'est jamais conservée, il demeure difficile d'en préciser le mode de construction. Les traces de poteaux supportant les cintres qui soutiennent la voûte lors de sa construction sont rares. Nous croyions en avoir mis en évidence à Roches, dans le cas du four 2, mais il semble plus opportun d'interpréter ces cinq bases de poteaux calcinés comme des perches servant de cheminées.

Les blocs utilisés pour la confection de la voûte sont suffisamment gros pour ne pas être complètement calcinés durant la cuisson. La gravure (fig. 10, en haut) tirée de la Description des arts et métiers illustre ce principe de construction, bien qu'il s'agisse dans le cas présenté d'un four construit en dur.

En raison de leur faible enfouissement, les fours se développent hors du sol. La charge calcaire forme alors un dôme pouvant atteindre plusieurs mètres de hauteur. A la base du chargement on plaçait les plus grosses pierres et on diminuait progressivement la taille de celles-ci, afin d'en faciliter la cuisson, puisque la température diminue de manière assez sensible depuis le centre vers la périphérie. Il est d'usage de disposer verticalement au sein de la charge cinq ou six perches de bois qui, une fois consommées ménageront autant de vides qui feront office de cheminées (tirage, voir supra). Le manteau argileux qui recouvre le dôme sert d'isolant thermique; il peut atteindre une épaisseur de plusieurs dizaines de centimètres.

Le diamètre des fours périodiques rencontrés dans nos régions oscille entre 3 et 5 m environ pour une hauteur totale de 4 et 6 m. D'après Valentin Biston, le rapport entre la hauteur totale et le diamètre du four ne doit pas excéder 2:1; ce que paraissent confirmer des actes notariés neuchâtelois signalés par R. Cop.²³ On peut distinguer deux groupes de fours à chaux en les répartissant selon leur mode de fonctionnement: les fours périodiques et les fours continus de type industriel.

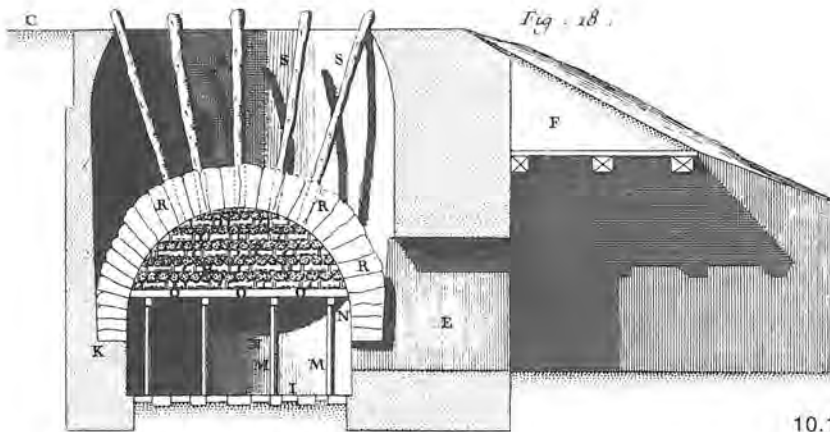
B. Les fours périodiques

Les fours à chaux traditionnels fonctionnent de manière périodique (ou intermittente) et nécessitent d'être partiellement reconstruits après chaque cuisson. Lorsque la cuisson est terminée, le manteau argileux qui recouvre le four est déposé et les blocs calcinés sont extraits. Pour l'opération de calcination suivante, il faut reconstruire la voûte, recharger en calcaires et recouvrir le dôme de pierres d'un manteau terreux.

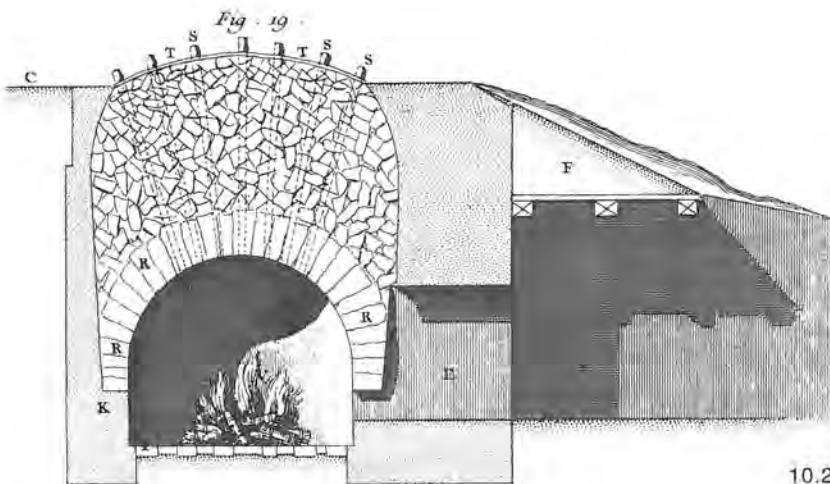
a) Localisation

Les fours à chaux sont implantés de préférence dans le flanc d'un talus, à proximité d'un affleurement de roche calcaire (éboulis, rochers) et du combustible (forêt, mine

23 Cop 1993; voir aussi Guex 1986, 49.



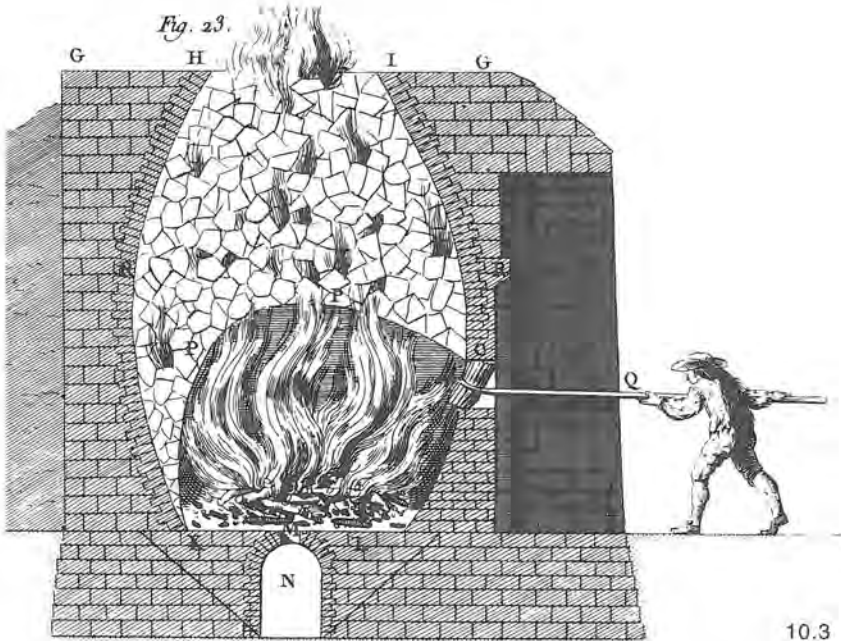
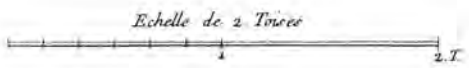
10.1



10.2

Légende fig. 10.1 et 10.2 d'après Fourcroy de Ramecourt 1766

- C Terre de terre
- E Gueule
- F Appentis
- I Foyer pavé de pierres dures
- K Banquette
- M/N/O Cintres de charpente sur poteaux chargés de fagots
- P Fagots en lits alternés
- R Fousoirs
- S Bûches dressées servant de cheminée
- T Enduit d'argile et paille



10.3

Légende fig. 10.3 d'après l'Encyclopédie, repris par Fourcroy de Ramecourt 1766

- C Galerie cintrée, gueule
- G Four ou tourelle
- K/L Atre
- M Trou
- N Ebraisoir
- H/I Plateforme
- P Voûte
- R Parement

Fig. 10: Four à chaux intermittent maçonné d'après la Description des arts et métiers. En haut et au milieu: four à chaux maçonné du XVIII^e siècle. Construction de la voûte sur cintre et échafaudage de bois; perches de bois servant d'évent et calotte recouverte d'une chape d'argile mêlée de paille. En bas: four à chaux décrit dans l'Encyclopédie. Chauffournier alimentant le foyer en fagots de bruyères par la gueule. D'après l'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert.

de houille). L'ensevelissement partiel du four constitue une bonne façon de l'isoler d'un point de vue thermique. Adam²⁴ signale deux manières de construire les parois d'un four à chaux: soit en dressant un manteau de moellons constitué de roches réfractaires liées à de l'argile, soit en utilisant des pierres diverses recouvertes d'un enduit argileux, parfois à base de débris céramiques. L'accessibilité du site joue un rôle non négligeable, dans la mesure où la chaux vive produite doit pouvoir être évacuée avec facilité vers son destinataire ou le lieu de stockage.

b) Fonctionnement

La construction du four terminée, on procède au préchauffage²⁵ très progressif de la chambre de chauffe durant une douzaine d'heures, afin d'éviter l'éclatement de la pierres qui pourrait provoquer l'écroulement de la voûte. Cette opération assèche le four et le terrain naturel encaissant. Au fur et à mesure que la chaleur monte dans le laboratoire, on accroît l'intensité du feu jusqu'à ce que l'ultime couche de pierres située au niveau du gueulard soit calcinée. L'opération de calcination peut durer jusqu'à une semaine et nécessite une présence permanente pour assurer l'alimentation du foyer et la surveillance de la cuisson. Lorsque la flamme est blanche et que les pierres supérieures sont de couleur rosée, la calcination est terminée. On obture alors la gueule, le foyer étouffe et on laisse refroidir le four durant deux jours environ. Ensuite, on démonte le caisson en bois qui retient le manteau argileux durci par la chaleur et on extrait les blocs de chaux vive. Cette opération se déroule par temps sec, afin d'éviter une hydratation intempestive de la chaux.

c) Combustible

Pour lancer le feu, on utilise du menu bois, des broussailles ou des fagots de branchages. Le feu soutenu est alimenté avec des bûches souvent de grandes dimensions (jusqu'à 2 m de long). On préfère un combustible qui donne une flamme longue, même s'il brûle rapidement. Il est aussi possible d'utiliser un combustible plus lent comme le charbon de bois ou la houille. La flamme est alors plus courte et on préfère charger le combustible et le calcaire en lits alternés. Mais cette pratique, qui ne semble pas attestée dans l'Antiquité, paraît mal adaptée dans la mesure où elle exige un tri après cuisson, afin de séparer cendres, pierres incomplètement calcinées et chaux vive²⁶. Dans l'arc jurassien, la cuisson à flammes courtes ne paraît pas attestée. Par contre, dans les régions riches en houille de France et du Royaume Uni, cette pratique s'impose rapidement au début du XIXe siècle.

La consommation de bois est élevée, on compte selon les fours et les régions entre 1,5 et 3 stères de bois sec par mètre cube de roche à calciner. Il n'est pas rare qu'on profite de l'opportunité d'un four à chaux pour brûler du vieux bois ou les rebuts d'une coupe. Dans les pays méditerranéens, les noyaux de fruits (pêches, prunes et autres olives), servent de combustible aux côtés des broussailles.

C. Fours industriels à production continue

Les grands fours industriels apparaissent vers la fin du XVIIIe siècle, mais leur généralisation en Europe ne semble intervenir que vers le milieu du XIXe siècle. Il s'agit d'installations fixes qui offrent le double avantage d'un rendement très élevé et d'un fonctionnement en continu.²⁷ Deux types principaux sont reconnaissables par la forme de leur cuve: les fours en puits et les fours coniques. Le four en puits a une forme qui rappelle le haut fourneau à fer; sa cuve est ovoïdale ou cylindrique²⁸ et son volume peut atteindre jusqu'à 130 m³. Le four conique se distingue par une cuve en forme de cône inversé, une taille réduite et un volume n'excédant guère 60 m³. Le combustible utilisé dans ces fours industriels varie: certains modèles fonctionnent au bois (grande flamme), d'autres au charbon de bois, voire à la houille (flamme courte). Dans ce dernier cas, le combustible est disposé en lits alternés avec le calcaire. Ces fours possèdent un système de grille à barres métalliques mobiles qui évite l'effondrement de la charge et permet le défournement de la chaux vive par une ouverture adaptée; le soutirage de la cendre s'effectue par une porte séparée (cendrier).

En Suisse, l'introduction des premiers fours en puits remonte, d'après F. Mangold²⁹, à la deuxième moitié du XIXe siècle. Leur généralisation ne deviendra effective que vers la fin du même siècle. La demande intérieure très forte, en raison notamment de la construction des différentes lignes ferroviaires, nécessitait des importations massives de matériaux et liants, que l'industrie helvétique n'était pas à même de produire en quantité suffisante. Dans la région qui nous intéresse, deux fabriques de chaux et de ciment furent construites au nord de Bienne, à Rondchâtel (1860), puis à Péry-Reuchenette (1890). La découverte du ciment Portland par I. Ch. Johnson³⁰ en 1844 et la fabrication de ciments artificiels, composés d'un mélange artificiel de marne et de calcaire dans des proportions définies, provoquèrent l'abandon définitif des fours à chaux périodiques traditionnels vers la fin du XIXe siècle, en raison surtout de coûts de fabrication trop élevés et de rendements insuffisants.

24 Adam 1995, 70.

25 Fourcroy de Ramecourt (1766, 13) parle de l'embrasement du four. Développement d'après Biston 1828, 39-40.

26 Biston 1828, 28-30; Adam 1995, 74.

27 Pour une typologie plus élaborée de fours industriels, voir le travail de B. Cretn 1992 (p. 215-218) et l'article de la Grande Encyclopédie 1885, tome 10, 990-993.

28 Cretn 1992, 212-213.

29 Mangold 1931, 21.

30 J. Aspdin inventa un liant qu'il baptisa «ciment de Portland» en raison de la couleur de la chaux obtenue, mais celui-ci n'a rien avoir avec le liant connu sous ce nom, qui lui est constitué d'un mélange de calcaire et de marne à haute teneur en silice.

D. Les chaux

La calcination et l'extinction d'un calcaire pur, contenant entre 0,1 et 1% d'argile, fournissent une chaux grasse. Quand la teneur en argile oscille entre 2 et 8%, le produit obtenu est une chaux maigre. Ces deux qualités de chaux sont dites aériennes car elles cristallisent, durcissent, à l'air libre. La calcination d'une roche qui contient entre 8 et 20% d'argile fournit une chaux hydraulique. Un mortier lié avec une chaux de cette qualité-là a la faculté de durcir, même en étant immergé. Les calcaires, dont la teneur en argile est supérieure à 20% demeurent inutilisables pour la fabrication de chaux.

E. Conditionnement et transport

La chaux vive peut être hydratée sur le lieu de fabrication, mais il reste plus aisé de la transporter sous forme solide dans des barriques de bois ou des sacs de toile épaisse; le maintien à l'abri des intempéries demeure primordial. Il est d'usage d'implanter les fours à proximité de chemins, afin de faciliter à la fois le transport des matériaux nécessaires à la calcination (pierres, terre argileuse et bois) et l'évacuation de la chaux vive produite. Au vu des volumes importants, nous devons envisager le transport par char au détriment de l'animal bâté.

Peu après la calcination, la carbonatation de la chaux – réabsorption du gaz carbonique contenu dans l'atmosphère – reprend; le matériau durcit. On a donc intérêt à procéder à son extinction dans des délais assez brefs. La chaux hydratée peut être conservée durant de nombreuses années, pour autant qu'elle soit entreposée dans des fosses étanches garantant d'une humidité constante. D'ailleurs nombreuses sont les fermes jurassiennes qui possèdent un creux de chaux recouvert de terre argileuse à proximité immédiate du bâtiment. On servait la chaux à l'occasion de petits travaux de maçonnerie ou plus souvent pour chauler les murs et séparations des étables. Dans ce dernier cas, sa causticité en faisant un désinfectant apprécié.

F. Usages

Les domaines d'application de la chaux sont très variés. Outre son utilisation traditionnelle dans le bâtiment, où elle entre dans la préparation de mortiers et d'enduits, la chaux sert aussi à la désinfection des étables par chaulage des murs.

Si dans l'industrie sidérurgique moderne on utilise de gravier calcaire comme fondant dans le haut fourneau, on se sert aussi de chaux pour la déphosphoration et désoxydation de la fonte dans le convertisseur. La chaux joue le rôle de concentrateur des impuretés lors du convertissage de la fonte en acier. Elle permet leur élimination sous forme d'une scorie liquide nommée «laitier»; on en utilise environ 60 à 70 kg par tonne d'acier produite.³¹

Dans l'industrie du verre le calcium est ajouté sous forme de carbonate (CaCO_3) ou d'oxyde (CaO); il sert de stabilisant au mélange et garantit une certaine insolubilité. L'industrie du verre, si florissante dans nos régions jurassiennes dès le XVII^e siècle, recourait encore au début du XX^e siècle à l'utilisation de castine³² ou de dolomie pour apporter cet élément carbonaté. L'évacuation du gaz carbonique contenu dans la roche provoquait également un brassage bénéfique du mélange vitreux. Toutefois, dans un passé récent, le calcaire fut peu à peu remplacé par la chaux (CaO), débarrassée de ses impuretés. La chaux permet d'obtenir des verres plus brillants, de meilleure couleur et plus stable. La principale difficulté réside dans la nécessité d'utiliser une chaux de qualité et de granulométrie régulière.³³

En tannerie, elle sert à l'élimination des poils et des restes de chair sur les peaux brutes avant leur tannage; en agriculture, la chaux permet de corriger l'acidité des sols.

2. Etat de la recherche

Les études qui traitent de la construction dans l'Antiquité, font toutes références aux textes de Caton.³⁴ Bien plus tard, dès l'époque des Lumières, les scientifiques portent de l'intérêt aux fours à chaux en exploitation dans les pays européens. Ils livrent de nombreux traités et descriptions qui distinguent les différents types de fours et vantent les mérites des uns et des autres. Au centre des débats: la consommation de bois et le temps de cuisson, que l'on tente de réduire par tous les moyens.

En 1766, Fourcroy de Ramecourt établit la première distinction entre les fours à flamme vive de ceux à – feu moins flambant –, soit à flamme courte, et livre d'intéressantes indications quant aux choix des bois, aux temps de cuisson et aux journées de travail nécessaires.

Le XIX^e siècle constitue un siècle charnière dans la mesure où l'on se tourne alors vers la fabrication industrielle de chaux. Les petits fours traditionnels se prêtent mal à l'innovation technique; l'avenir est aux grands fours fonctionnant en continu. En 1818, L. Vicat livre la première étude scientifique des chaux et mortiers. L'intérêt porté aux chaux hydrauliques et aux ciments artificiels croît rapidement. En 1825, J.-H. Hassenfratz publie un traité de calcination et de fabrication de mortiers. Dans son Manuel du chauxfournier paru en 1828, V. Biston discute les avantages et désavantages des différents combustibles, ainsi que les caractéristiques des mortiers. Il détaille également les questions de productivité des différents types de fours.

31 Claude 1990, 35–38.

32 Gravier calcaire. Nous avons retrouvé plusieurs contrats entre la verrerie de Moutier et la bourgeoisie du même lieu, réglant l'exploitation d'une carrière de castine dans les gorges de Court (Archives de la Commune bourgeoise de Moutier; section IV, casier 4, dossier 35).

33 Claude 1990, 64.

34 Caton: De agricultura.

Ces ouvrages fourmillent de précieuses informations utiles aux chercheurs, notamment quant à la manière de construire les fours, d'entretenir leur feu et de produire de la chaux à bon compte. Quant aux publications archéologiques de fours à chaux romains, elles demeurent assez dispersées ou difficiles à réunir, mais deviennent plus régulières depuis quelques années. On signalera la courte, mais remarquable, publication des fours d'Iversheim (Rhénanie-Palatinat) par W. Sölter et celle de F. Suméra sur les fours de Brétinoust (Seine-et-Marne).³⁵ J.-P. Adam et P. Varène³⁶ ont le mérite d'avoir tenté une approche comparative entre des fours à chaux encore en activité dans le Bassin méditerranéen et les descriptions des auteurs latins. Adam a encore publié une incontournable *Construction romaine*, dont le chapitre consacré à la chaux et aux mortiers livre une excellente synthèse du four à chaux de l'époque romaine à nos jours.

Pour le Moyen Age et l'époque moderne, nous sommes moins bien lotis. Dans sa synthèse sur les fours à chaux du Royaume-Uni, Williams³⁷ décrit quelques fours médiévaux. Il convient de mentionner les travaux de B. Crenn³⁸ sur l'évolution du four à chaux traditionnel à caractère rural aux grands fours industriels du XIXe siècle en France.

En Suisse, l'intérêt pour les fours à chaux demeure assez marginal et varie selon les régions. Th. Bitterli s'est attelé à un travail académique d'inventaire et d'analyses de différents types de fours à chaux, particulièrement en Suisse centrale et dans les Grisons³⁹; son étude et ses conclusions sont fort attendues.

Les récentes découvertes de chauffours romains, médiévaux et modernes dans les cantons de Berne, du Valais

(Paccolat/Taillard 2001), de Neuchâtel et Vaud relancent l'intérêt des chercheurs pour ce sujet particulier. Dans un avenir proche, il devrait être possible de dresser un catalogue typologique comparatif des chauffours, mettant en évidence des variations peut-être régionales. Bien que la recherche suisse sur le sujet soit récente, il semble que dans la famille des fours à chaux périodiques, seul ceux à flammes longues soient pour l'heure attestés en Suisse, à tout le moins sont-ils dominants.

Enfin, il convient de rappeler l'excellente étude de Reusche⁴⁰ relative aux techniques de construction et au fonctionnement de fours à chaux modernes des pays balkaniques et de Grèce.

Quelques expérimentations à caractère plus ou moins archéologiques se sont déroulées dans d'anciens fours à chaux remis en état: Stölter a reconstruit un des fours d'Iversheim après l'avoir soigneusement analysé et a pu produire de la chaux avec succès. Les expériences qui se sont déroulées dans les Grisons à Valchava (1982: réussite et 1998: échec) et en Valais (Bramois 1999) montrent à l'évidence qu'il n'est pas toujours aisé de retrouver les gestes des chauffourniers d'antan.

35 Sölter 1970; Suméra 1997.

36 Adam et Varène 1982.

37 Williams 1989.

38 Crenn 1992.

39 Grisons: Vital 1984; Valais: Soom 1985; Uri: Bitterli 1990.

40 Reusche 1977.

Partie 1: Moutier - Combe Tenon 1997

I. Présentation du site et déroulement des travaux

La ville de Moutier (fig. 2 et 11) se développe à la jonction de deux vallons, le Petit-Val et le Cornet, entre les cluses de Court et de Moutier. Bordée au nord et au sud par les anticlinaux de Raimeux et de Graiteray, elle s'étend sur des terrains alluviaux en fond de vallée (Birse) et sur des éboulis quaternaires recouvrant des formations de molasse d'eau douce.

Le site de la Combe Tenon, découvert à la faveur d'une prospection pédestre en automne 1996, se trouve au sud-ouest de la ville, à la sortie des Gorges de Court, dans les éboulis calcaires (Kimméridgien) couvrant le pied nord-est du Graiteray. Ce sont les blocs de ces éboulis qui ont été exploités pour la fabrication de la chaux.

Au terme des travaux de fouille⁴¹, neuf fours à chaux ont été repérés sur une bande de terrain de 300 m par 60 m environ, dans le secteur du futur portail nord du tunnel de Graiteray. Six fours ont fait l'objet d'une fouille partielle ou totale et deux sont restés intouchés, car situés à l'extérieur de l'emprise du chantier (fig. 12-14). Un neuvième four a été repéré lors des travaux de terrassement de la galerie de Graiteray, mais seule sa position put être relevée.

Deux autres fours ont encore été localisés au pied de la Forêt Communale de l'Envers (de Graiteray) à 700 respectivement 1000 m du site principal. D'autres fours existent certainement encore au pied de cette montagne qui paraît avoir été exploitée de manière assez intense.

La documentation établie lors de la fouille comprend 24 plans dessinés au 1:20e (planimétries, stratigraphies) et 117 clichés photographiques. Pour chaque four cela représente en général deux relevés de niveaux et deux coupes stratigraphiques, transversale et longitudinale.

La topographie et la nature du terrain paraissent avoir joué un rôle capital dans l'implantation des fours. Ainsi, les fours 1 à 3, 5, 6 et 8 sont-ils localisés au pied d'une langue d'éboulis à la granulométrie particulièrement avantageuse de 10 à 25 cm d'arête en moyenne. Les plus gros blocs (50 cm



Fig. 11: Moutier - Combe Tenon: emplacement de la fouille (1), autres fours à chaux localisés à proximité (2 et 3). PK25, © 1996.



Fig. 12: Moutier - Combe Tenon 1997. Vue partielle en direction du nord après déboisement. Au centre, on devine la présence des fours 5, 6 et 8.

⁴¹ La fouille se déroula d'avril à novembre 1997 sous la direction de Christophe Gerber et Christian Kündig, avec la collaboration de Pierre Eichenberger, Dominique Monnot, Marc Müller et Martin Portmann. Nous tenons à les remercier cordialement pour leur engagement constant malgré des conditions météorologiques souvent plus qu'hivernales!

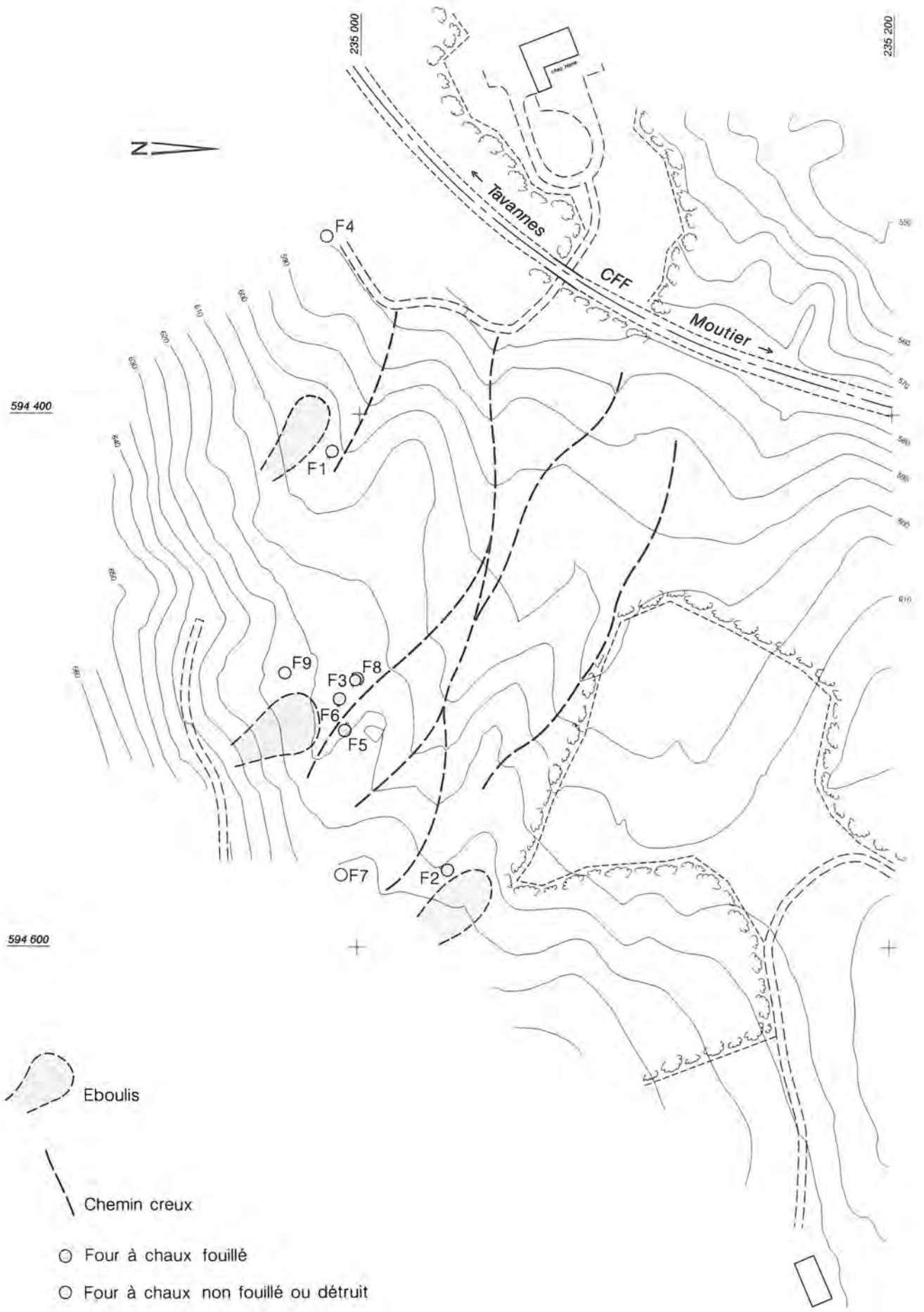


Fig. 13: Moutier - Combe Tenon 1997. Plan de situation du secteur étudié, où figurent le réseau de chemins naturels, les fours à chaux et les cônes d'éboulis calcaires exploités. Echelle 1:2000.



Fig. 14: Moutier - Combe Tenon 1997. En fin de fouille, les fours 5 (premier plan), 6 et 8 (dernier plan) apparaissent pratiquement alignés. Vue vers le sud-ouest.



Fig. 15: Moutier - Combe Tenon 1997. Le four 1 en cours de dégagement. La gueule se situe à droite, au pied de la souche. Vue vers le nord.

ou plus) servaient à l'édification de la voûte et du manteau extérieur, alors que les cailloux plus petits étaient destinés à la calcination. La taille des pierres utilisées pour la charge diminue à mesure que l'on s'éloigne du foyer, du bas vers le haut et du centre vers les bords du laboratoire.

II. Les fours à chaux

Les données recueillies sur le terrain permettent de grouper les fours découverts en deux variantes principales (fig. 29):

- Variante 1: les fours de surface caractérisés par une voûte reposant sur une banquette, une chambre de chauffe creusée peu profondément dans le terrain, l'absence de maçonnerie particulière et un laboratoire très développé au-dessus du sol, maintenu par un boisage.
- Variante 2: les fours semi-enterrés ayant une voûte appuyant sur le fond du four (sole), une chambre de chauffe à fond plat délimitée par une maçonnerie à sec et un laboratoire assez développé partiellement enterré.

1. Fours de surface 1-3 et 5

Les quatre fours (1, 2, 3 et 5) de la Variante 1 présentent de nombreuses similitudes tant au niveau du mode de construction qu'au niveau des dimensions (fig. 29). Ils sont de facture simple, puisque la chambre de chauffe est légèrement creusée dans le terrain naturel graveleux encaissant (fours 1 et 2), voire dans le remblais d'un four antérieur (four 3). Leur fond est légèrement concave. Le four 5 offre un cas particulier, un peu hybride, dans la mesure où il est

partiellement creusé dans un talus, le matériau excavé ayant servi à la confection de sa partie frontale.

A. Banquette

Un décrochement au sommet de la paroi de la chambre marque l'emplacement de l'appui de la voûte. Il s'agit d'une sorte de banquette qui conserve encore la première assise de blocs. Les blocs de calcaire disposés en rangs serrés forment un cercle parfois ovoïdal de 300 à 350 cm de diamètre intérieur (fig. 15 et 16). Cette première assise pouvait reposer directement sur l'humus, quand le terrain s'y prêtait. Une faible excavation pour placer ce premier anneau de pierres reste également envisageable. Une ouverture, la gueule, interrompt l'anneau de pierres et constitue l'accès au foyer (fig. 17 et 18).

B. Chambre de chauffe

Par chambre de chauffe on entend l'espace fermé compris entre la sole et la voûte. Elle est ouverte sur l'extérieur par une gueule qui permet d'alimenter le foyer en combustible et oxygène. Dans les fours de la Variante 1, le volume intérieur varie d'une construction à l'autre, mais se situe entre 5 et 14 m³, selon les reconstitutions proposées.

C. Voûte

Seule la première assise marquant le départ de la voûte est conservée. Les traces des cintres de bois ou de l'échafaudage intérieur manquent aussi.



Fig. 16: Moutier - Combe Tenon 1997. Vue du four 2 après évacuation des remblais. On devine la dalle horizontale et les vestiges des deux montants de la gueule. Vue vers le sud.

Il convient de noter qu'à l'arrière de cet anneau de pierres, le terrain naturel se poursuit de manière oblique, selon un angle de 45° environ. Cet évasement constitue en fait un appui pour le manteau argileux dont nous reparlerons plus loin.



Fig. 17: Moutier - Combe Tenon 1997. Vue verticale du four à chaux 5 après vidange partielle des remblais; le foyer (au centre) est bien visible, alors que dans l'angle supérieur droit, on distingue les gros blocs qui délimitent la gueule.



Fig. 18: Moutier - Combe Tenon 1997. Détail de la gueule du four 3: au premier plan, l'aire de chauffe qui facilite l'accès à la gueule; à l'arrière-plan, la paroi de la chambre de calcination. Vue vers l'ouest.

D. Gueule

A Moutier, cette ouverture n'était jamais conservée dans sa totalité. Il demeure dès lors difficile d'en restituer l'aspect. Toutefois, la forme quadrangulaire semble s'imposer. Elle est toujours aménagée de manière massive. En général, seuls la dalle de fond de 10 à 20 cm d'épaisseur et les montants latéraux grossièrement équarris, sont conservés. Les montants supportaient, tels des piliers, un épais linteau de pierre horizontal. En moyenne, la gueule mesure 40 cm de large pour 60 à 100 cm de profondeur. Quant à sa hauteur, on peut l'estimer à 60 cm, bien que la partie supérieure ne soit jamais conservée⁴².

Sa face extérieure, orientée vers la fosse, est renforcée par quelques blocs calcaires liés avec un peu de terre ou d'argile (fig. 18). On obtenait ainsi une solide porte à même de reprendre les forces de la charge reposant sur la voûte et de résister aux violents écarts de températures entre l'intérieur et l'extérieur du four. Le combustible était enfourné par cette ouverture qui servait aussi au réglage du tirage. Les éléments de la gueule, très sollicités par le feu et la chaleur dégagée devaient certainement être inspectés après chaque calcination, et parfois remplacés.

E. Laboratoire

Les vestiges du laboratoire sont inexistants, puisque celui-ci se développait au-dessus du sol environnant et qu'il est nécessaire de le démanteler lors de l'extraction de la chaux

42 A. Dubois signale une ouverture de 40 cm par 60 cm (1920, 37).



Fig. 19: Moutier - Combe Tenon 1997. Vue d'ensemble du four à chaux 3 et de son aire de chauffe ovale, creusée dans le terrain naturel, prise en direction de l'ouest.

vive. La hauteur et le volume de la charge calcaire restent donc difficiles à estimer. Nous tenterons quelques projections dans le chapitre traitant de la reconstitution (ci-après, chap. 6).

F. Manteau

La confrontation des plans lors de l'élaboration des données a révélé un phénomène récurrent que nous n'avions pas observé directement lors de la fouille. La démolition rubéfiée (manteau) s'arrêtait nette et délimitait un polygone aux angles bien marqués. Il s'agissait en fait de la limite d'un caisson qui maintenait en place la couche de terre argileuse qui recouvrait la charge calcaire. Le négatif de ce caisson a pu être mis en évidence pour les fours 1, 2 et 3.

G. Aire de chauffe et structures connexes

Les trois fours concernés possèdent une fosse de travail généralement dénommée aire de chauffe dans la littérature spécialisée (fig. 19, 20 et 23), dont l'altitude relative correspond grosso modo à celle du foyer. Sa profondeur diminue à mesure que l'on s'éloigne du four. L'aire de chauffe du four 1 est particulièrement grande (fig. 20), puisqu'elle mesure au minimum 3 m de large pour 2 m de longueur. Elle présente plusieurs structures (fig. 21): un petit foyer, un alignement de pierres placées en demi-cercle (banc?), une fosse contenant le squelette d'un chien (fig. 22), auquel il manquait les pattes avant⁴³, et un trou de poteau isolé.



Fig. 20: Moutier - Combe Tenon 1997. Cette vue générale du four à chaux 1 met en évidence les structures particulières découvertes lors de la fouille: l'aire de chauffe ovale, l'empierrement en arc de cercle (banc?), la petite fosse qui contenait le squelette d'un chien, enfin un petit foyer (tache sombre) situé à main gauche de la gueule. Vue vers le nord-ouest.

L'aire de chauffe du four 5 est piriforme. Un solide empierrement, formant une sorte de banquette à la fonction énigmatique, occupe sa partie méridionale (fig. 23). Quant aux aires des fours 2 et 3, elles sont plus petites et de forme ovale.

43 M. Nussbaumer du Musée d'histoire naturelle à Berne en a fait la détermination.



Fig. 21: Moutier - Combe Tenon 1997. Les différentes structures associées aménagées au sein de l'aire de chauffe du four 1. Vue vers l'ouest.



Fig. 22: Moutier - Combe Tenon 1997. Détail du squelette du chien enseveli près du four 1.

En définitive, l'avantage de ce type de four réside dans l'excavation limitée qu'il requiert. La cuisson terminée, il est également aisé d'en extraire la chaux vive produite, puisqu'elle apparaît à hauteur d'homme. Ces fours de construction relativement simple n'ont servi qu'à quel-



Fig. 23: Moutier - Combe Tenon 1997. Four 5: aire de chauffe piriforme et empiérement latéral. Vue vers le sud-est.

ques reprises, car les blocs constituant la base de la voûte supporteraient difficilement plusieurs cuissons. A notre avis, ils ont fonctionné une ou deux fois, ce que tendent à confirmer les restes de manteau argileux, peu abondants, qui jonchent leur pourtour.

2. Fours semi-enterrés 6 et 8

La deuxième variante de four représentée sur le site de Combe Tenon est celle des fours semi-enterrés (fig. 29). Ils sont creusés plus profondément et nécessitent d'être partiellement maçonnés (soutènement). Le four 8 constitue l'exemple-type de cette variante. Profondément enterré dans le terrain naturel graveleux, sa construction s'avère particulièrement soignée (fig. 25–27).

Toutefois, les deux représentants rencontrés à la Combe Tenon (fours 6 et 8) se distinguent en plusieurs points: la profondeur de la chambre de chauffe qui varie du simple au double pour un diamètre proche, l'emplacement de la gueule, l'existence d'une aire de chauffe dans un cas seulement. Tous deux ont une section supérieure ovale, un fond à peu près plat, dont la surface grisâtre est constituée d'un mélange de chaux et de cendres durcies. Cette fermeture de la base du foyer s'explique sans doute par une exposition prolongée à l'air libre après vidange de la chaux calcinée; exposés à l'air, les résidus se sont ensuite naturellement hydratés, puis ont séché.

Une aire de chauffe donnait peut-être accès au four 8, mais les indices insuffisants n'autorisent aucune restitution. Le four 6 ne présente pas d'aire de chauffe. Les fours 6 et 8 sont munis d'un mur de soutènement plus ou moins circulaire en moellons et blocs calcaires qui délimite la chambre de chauffe et en partie le laboratoire (fig. 25 et 28).

A. Chambre de chauffe

Elle ne diffère pas fondamentalement de celle des fours de la première variante vus précédemment. Mais la profondeur de la fosse et la qualité très friable du sous-sol ont nécessité par deux fois la construction d'un mur de soutènement de forme tronconique (fig. 29).

La chambre de chauffe, dont la base est circulaire ou ovale, atteint 270 cm (four 8), respectivement 280 à 360 cm (four 6) de diamètre. Dans la partie supérieure, la section du four forme un ovale, dont le diamètre mesure 300 à 320 cm par 400 cm. La chambre de chauffe du four 8 était de grande taille, car la gueule située entre 160 et 185 cm au-dessus du fond, ce qui nécessitait un retour de voûte élevé. On peut estimer le volume de cette chambre à 8 m³ pour le four 6 et à près de 10 m³ pour le four 8.⁴⁴

⁴⁴ Dans les fours balkaniques étudiés par Reusche 1977 (149, note 54), la chambre de chauffe représente le tiers du volume total du four. Nos reconstitutions paraissent confirmer ce chiffre.



Fig. 24: Moutier - Combe Tenon 1997. En cours de fouille, il s'avéra que le four à chaux 3 avait été aménagé dans un remblai comblant un four antérieur (four 8). Vue vers le sud-est.



Fig. 27: Moutier - Combe Tenon 1997. Détail de la maçonnerie à sec du four à chaux 8. On notera la régularité des assises. Vue vers le sud.



Fig. 25: Moutier - Combe Tenon 1997. Après extraction de la totalité du remblai, apparut une construction soigneusement maçonnée à sec: le four 8. Vue vers l'est.

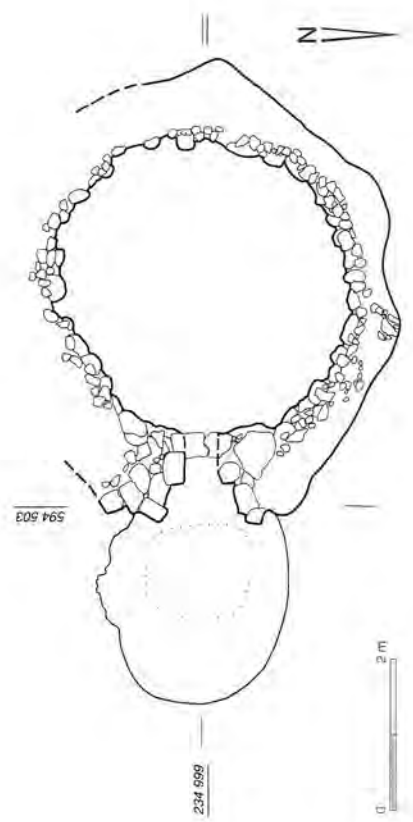
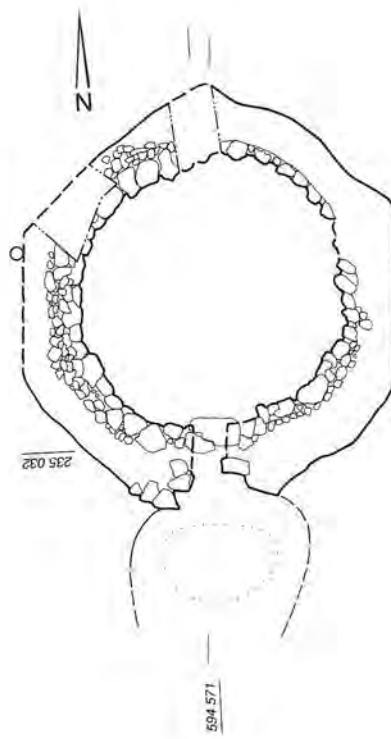
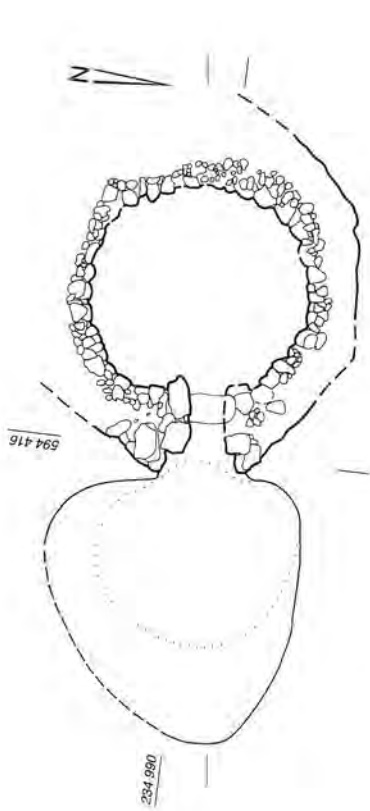
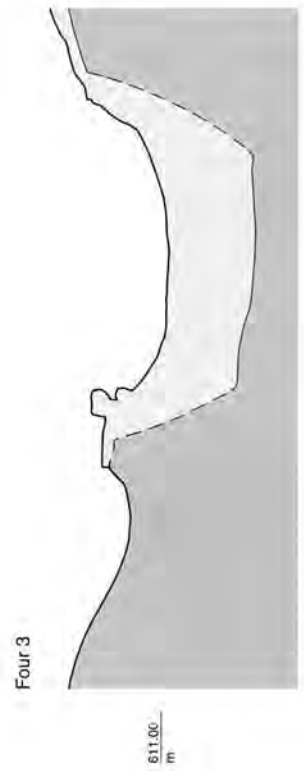


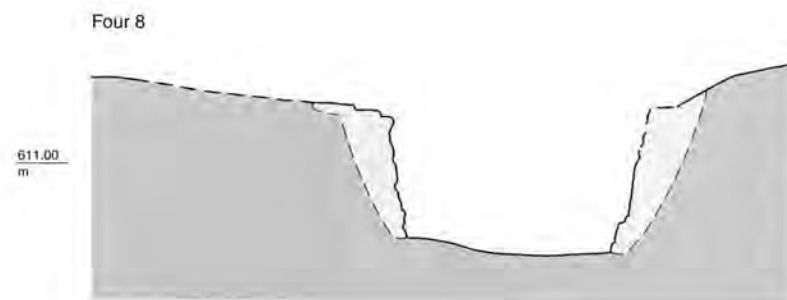
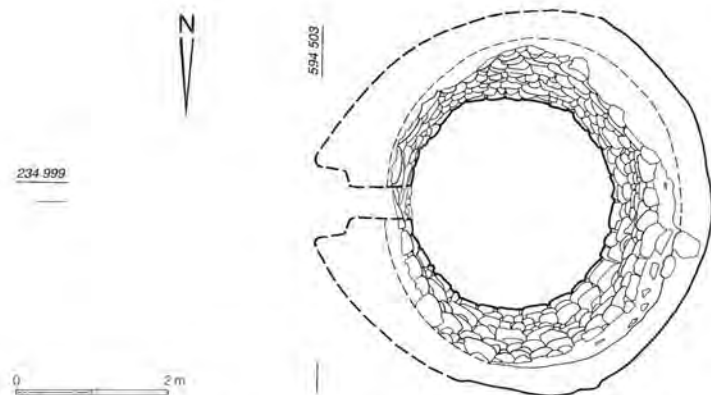
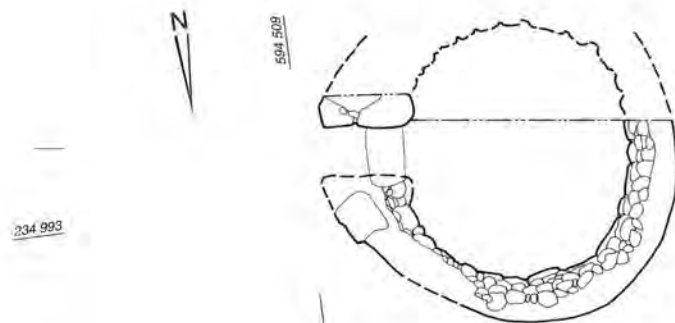
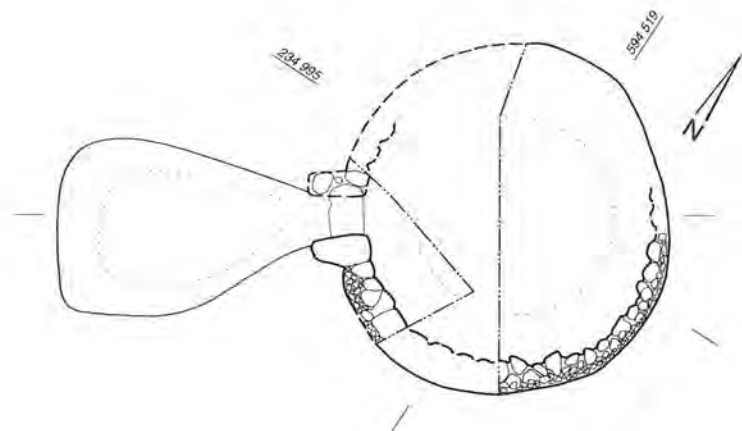
Fig. 28: Moutier - Combe Tenon 1997. Four à chaux 6 en cours de dégagement; une partie des blocs éboulés se trouvent encore sur la sole. Dans l'angle supérieur gauche de l'image, on distingue les gros blocs qui forment la gueule. La stratigraphie montre l'homogénéité du remblai. Vue vers le sud.



Fig. 26: Moutier - Combe Tenon 1997. Autre vue du four 8 avec à l'arrière-plan l'aire de chauffe du four 3. Vue vers l'est.

VARIANTE 1





VARIANTE 2

0 2 m

Fig. 29: Moutier - Combe Tenon 1997. Tableau comparatif des six fours à chaux fouillés, classés en deux variantes: les fours de surface (variante 1) et les fours semi-enterrés maçonnés (variante 2). Trame claire: vestiges du four, trame foncée: terrain naturel. Echelle 1:100.

B. Voûte

Contrairement aux fours de surface, la voûte ne repose pas ici sur une banquette, mais directement sur le fond, voire sur un léger ressaut de maçonnerie (première assise). La réalisation d'une voûte en coupole, partiellement en berceau, sur piliers verticaux est à envisager. Celle-ci devait être en retrait d'une trentaine de centimètres par rapport au mur sec.

C. Gueule

La forme et la taille de la gueule de ces deux fours ne différaient vraisemblablement pas: dalle calcaire massive, horizontale, surmontée de deux épais montants (fig. 30) sur lesquels reposait un linteau. Par contre, le niveau d'implantation de la gueule est sensiblement plus haut: 120 cm (four 6) contre 50 cm en moyenne pour les fours de surface (variante 1). Une incertitude demeure quant à l'emplacement de la gueule du four 8, qui a fait l'objet d'une réutilisation postérieure après remblayage (four 3). Mais l'analyse de la maçonnerie du four 8, conservé dans sa quasi totalité, montre clairement que la base de la gueule devait se situer entre 160 et 185 cm, soit approximativement à l'altitude qu'occupait l'ouverture du four 3. Un emplacement différent paraît peu probable au vu des observations archéologiques. Aussi pensons-nous que la gueule des fours 8, puis 3, se situait au même endroit.



Fig. 30: Moutier - Combe Tenon 1997. Détail de la gueule du four à chaux 6. Vue vers l'est.

D. Laboratoire

Dans les fours semi-enterrés, la charge calcaire repose également sur la voûte, mais elle dépasse moins du sol, ce qui a l'avantage de réduire la quantité de matériau argileux nécessaire à la confection du manteau d'isolation. Nous pensons que la charge des fours 6 et 8 devait dépasser d'à peine 2 m environ le sol environnant. Le volume estimé de la charge de chacun des fours devait atteindre 15 m³ pour le four 6 et 14 à 20 m³, voire encore plus selon les modèles de reconstitution, pour le four 8.

E. Manteau

Pour les fours de ce type, nous n'avons pu déterminer comment la charge était enveloppée et le manteau argileux retenu. Mais, la faible quantité de matériau rubéfié découverte autour du four 8 suppose une élévation hors du sol moins haute que dans le cas des fours de surface étudiés précédemment. Comme dans les fours de la Variante 1, le manteau prend appui sur une assise de terrain oblique à 45° environ qui prend ici naissance immédiatement derrière l'ultime assise de la maçonnerie.

Il est à noter que la profondeur du four 8 permettait de cuire une quantité de calcaire intéressante sans qu'il soit nécessaire de dresser un énorme dôme de pierres.

Le cas du four 6 paraît toutefois un peu différent. Sa profondeur réduite par rapport au four 8 et l'abondance de matériaux rubéfiés découverts autour du four suggèrent l'existence d'un manteau argileux relativement important, à moins qu'il s'agisse d'une accumulation de matériaux issus de calcinations successives. En outre, nous avons remarqué qu'à son abandon, le four fut remblayé avec un important volume de matériaux argileux rubéfiés (environ 8 m³) issus vraisemblablement du manteau isolant de ce même four.

Les fours de la Variante 2 paraissent construits de manière plus solide, au prix parfois d'une excavation exceptionnelle (près de 20 m³ pour le four 8). Le soin de leur exécution ne laisse pas de doute quant à une utilisation répétée. Le four 8 par exemple fut utilisé à trois reprises au moins, comme en témoigne l'alternance de strates de cendres et de chaux.

Il semble en outre qu'ils soient contemporains des chaux-fours de la Variante 1.

3. Structures annexes

Outre les vestiges connexes déjà mentionnés et brièvement décrits, la fouille a encore mis en évidence quelques éléments en creux plus difficiles à interpréter. Ainsi, entre les fours 5 et 6, a-t-on découvert les restes d'une cabane (?), des trous de poteaux et de piquets et un négatif de sablière (?).

La fouille a montré qu'à la suite de son remblayage, le four 6 restait encore perceptible sous la forme d'une légère dépression bordée de quelques blocs calcaires appartenant à la gueule dudit four. La surface du remblai paraissait comprimée, à la manière d'un niveau de circulation, et un grand pot tripode en terre cuite (fig. 32, 1) brisé in situ y fut retrouvé, confortant l'idée d'un sol foulé, peut-être celui d'une cabane. Malheureusement, aucune structure sûre n'atteste l'existence d'un tel abri. La mise en relation de deux gros trous de poteaux de 40 cm de diamètre, distants de 320 cm et des restes d'une sablière de 400 cm environ découverts dans la zone séparant les fours 5 et 6 avec notre construction reste incertaine (fig. 31). D'un strict point de vue chronologique, ces structures sont postérieures au four 6.

Les trous de poteaux sont disposés de part et d'autre d'une tache de chaux bien délimitée et bordée de quelques gros blocs calcaires. Il s'agit peut-être d'un secteur couvert destiné à entreposer de manière temporaire la chaux extraite avant son chargement définitif? La question reste posée.

4. Catalogue des objets et datations

La datation de ces quatre fours demeure imprécise. Des tessons de céramique de la fin du XVIIIe respectivement



Fig. 31: Moutier - Combe Tenon 1997. Entre les fours 5 et 3 un ancien sol est apparu après le décapage mécanique. Au premier plan, des blocs apparemment disposés par la main de l'homme matérialisent quelque structure énigmatique, alors qu'on remarque à proximité de grands trous de poteaux et la trace en creux d'une sablière (?) ou d'un petit fossé. Au-delà de ce dernier, on distingue déjà les premiers blocs de la gueule du four 6. Vue vers l'ouest.

du XIXe siècle (fig. 32 et 33) découverts dans le remplissage des fours 1 et 3, fournissent une indication chronologique quant à l'abandon de ces structures.⁴⁵ On peut admettre que le remblayage suit de près l'extraction de la dernière cuisson, afin d'empêcher toute réutilisation du four par une tierce personne.

Par ailleurs, la chronologie relative indique que le four 5 est postérieur au four 6, dont le sommet du remplissage a livré un grand pot à cuire fragmenté (fig. 32,1) datant de la fin du XVIIIe siècle. Ainsi, il ressort que sur notre site, aucune distinction chronologique entre les deux variantes décrites ne peut être établie. Les fours à chaux s'échelonnent sur deux ou trois siècles.

Devant la faible quantité de matériel récolté durant les fouilles, seule une présentation succincte des trouvailles est possible. La céramique moderne demeure relativement mal connue dans la mesure où elle est peu publiée. Toutefois, la typologie générale qu'elle soit suisse, franc-comtoise ou même alsacienne permet de classer avec plus ou moins de précision les différentes formes (assiettes, plats, pots à cuire). Par contre, l'identification de faciès régionaux demeure impossible dans l'état actuel de la recherche. On connaît l'existence de plusieurs ateliers de potiers dans la région de Moutier au XVIIIe, XVIIIe et XIXe siècles (Crémines, Moutier, Court), mais leur production reste absolument méconnue pour l'heure. La fouille et l'étude de dépotoirs d'ateliers et la découverte de nouveaux complexes en milieux villageois et urbain permettront de préciser les questions de production et de diffusion des céramiques locales.

Quelques éléments offrent donc un terminus post quem pour l'abandon et le remplissage des fours 1, 3 et 6. Le remblayage des fours 1 et 6 se situe au plus tôt à la fin du XVIIIe siècle, alors que le four 3 remonte à la deuxième moitié du XIXe siècle.

Figure 32

1. Grand pot à cuire tripode. Pâte beige rose feuilletée, à dégraissant sableux moyen contenant quelques inclusions calcaires. Glaçure intérieure brune à reflets verdâtres; surface extérieure grise, lissée. Pot à épaulement muni de deux anses; bord profilé de trois côtes. Fond plat. Diamètre: 23 cm à l'ouverture et 18,5 cm au pied; hauteur conservée sans pied: 24,5 cm. Provient d'un ancien niveau de sol (fond de cabane?) sur la partie supérieure du remplissage du four 6 (pos. 529). N° inv. 53269. Comparaisons: Keller 1999, pl. 116-117 (1ère moitié XVIIIe s.); Expts 1995, 145-146, 8 et 152, 6 (Montbéliard, XVIIIe s.); Grandval - Ferme du Banneret Wisard, fouille 1996, fosse 16, non publié (XVIIIe s.). Datation: fin XVIIIe siècle?

2. Plat creux à fond plat et paroi oblique, légèrement convexe, terminé par une lèvre verticale, épaissie, soulignée de deux cannelures. Pâte orange, homogène, finement dégraissée, avec de rares inclusions calcaires; surface rugueuse, peu brillante; glaçure intérieure brun clair sur décor à la barbotine blanche et vert d'eau. Diamètre: 320 mm, hauteur: 67 mm. Provient du remplissage du four 1 (pos. 102). N° inv. 53254-1 à 6. Comparaisons: Ex-pots 1995, 148, 17; op. cit. 148, 17 (forme proche à Montbéliard et Belfort), Frascoli 1997, cat. n° 421 (bord proche à Winterthur, fin XVIIIe s.). Datation: fin XVIIIe siècle. (Suite p. 40)

⁴⁵ Je remercie Eva Roth Heege pour la relecture du catalogue.

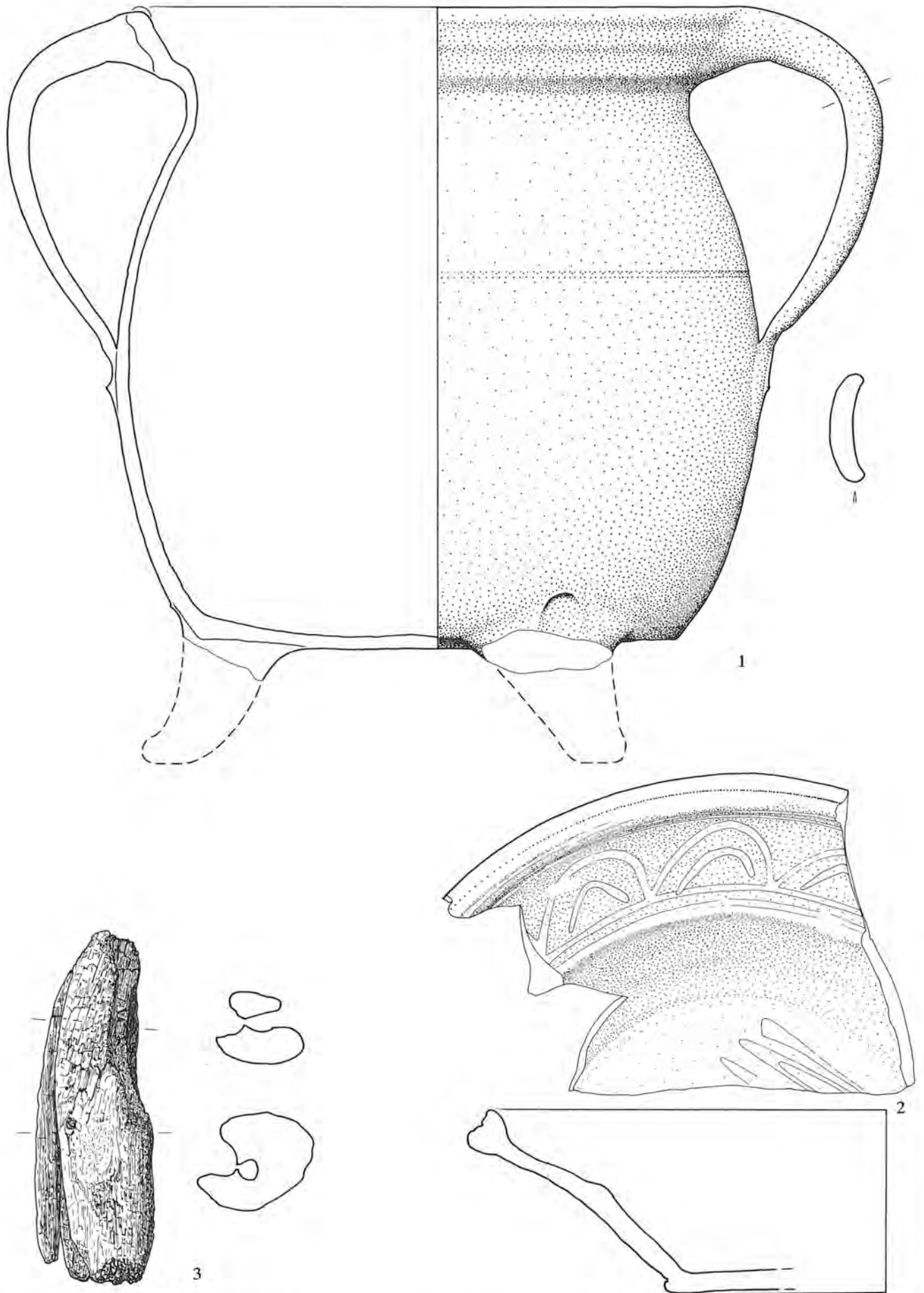
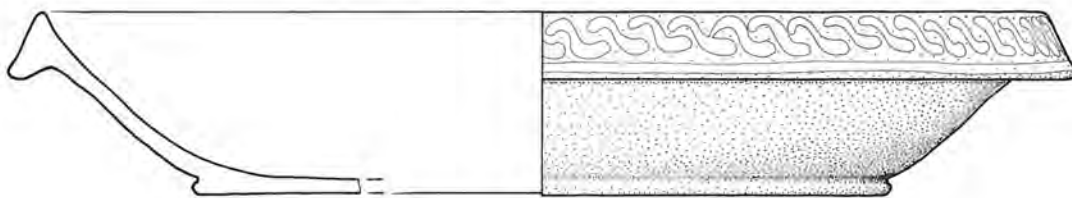


Fig. 32: Moutier - Combe Tenon 1997. Matériel provenant du remplissage du four 6 (nos 1 et 3) et du four 1 (no 2). Echelle 1:2. Légende page 37 et 40.



1



2

Fig. 33: Moutier - Combe Tenon 1997. Matériel provenant du niveau d'abandon du four 3. Echelle 1:2. Légende page 40.

3. Objet en bois de forme allongée comportant, sur un des petits côtés, une profonde entaille, arrondie en son fond; les extrémités sont refendues dans le prolongement de l'entaille. Hauteur maximale: 137 mm, largeur maximale: 46 mm, épaisseur: 37 mm; entaille: largeur maximale 6 mm. Fonction: élément de fixation ou de serrage pour corde ou cordelette (tendeur?). Provient de la partie supérieure du remplissage du four 5 (pos. 500). N° inv. 53271. Datation: indéterminée.

(non figuré) Pied annulaire d'un bol en porcelaine. Surface brillante. Diamètre du pied: 100 mm. Provient d'un ancien niveau de sol situé sur la partie supérieure du remplissage du four 6 (pos. 529). N° inv. 53270-1. Datation: fin XVIIIe-XIXe siècle?

Figure 33

1. Plat ou assiette à paroi concave et lèvre triangulaire en collerette (Kragenrand) repliée vers l'extérieur. Pâte orange fine, dure; surface lisse et brillante; glaçure intérieure et extérieure brun clair sur engobe brun; décor à la barbotine sur la lèvre et à l'intérieur du récipient: blanc, jaune et noir. Diamètre: 300 mm, hauteur: 50 mm. Provient du remplissage du four 3 (pos. 301). N° inv. 53255-1. Comparaison: ACBE 2B, 465, fig. 20 (Wiedlisbach - Städtli 7, milieu XVIIIe-début XIXe siècle); ACBE 4B, 227, fig. 24, 2 (Buchholterberg - Heimeschwand: début XXe s). Atelier de Heimberg BE? Datation: fin XIXe siècle.

2. Applique en tôle? ornée de trois files de grènetis. Trou de fixation. Il pourrait s'agir d'une applique fixée sur une canne de marche. Provient du muret bordant l'aire de chauffe du four 3 (pos. 313). N° inv. 53291. Datation: XIXe siècle?

5. Les fours à chaux de Moutier en comparaison de quelques fours du pied du Jura (Court, Ligerz et Attiswil)

Nous l'avons vu, tous les fours ne possèdent pas exactement les mêmes caractéristiques, puisque celles-ci dépendent de nombreux facteurs: la topographie, les matériaux à disposition, le volume à calciner, le combustible à disposition et sans doute les connaissances et l'expérience du chauffournier. Quelques variantes régionales méritent d'être mentionnées dans le cadre de cette étude. Trois fouilles récentes ayant révélé des fours d'époques différentes ont retenus notre attention, à Court, non loin de Moutier, à Ligerz, au bord du lac de Biemme et à Attiswil, au pied du Weissenstein (flanc sud de la chaîne jurassienne).

A. Court - Pâturage aux Bœufs 1998

Le four étudié en 1998 dans le Pâturage aux Bœufs à Court⁴⁶ (emprise A16; chemin de Graiteray) se rattache à la Variante 1 (fours de surface). Néanmoins, deux particularités le distinguent des autres fours analysés dans le secteur. D'une part, on a pu mettre en évidence des vestiges d'un clayonnage de bois retenu par une série de pieux disposés tous les 70 cm, autour du manteau argileux (fig. 35, 1). La gueule présente une autre originalité, dans la mesure où elle était renforcée par deux gros poteaux placés derrière les montants de la gueule (fig. 34), dont il ne reste que les trous d'implantation. L'utilisation de bois dans ce secteur particulièrement exposé au rayonnement calorifique paraît assez mal adaptée. On signalera pour information qu'à Valchava, la banquettes en bois placée en re-



Fig. 34: Court - Pâturage aux Bœufs 1998. Détail de la gueule et des trous de poteaux. Vue vers l'est.

trait, à plus d'un mètre de la gueule du four, a pris feu lors de l'expérimentation de 1982. Les deux trous de poteau sont peut-être des éléments de soutien d'un abri couvrant la gueule.

Le fond du four était tapissé d'une importante couche de charbon de bois provenant de trois essences principales: le sapin rouge, le pin sylvestre et le hêtre (tab. 2). Par rapport aux échantillons étudiés dans le cas de Moutier-Combe Tenon on remarque un spectre d'essences moins étendu (tab. 4).

B. Ligerz - Tiefgarage 1998

A Ligerz⁴⁷ (Glêresse, en français), de gros travaux de terrassement pour créer un garage souterrain occasionnèrent la découverte de cinq fours à chaux assez bien conservés. Quoique l'intervention archéologique fut limitée à trois jours, des levés complets de tous les fours ont été possibles, y compris quelques coupes transversales.

Tab. 2: Court - Pâturage aux Bœufs 1998. Essences arboréennes retrouvées dans le foyer du four à chaux

Espèces	Nombre d'individus	Poids g	% du total des individus	% du poids total g
Sapin rouge	32	156.4	71.1	79.0
Pin sylvestre	10	38.8	22.2	19.6
Hêtre	3	2.8	6.7	1.4
Total	45	198	100	100

46 Archives SAB: dossier Court - Pâturage aux Bœufs 1998.

47 Archives SAB: dossier Ligerz - Tiefgarage/Dorfstrasse1998.

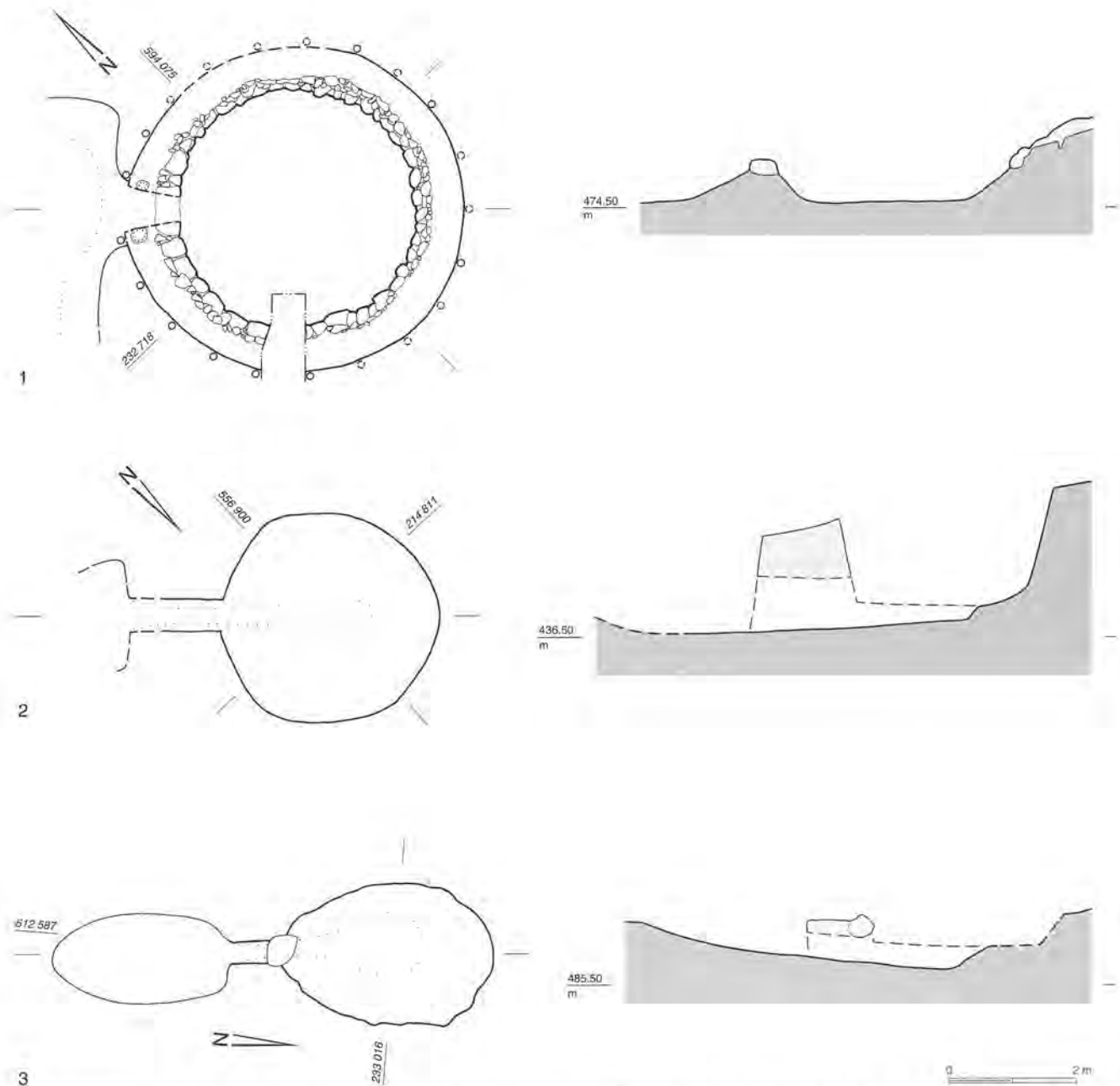


Fig. 35: Plans et coupes de trois autres fours à chaux de la chaîne jurassienne: 1 Court - Pâturage aux Boeufs 1998 (XVIIIe s.), 2 Ligerz - Tiefgarage 1998: four 3 (romain) et 3 Attiswil - Wybrunne 1996 (romain). Echelle 1:100.

Les fours dégagés à Ligerz (fig. 35, 2 et 36) sont de plan ovale à circulaire. Ils se distinguent par une gueule échan-crée en forme de triangle pointé vers le bas et par la présence d'un petit canal de section subquadrangulaire qui prolonge l'ouverture de la gueule au sein de la chambre de chauffe.

La gueule (fig. 37) est creusée dans le terrain naturel marno-calcaire environnant. Elle est conservée sur au moins un mètre. On ne connaît pas son élévation initiale ni le mode de fermeture sommitale (linteau de pierre, voûte de pierre). Sa longueur est également exceptionnelle, puisqu'elle atteint près de 1,50 m contre 0,9 m en moyenne dans les fours jurassiens de Roches ou Moutier. Une autre particularité réside dans le prolongement de cette ouver-

ture, sous la forme d'un canal, sur près des deux tiers du foyer. Un four romain du IIIe-IVe siècle découvert à Clermont⁴⁸ (Belgique) livre un plan très similaire, de même que le four d'Attiswil décrit ci-après.

La forme et l'emplacement de la gueule, qui s'ouvre au niveau du foyer, rappellent la tradition romaine.⁴⁹ Cette observation est confirmée par une datation radiocarbone réalisée sur un charbon de bois tiré du four 2. Le résultat

48 Breuer et Fraipont 1927.

49 ASSPA 82, 1999, 290-291(Ligerz).



Fig. 36: Ligerz - Tiefgarage 1998. Vue du four à chaux 2 dans l'axe de sa gueule. On distingue le comblement ainsi que l'auréole rubéfiée du terrain naturel marno-calcaire dans lequel le four a été creusé. Vue vers le nord-ouest.



Fig. 37: Ligerz - Tiefgarage 1998. Détail de la gueule si particulière des fours à chaux gallo-romains de Ligerz, ici celle du four 3. On note que la gueule s'ouvre au niveau du sol. Vue vers le sud.

calibré à 2 sigma situe le chaufour au Bas-Empire, entre 230 et 458 de notre ère, avec 96% de probabilité.⁵⁰

La fonction de ce canal aux parois fortement rubéfiées reste énigmatique. Certains veulent y voir un aménagement servant à améliorer la ventilation, ce que nous croyons avec peine, puisqu'il s'engorge rapidement de cendres. Il s'agit à notre avis de l'ouverture par laquelle le chaufournier pouvait pousser les charbons ardents ou les brossailles enflammées pour bouter le feu au foyer. Lors de la fouille, ce canal contenait un mélange cendreux grisâtre, mêlé de rares charbons de bois. On aurait pu imaginer qu'il s'agisse d'un cendrier (piège à cendres), mais celui-ci apparaît dès lors nettement sous-dimensionné. Toutefois, nous avons été surpris de constater que les résidus charbonneux et cendreux étaient presque inexistants dans les fours de Ligerz. Ont-ils été vidangés, nettoyés et préparés en vue d'une nouvelle cuisson qui n'eut jamais lieu?

Quant à la voûte, celle-ci prenait appui sur la sole et enveloppait l'étroit canal décrit précédemment. Nous imaginons un canal voûté, ogival ou cintré assez haut, à l'image de celui monté lors de l'expérimentation de 1998 à Valchava.⁵¹

Les fours de Ligerz constituent une variante nouvelle qui s'apparente au four semi-enterré de notre Variante 2 (voir Partie 1, chap. II), mais possède une gueule étroite prolongée par un canal servant à la mise à feu du four. Signalons encore que des documents médiévaux mentionnent un lieu nommé Kalkofenlände, soit littéralement: le débarcadère aux fours à chaux.⁵² D'autres chaufours sont attestés encore au XIXe siècle.

50 Echantillons n° inv. UZ-4240/ ETH-19758 préparés par le Laboratoire radiocarbone de l'Institut de géographie de l'Université de Zurich (GIUZ) et datés au moyen de la technique AMS sur l'accélérateur Tandem de l'Institut de physique des particules de l'ETH-Hönggerberg.

51 Documenté les 27 et 28.8.1998 par nos soins avec l'aide de Christian Kündig, SAB; annexé au dossier Moutier - Combe Tenon, Archives SAB.

52 Communication orale de Daniel Gutscher, SAB, que nous remercions.

Lors de la fouille du site hallstattien⁵³, un four à chaux romain de plan ovoïdal, mesurant 2,20 m par 3 m fut dégagé (fig. 35, 3). Une gueule étroite et allongée, dont la section subquadrangulaire tend à s'évaser à mesure que l'on s'approche de la chambre de chauffe, relie le four à l'aire de chauffe, oblongue elle aussi (fig. 38). Un bloc de calcaire visiblement en place ferme la partie supérieure de la gueule au niveau de la chambre de chauffe.

Il s'agit d'un four de petite taille, dont la production de chaux a pu servir aux travaux de maçonnerie dans un bâtiment gallo-romain voisin. Le four était comblé par un amas de pierres et blocs calcaires pas ou mal calcinés mêlés de limons rubéfiés (restes de manteau isolant?), qui recouvraient une importante couche de charbons. L'installation est datée de la fin du 2^e-début 3^e siècle ap. J.-C.

De manière générale, nous avons observé dans les différents fours fouillés à Roches et Moutier, qu'il était rare qu'une véritable couche de charbon se forme dans le foyer. Le charbon brûle complètement ne laissant qu'une couche plus ou moins importante de cendres. L'épaisse strate de charbons de bois recouverte par des blocs peu ou mal calcinés, pourrait indiquer que la cuisson a été interrompue suite à l'effondrement de la voûte. La même observation a été faite pour le four 2 de Ligerz. Toutefois, on peut aussi imaginer que l'on ait jeté au feu le solde du bois débité et que, la calcination arrivant à son terme, on étouffa le feu peu après.



Fig. 38: Attiswil - Wybrunne 1996: vue générale du four à chaux romain avec au premier plan l'aire de chauffe. Vue vers le nord.

6. Reconstitution

Si le principe de fonctionnement est bien établi et désormais connu, il n'en va pas de même de la technique de construction et de l'aspect fini des fours jurassiens. La littérature technique ancienne (notamment les traités de fabrication de la chaux d'Hassenfratz et Biston) décrit, illustrations à l'appui, les différents types de fours connus, qu'ils soient de facture simple ou nettement plus compliquée. Toutefois, les indications fournies, ainsi que les coupes, trop schématiques, n'autorisent qu'une représentation très générale des fours.

Les fouilles de Moutier, de Roches dans une moindre mesure, montrent que le four est souvent circulaire, creusé plus ou moins profondément dans le sol selon la nature du terrain (fig. 29 et 54). Parfois un solide empierrement délimite la chambre de chauffe et une partie du laboratoire. Une voûte, qui prend appui directement sur le sol (four semi-enterré) ou plus généralement sur une banquette aménagée dans le terrain (four de surface) clôt la chambre de chauffe. C'est sur cette voûte que repose toute la charge à calciner. La partie de la charge qui émerge de terre est recouverte d'un manteau isolant constitué d'argile et de terre. Un tableau synoptique (tab. 3) fournit les caractéristiques techniques des fours de Moutier.

Trois difficultés principales ont retenu notre attention, il s'agit de la construction de la voûte, de la hauteur de la charge et la manière d'établir le manteau argileux autour de celle-ci.

A. Voûte

La cuisson de chaux réalisée à Valchava en 1998, dans le cadre d'un programme d'archéologie expérimentale, nous a permis de suivre les étapes de construction de la voûte et surtout de réaliser combien importante et exigeante était cette réalisation (fig. 39). De sa solidité dépend en grande partie la réussite de la cuisson. Il faut à tout prix éviter son effondrement durant la période de chauffe. On monte en principe la voûte sur des cintres de bois portés par un échafaudage qui brûlent lors de la mise à feu.

Quant à la gueule qui permet d'alimenter le four en combustible, sa hauteur finie coïncide dans le cas des fours de

53 Je remercie Marianne Ramstein, SAB, pour la mise à disposition de son manuscrit à paraître; Archives SAB: dossier Attiswil - Wybrunne, Jurastrasse 1996.



Fig. 39: Valchava, Val Müstair 1998: préparation d'une cuisson de chaux dans un four restauré.

a) amas de blocs calcaires et appentis couvrant le four



b) échafaudage de bois dressé à l'intérieur de la chambre de chauffe pour soutenir la voûte



c) vue verticale sur le boisage destiné à soutenir la voûte



d) pose des blocs de la voûte



e) sommet de la voûte



f) pose des poteaux qui serviront de cheminée: le remplissage du laboratoire peut commencer

Tab. 3: Moutier - Combe Tenon 1997. Données techniques mesurées et estimées des fours à chaux.

	Four 1	Four 2	Four 3	Four 5	Four 6	Four 8
Diamètre du foyer m	2,6/2,9	3,5	3,7	2,5/2,6	2,2/3,0	1,8/2,0
Diamètre intérieur (base) m	2,6	3,5	3,7	3,9/4,6	2,8/3,6	2,6/2,8
Diamètre extérieur (charge) m	3,6	4,3	4,6	3,9/4,6	env. 4,2	5,0/5,2
Diamètre total (y c. isolation) m	4,3	5,2	5,6	5,7	env. 4,8	6,0?
Hauteur conservée m	0,8	0,8	1,1	2,2	1,6	2,0
Dimensions gueule (l/ h/ p) m	0,45/≥0,45/0,9	0,45/≥0,4/ 0,8	0,45/≥0,4/ 1,0	0,5/≥0,5/ 0,7	0,5/≥0,4/1,1	—
Hauteur gueule s/ sole m	0,7	0,8	0,9	0,5	1,2	1,6-1,85
Hauteur gueule s/ fosse m	0,6	0,6	0,5	0,6	—	?
Volume chambre de chauffe m ³ *	5	11	13	4	4-5	6
Volume de la charge m ³ **	27	36	41	32	32	32
Volume manteau isolant m ³	16	19	19	10	14	14
*** (épaisseur estimée à 0,6 m)						
Forme générale	circulaire	circulaire	circulaire	ovale	ovale	ovale
Fosse de travail	oui	oui	oui	oui	non	?
Gueule orientée vers	amont	// pente	// pente	aval	replat	replat?
Gueule orientée à	est	sud	est	sud-ouest	est	est?
Boisage extérieur attesté	oui	oui	oui	non	non	oui
Nombre de cuisson attestées	2	1	3	1	1	1
Datation : terminus post quem (abandon) ou chronologie relative	Fin XVIIe s./ céramique	—	Fin XIXe s./ céramique	Postérieur au four 6	Fin XVIIIe - XIXe s.	Antérieur au four 3

* Volume de la demi-sphère: $V = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot h^3$

** Volume du manteau: $V = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \text{côté} \cdot (D + d) \cdot \text{épaisseur}$

*** Diamètre moyen (d) = $\frac{1}{2} \cdot (d \text{ base} + d \text{ charge})$; h = 4 m. Volume du cylindre = $(\frac{1}{2} \cdot d)^2 \cdot \pi \cdot h$

// parallèle à

surface à la hauteur du coude d'un homme de taille moyenne. Pour les fours semi-enterrés, l'alimentation du foyer s'avère moins pratique dans la mesure où la gueule s'ouvre à la hauteur des genoux!

B. Laboratoire

Comme le laboratoire n'est généralement pas ou que partiellement conservé, il est difficile de restituer la hauteur totale du four. Seuls les fours aménagés dans le flanc d'un talus fournissent quelques indications minimales quant à l'élévation: 2 m pour le four 5 de Moutier ou 2,2 m pour le four 1 de Roches. Mais la hauteur totale du four devait se situer autour de 4 m.

Biston⁵⁴ indique pour les fours à calcination périodique à grande flamme une hauteur totale correspondant au maximum au double du diamètre. Les fours 1, 2, 3 et 5 auraient donc atteint jusqu'à 5 et 7 m de haut, ce qui représente un dépassement du sol de l'ordre de 4,5 à 6,5 m, ce qui paraît exagéré, à tout le moins dans le cas de nos fours jurassiens. Cela équivaldrait à des charges calcaires situées souvent au-delà de 80 m³. Il nous semble que la cuisson de 20 à environ 50 m³ de roche, soit une hauteur hors tout de 3 à 4,5 m pour un four dont le diamètre oscille entre 2,6 et 3,8 m peut être envisagée pour les sites de Moutier et Roches.⁵⁵

Reusche⁵⁶ admet sur la base des fours qu'il a étudiés dans les Balkans, que le volume de la chambre de chauffe représente environ un tiers du volume total. Nos propres estimations, basées sur des reconstitutions théoriques, ten-

dent à contredire ces chiffres. La chambre de chauffe peut être réduite à 1/5e ou 1/7e du volume total (1/6e à Valchava 1998).

C. Manteau

Le matériau argileux rubéfié démantelé après cuisson s'étendait autour d'un hexagone entourant le four. L'intérieur du polygone, vierge de toute démolition, marque en fait la limite du caisson isolant. Ce phénomène a pu être observé avec précision dans le cas des fours 2 et 3, alors qu'il reste plus discret dans le cas du four 1. Dans un cas seulement (four 2), un trou de poteau situé dans l'un des angles de l'hexagone a pu être mis en évidence. La nature du terrain (sol forestier) compliquait sérieusement l'observation des structures creusées, mais il convient aussi de signaler que cette particularité architecturale n'a été remarquée qu'après coup, lors de l'évaluation des données de fouille, donc bien après la fouille. A notre avis, les indices observés doivent être mis en relation avec le boisage et la construction en «Blockbau» (technique en rondins) mentionnés ici et là dans la littérature consultée.

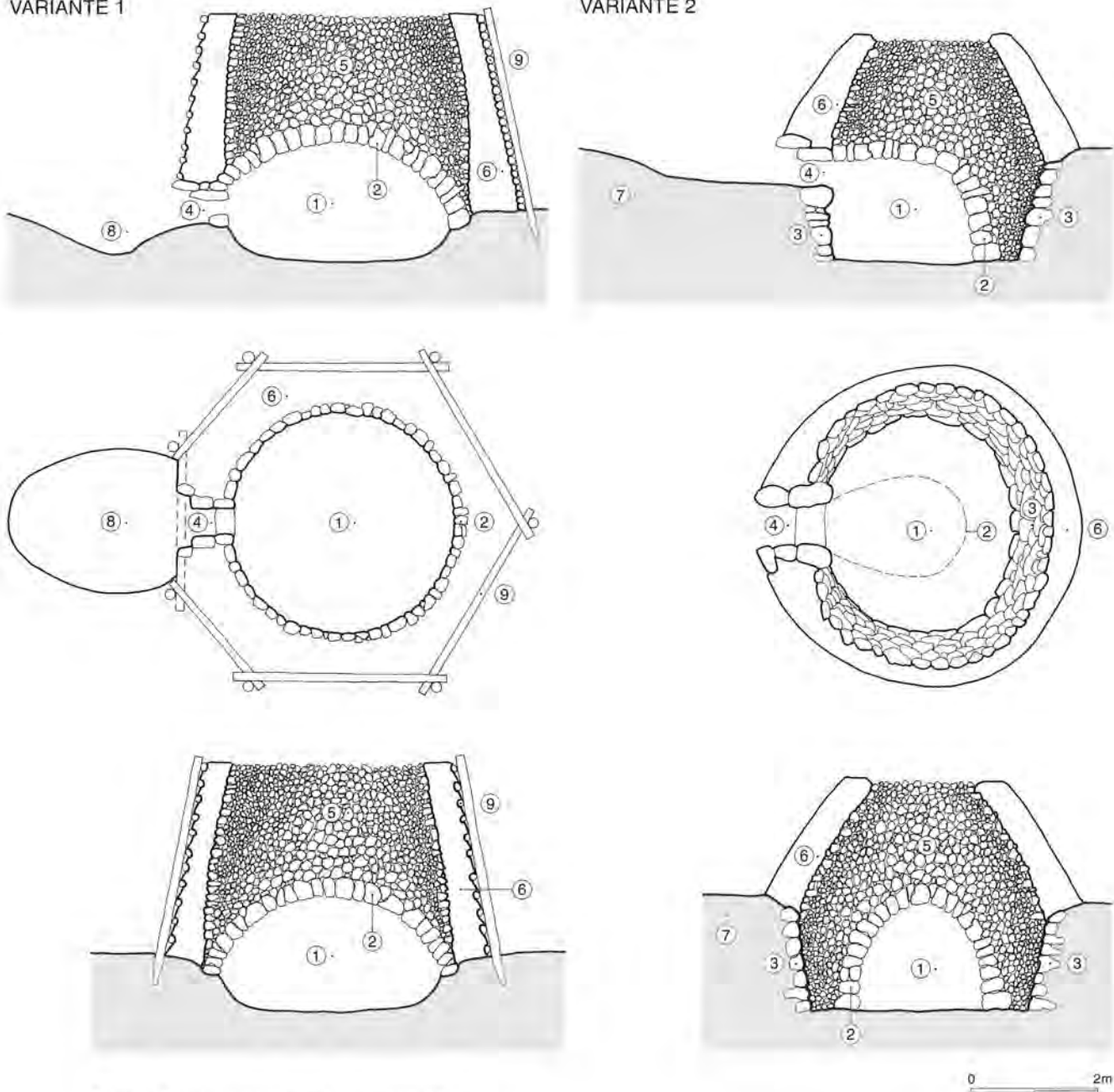
54 Biston 1828, 120.

55 Adam et Varène (1983, 87-88) signalent des fours de même taille en Grèce, alors que Biston en mentionne dont la contenance atteint 45m³ ou plus (1828, 61).

56 Reusche 1977, 46 et note 54. Les fours de Lukovo ont un rapport diamètre/hauteur d = environ 1:2; la charge représente environ 2/3 du volume total.

VARIANTE 1

VARIANTE 2



Four à chaux jurassien, variantes 1 et 2

- | | | |
|----------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| ① Foyer, chambre de chauffe | ④ Gueule | ⑦ Terrain encaissant |
| ② Voûte | ⑤ Laboratoire | ⑧ Fosse de travail ou aire de chauffe |
| ③ Soutènement délimitant le four | ⑥ Manteau argileux isolant | ⑨ Caisson en bois (boisage) |

Fig. 40: Reconstitution en plan et coupes des deux variantes de fours à chaux étudiées sur le site de Moutier. La variante 1 est munie d'un boisage assurant la stabilité du four durant la cuisson.

Dès la fin du Moyen Age une construction en rondins de bois est mentionnée dans le Baumeisterbuch de Zurich publié par F. Guex.⁵⁷ Hassenfratz faisant référence à l'Encyclopédie et Dubois la mentionnent encore.⁵⁸ Un document d'archive retrouvé à Moutier⁵⁹ demande que l'on accorde «des perches et branchages pour faire le tressage du four». Ce tressage correspond manifestement au boisage qui maintient en place le manteau argileux pour éviter qu'il ne s'écroule.

Dans le cas de nos grands fours, on peut imaginer une sorte de caisson en bois à base hexagonale formé de perches ou de rondins appuyés contre des poteaux d'angle.

57 Guex 1986, 49.

58 Hassenfratz 1825, 45-46; Dubois 1920, 37.

59 Archives de la Commune Bourgeoise de Moutier, section IV, casier 4, dossier 28: lettre du 2 juin 1840.

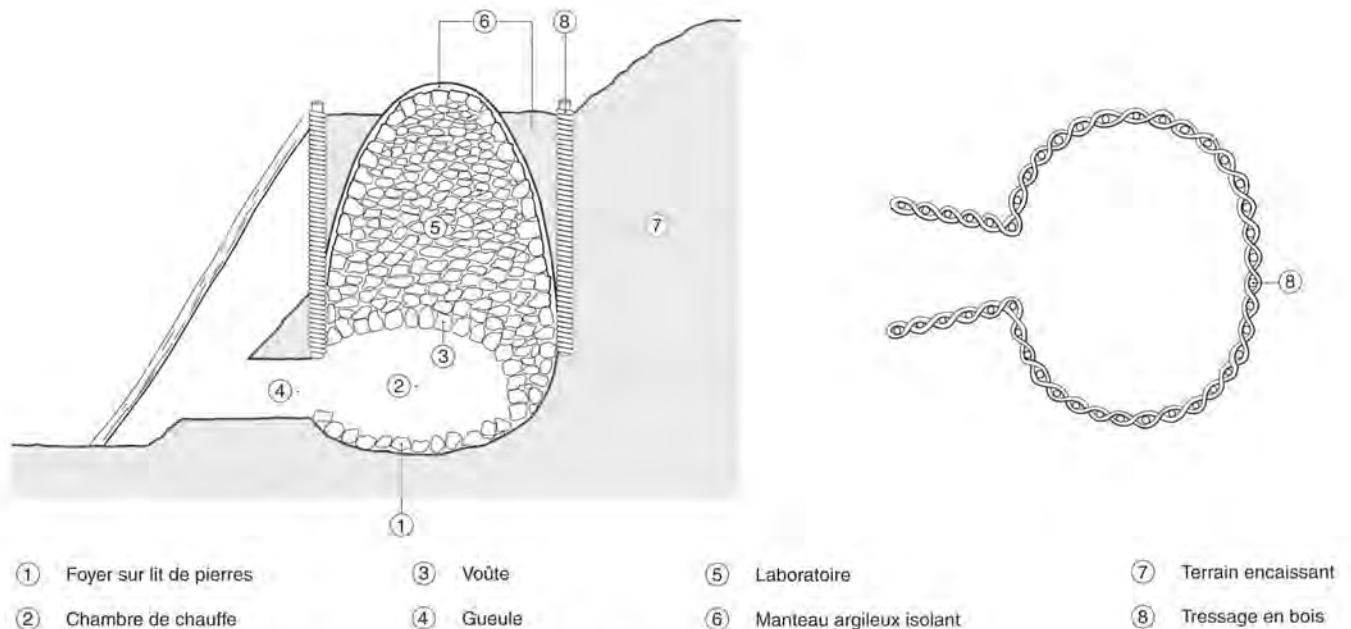


Fig. 41: Four à chaux entouré de son boisage de rondins et branches, d'après Hassenfratz 1825.

Cette construction est établie autour du four, à une distance oscillant entre 20 et 60 cm. L'élévation devait s'incliner légèrement vers l'intérieur. Dubois indique une épaisseur de manteau de 70 à 80 cm, ce qui paraît élevé, puisque cela représente plus de 20 m³ de matériau. A notre avis, il faut envisager une épaisseur qui va en diminuant au fil de l'élévation.

A la lumière des observations archéologiques et des descriptions relatées dans les différents manuels consultés, deux variantes de fours à chaux semblent exister dans le paysage jurassien entre le XVIIIe et le XIXe siècle. Ces deux variantes sont représentées sur la figure 40.

Nous souhaitons reproduire ici une «note du rédacteur des Arts publiée à Neuchâtel»⁶⁰, reprise telle quelle par Hassenfratz dans son *Traité*: «Nos ouvriers [neuchâtelois] prennent un endroit sur le penchant de quelques collines, propres à garantir le four des vents violens (sic!) qui en empêcheraient le travail. On creuse au pied de la colline une fosse sphérique proportionnée à la quantité de chaux que l'on veut faire. On entoure cette fosse de quartiers de rocs propres à retenir la terre, et on y arrange les cailloux calcaires de manière qu'il reste, en bas, une bouche assez grande pour allumer le feu. Au-dessus de cette espèce de forme, on soutient la terre avec des pieux plantés en rond et liés ensemble avec des branches pliantes de quelques arbrisseaux. On a soin de bien battre la terre tout autour sur la bouche inférieure. Sur cette espèce de grand panier, l'on élève les cailloux et pierres à chaux en forme de pyramide, observant de laisser, entre les pierres, assez d'espace pour que l'action du feu puisse s'étendre et se développer dans toute la fournée. Les cailloux bien rangés sont couverts d'une bonne couche de terre, bien tapée partout où l'on ne

veut pas laisser passer des évens (sic!). On appuie tout le tour de l'édifice de grandes perches pour retenir la terre, et on lui donne une forme pyramidale».

Hassenfratz donne d'ailleurs un schéma illustrant le principe de ce boisage tressé retenant le manteau isolant (fig. 41). Nous notons encore que les ouvriers peuvent «mettre le feu pendant qu'on arrange encore la partie supérieure [de la charge], d'autres attendent la fin de la construction avant d'enflammer le brasier». Dans cet exemple, seul le plan du caisson de bois change: il est circulaire.

Il nous apparaît intéressant de relever ici qu'une structure analogue par la forme est représentée chez Fourcroy de Ramecourt.⁶¹ Il s'agit d'un pentagone constitué de planches de bois maintenues en place par toute une série de poteaux disposés par paires (fig. 42). Cette construction dénommée «abri-vents» constitue donc une protection contre les vents violents qui pourraient emballer le feu. Ce dispositif n'a donc pas la fonction de maintien du manteau argileux comme dans nos fours. Dans le cas décrit par Fourcroy de Ramecourt, l'isolation est assurée par une couverture de «tuileaux» (H), soit des briques réfractaires peu épaisses. Les chaudières jurassiennes auraient-ils en quelque sorte combiné les besoins d'isolation thermique et de protection contre les vents ou s'agit-il d'une simple coïncidence, la forme polygonale étant d'une réalisation aisée et permettant d'économiser des matériaux? La question mérite d'être posée.

⁶⁰ Il est sans doute fait allusion à l'*Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*, dont les tomes VIII à XVII ont été imprimés à Neuchâtel en 1765.

⁶¹ Fourcroy de Ramecourt 1766, pl. III, fig. 5.

7. Approche quantitative de la production

La fabrication de la chaux de manière traditionnelle requiert non seulement un calcaire de bonne qualité ne contenant pas trop d'argiles, mais également une grande quantité de combustible, en particulier un bois pas trop sec de préférence. Elle implique également une grande organisation et une série de préparatifs: abattage, élaguage et débitage du bois frais, construction du four ou nettoyage en cas de réutilisation, rassemblement et concassage des pierres à chaux, montage de la voûte, remplissage de la chambre calcination, puis enfin surveillance de la cuisson et défournement après refroidissement de l'installation.

La taille des fours varie également en fonction des besoins en chaux (construction d'un nouveau bâtiment, crépissage de façade...). Certains fours peuvent être aménagés et entretenus par des communautés (commune ou commune bourgeoise par exemple), d'autres sont construits par des privés ayant obtenu les autorisations nécessaires. Cop signale des actes notariés du XVIII^e siècle touchant le pays de Neuchâtel, qui relatent des productions de chaux situées entre 9 et 58 m³ par cuisson. En outre, il croit déceler un accroissement de la taille des fours au début du XIX^e siècle, puisque les volumes produits atteignent jusqu'à 110 m³ par cuisson, ce qui sous-entend des fours colossaux⁶², difficilement comparables aux fours de Moutier ou Roches.

A. Les roches

La qualité de la roche calcaire varie aussi selon les formations géologiques. Sa teneur en carbonate de calcium (CaCO₃) influence la qualité finale de la chaux. Dans sa forme la plus pure, le calcaire contient jusqu'à 99% de carbonate de calcium. Le marbre et la dolomite contiennent aussi beaucoup de carbonate de calcium et peuvent être transformés en chaux.

A Moutier - Combe Tenon, ce sont des calcaires portlandiens et kimméridgiens, très purs et présents en masse dans les éboulis, qui ont été exploités.

B. La calcination

Nous avons vu (Partie 1, chap. V) que la cuisson de la roche exigeait des températures élevées situées vers 1000°C, qui ne peuvent être obtenues qu'à l'intérieur d'un four. Exposée à l'intense chaleur durant plusieurs jours, la roche perd son gaz carbonique et voit son poids diminuer de près de 45%. Par contre, son volume demeure identique. La durée de la cuisson dépend d'une part de la dureté et de la dimension des pierres utilisées: les grandes pierres ont le désavantage de calciner lentement, au contraire des plus petites. D'après Bitterli⁶³, la dimension idéale se situerait entre 10 et 20 cm d'arête, mais nous avons vu dans l'expérimentation de Valchava l'utilisation de gros blocs de plus de 30 cm d'arête.

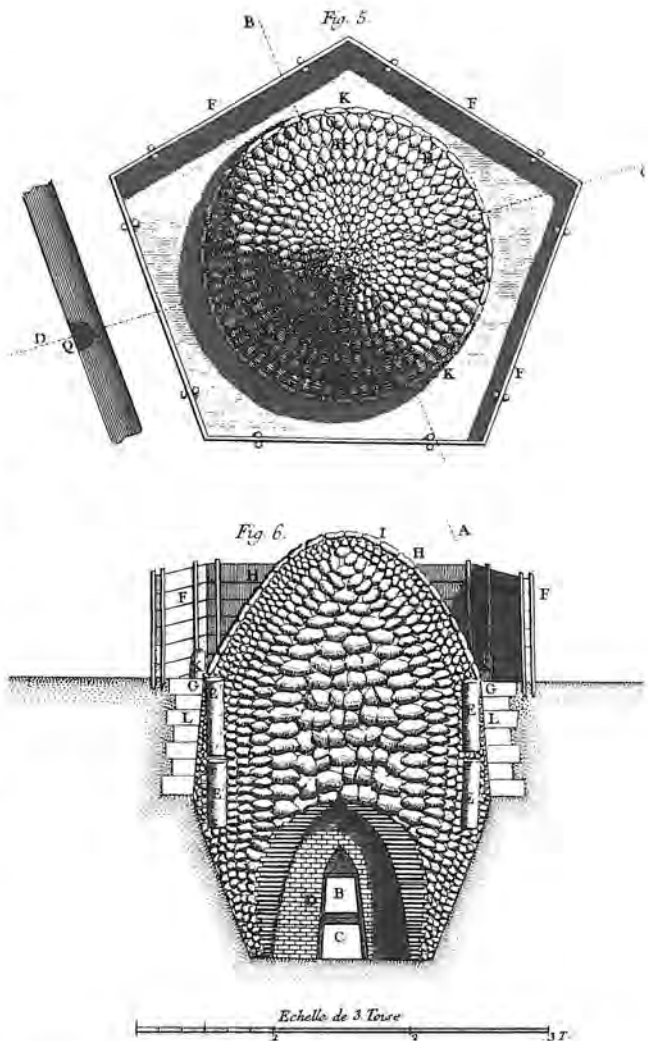


Fig. 42: Un four maçonné ceinturé par un boisage de forme pentagonale qui abrite le four des coups de vent.

Dans le cas des fours à flamme longue, les essences sylvi-
coles (résineux ou feuillus) ainsi que les parties de l'arbre
utilisées (branches, troncs, racines) ont un impact sur l'inten-
sité du feu (pouvoir calorifique différent). Mais, on pri-
vilégie naturellement l'exploitation des arbres et buissons
qui croissent à proximité immédiate, afin d'éviter de cou-
teux transports.

62 De tels mastodontes ne semblent pas courants. Leur taille devait atteindre 5 à 6 m de diamètre pour 4 à 6 m de haut. Le rapport idéal hauteur/diamètre = 2, indiqué par Biston, ne paraît pas réalisable dans ce cas, puisque la hauteur serait de 8,30 m pour 4,2 m de diamètre.

63 Communication orale lors de la visite du chantier de Moutier en été 1997.

C. Le combustible

Toutefois, on a avantage à utiliser dans la mesure du possible des essences de bois produisant une flamme vive et ayant un bon pouvoir calorifique (épicéa, pin, hêtre par exemple). Ce pouvoir dépend également des parties de l'arbre utilisées et du taux d'humidité du bois. Adam remarque qu'il est d'usage d'utiliser du bois bien sec. En général, on coupe le bois à l'automne pour l'utiliser au printemps suivant. Toutefois, Dubois signale aussi la consommation de bois vert.

Les charbons de bois prélevés dans ce qui restait des foyers des fours indiquent l'utilisation d'une grande variété de bois. Apparemment, le chaudiériste ne pratique pas de sélection des bois de chauffe. Les échantillons trop peu nombreux pour la fouille de Moutier n'autorisent aucune analyse statistique. On relève la présence de hêtre, sapin blanc, sapin rouge, pin sylvestre, érable, peuplier et d'arbustes comme le noisetier et le sorbier (tab. 4).

Le four à chaux de Court - Pâturage aux Bœufs (voir Partie 1, II,5 et tab. 2) a révélé un spectre un peu différent, puisque nous notons la présence de seulement trois espèces: le sapin blanc, le pin sylvestre et le hêtre.⁶⁴

Au vu des chiffres publiés dans les différents articles consultés, il apparaît que le volume de bois nécessaire à la calcination varie sensiblement d'un four à l'autre. Biston⁶⁵ indique des valeurs de consommation de bois situées régulièrement entre 1 et 2,5 stères de bois par mètre cube de roche amassée. La cuisson expérimentale réalisée en 1982 dans le grand four restauré de Valchava a nécessité 104 stères⁶⁶ de bois pour environ 30 m³ de calcaire, soit près de 3 stères de bois par mètre cube de roche. Un intéressant document relatif à un four à chaux exploité à Moutier en 1851 (voir ci-après) révèle une consommation de bois de l'ordre de 1,3 stère par mètre cube de roche, ce qui est nettement inférieur aux résultats grisons.

Il demeure important pour établir de tels calculs de connaître la masse totale de roche constituant à la fois le four proprement dit et la charge, car le bois sert tout

d'abord à chauffer la chambre de chauffe, puis à calciner les pierres. D'autre part, toute la roche ne se calcine pas, il convient donc de tenir compte des déchets et résidus non cuits ou mal cuits.

La consommation de bois dépend non seulement de la qualité calorifique du bois, mais aussi de la taille du four, de l'épaisseur de ses murs et de la qualité de son isolation thermique (manteau). D'après Bitterli⁶⁷, les fours périodiques sont particulièrement désavantageux du point de vue du bilan énergétique, car ils doivent être refroidis après chaque cuisson, pour permettre l'extraction de la chaux vive produite. Ainsi ces fours subissent-ils un réchauffement intensif suivi quelques jours après d'un refroidissement total. L'amélioration de l'isolation du manteau et de la partie supérieure de la charge n'entraîne pas de réduction sensible de la consommation de bois. Seule une modification du système d'exploitation sera à même d'améliorer la productivité et le bilan énergétique: ce sera le passage du four périodique au four en puits à calcination continue.

Dans ce type de four qui tend à se généraliser durant le XIXe siècle, le combustible (charbon de bois peu à peu remplacé par la houille) est disposé en couches alternées avec le calcaire. Après la mise à feu, le combustible se consume petit à petit. La cendre se dépose dans un cendrier, alors que la chaux vive est extraite en continu. On complète la charge au fur et à mesure en alternant le combustible et le calcaire.

64 Les prélèvements de Moutier et Court ont été faits à l'oeil (pas de prélèvement en bloc); les analyses anthracologiques des deux sites ont été faites par le Laboratoire d'archéobotanique de l'Institut de Botanique de l'Université de Bâle.

65 Biston 1828, 61-64. L'auteur fait probablement référence à la charge seule, et ne tient pas compte du volume de pierres formant l'appareil du four (parement et voûte) qui absorbent aussi de la chaleur.

66 Par contre la tentative de 1998 a échoué en raison d'un gueulard bouché empêchant une bonne évacuation des gaz, notamment le CO₂; communication orale de Bitterli 19.12.2000.

67 Bitterli 1990, 151.

Tab. 4: Moutier - Combe Tenon 1997. Essences arboréennes recensées parmi les rares charbons découverts dans les foyers des fours 1, 3 et 5.

Espèces	Four 1			Four 3			Four 5		
	Nombre d'individus	Poids g	% poids total	Nombre d'individus	Poids g	% poids total	Nombre d'individus	Poids g	% poids total
Sapin blanc	-	-	-	5	34.4	37.0	6	2.7	12.2
Sapin rouge	8	2.4	63.2	-	-	-	-	-	-
Hêtre	-	-	-	1	1.5	1.6	-	-	-
Erable	-	-	-	-	-	-	4	3.2	14.5
Peuplier	-	-	-	1	?	-	-	-	-
Noisetier	5	1.0	26.3	8	6.5	7.0	-	-	-
Sorbier	1	0.4	10.5	1	0.1	0.1	2	1.4	6.3
Indéterminé	-	-	-	≥30	50.5	54.3	-	14.8	67.0
Total	15	3.8	100	≥46	93.0	100	12	22.1	100

D. Travail et coûts

Les coûts de construction et de fonctionnement d'un four périodique jurassien du type de ceux rencontrés à Roches et Moutier restent difficiles à chiffrer. Les multiples travaux à réaliser au préalable exigent de gros efforts. Tout d'abord, on s'occupe de l'acquisition, de l'abattage – élagage – débitage du bois nécessaire à la construction du four (cintres en bois pour la voûte et caisson extérieur), mais surtout à l'alimentation du foyer. Ensuite, on creuse la fosse qui accueillera le four. Les pierres auront au préalable été rassemblées à portée de main. Lorsque la voûte est soigneusement établie, débute le remplissage méthodique du laboratoire.

Malheureusement, on connaît mal le nombre d'hommes et de femmes participant aux différentes étapes de la mise en oeuvre d'un four à chaux.

Dans les archives de la Commune bourgeoise de Moutier⁶⁸, propriétaire des forêts de la Combe Tenon, nous avons découvert trois documents du XIXe siècle relatifs aux fours à chaux: deux demandes d'autorisation de construire un four à chaux «aux Evallins» (le secteur de notre fouille), datées de 1840 et une autre de 1860 au lieu-dit «La Charrue» (entrée des gorges de Moutier). Un quatrième document, sans conteste le plus intéressant, dresse l'«Etat des dépenses et journées» pour l'exploitation d'un four à chaux en 1851.

On y trouve des données précieuses relatives à l'établissement, le fonctionnement et le rendement d'un four aménagé aux Evalins, soit dans le secteur que nous avons étudié. Peut-être s'agit-il même d'un des fours fouillés. Bien que nous ne connaissions pas le type de four construit par le chafournier dénommé Dupuis⁶⁹, nous estimons que les données sont suffisamment détaillées pour que nous puissions envisager d'en tirer quelques généralités. De surcroît, les conditions géologiques et la couverture forestière variant peu sur le territoire communal, ces données sont à notre avis applicables à d'autres fours à chaux périodiques du secteur Moutier.

Selon le décompte, quelques 24 toises⁷⁰ de bois, soit au moins 62 stères, ont été acquises pour la cuisson de la chaux. Il s'agit surtout d'arbres sur pied, marqués en forêt, pour un volume de 211/4 toises (56 stères), de cimes et branches de 12 sapins. On mentionne encore 22 bois pour piquets ayant peut-être servi à la réalisation du boisage extérieur du four maintenant en place le manteau isolant. On apprend encore que 76 journées d'homme (à 13 Batz) ont été nécessaires pour préparer et charrier le bois. Le transport du bois, des fagots et bottes de foin auprès du four à chaux prit en tout 23 journées de chevaux. Ces préparatifs se déroulèrent de janvier à mai 1851.

Pour l'extraction et le mesurage de la chaux, le chafournier fut secondé durant 10 jours par un domestique (ouvrier) et une servante. Leur travail n'est pas facturé.

En tout, ce sont 2090 boisseaux⁷¹ de chaux vive qui ont été extraits du four, ce qui représente un volume de 43 m³.

Julien Schaffter, le requérant, en prit près des trois-quarts. Les acheteurs principaux (tab. 5) furent la Commune bourgeoise (8,2%), la Société industrielle de Moutier⁷² (7,6%), Madame Veuve D. Schaffter tanneur (7,5%). Trois particuliers ont acquis entre 15 et 40 boisseaux (0,7 à 1,9%); le solde s'élève à 15 boisseaux. Le prix de vente se montait à 24,5 Rappen (centimes) le boisseau.

La chaux a été produite en priorité pour les besoins de J. Schaffter, requérant, qui construisait une maison à Moutier. C'est lui qui engagea le chafournier Dupuis qu'il rétribua 221 livres (= 221 francs), à cette époque le salaire journalier d'un ouvrier du bâtiment atteignait environ 2 francs. Nous aurions aimé retrouver cette demeure, malheureusement le manque de données concernant ce J. Schaffter, ne nous a pas permis d'aller plus loin dans nos recherches.

L'intérêt de cette comptabilité, aussi succincte soit-elle, réside dans le fait qu'elle détaille, outre des indications relatives aux préparatifs nécessaires à la fabrication de la chaux, les préparatifs, les coûts du travail et du matériel. On note par ailleurs quelques détails croustillants relatifs à la conclusion du marché qui se fit moyennant quatre pots d'eau de vie (environ huit litres!) payé quatre livres. Gageons qu'il partagea avec ses ouvriers.

Ainsi, on note que 76 journées d'hommes, payées 13 Batz (1,3 francs) la journée, furent nécessaires à la préparation du bois. Cela représenterait trois semaines de travail pour quatre hommes, à raison de semaine de six jours. Les travaux se déroulèrent entre janvier et mai.

Le transport du bois, des planches et des fagots nécessita 23 journées de chevaux à 15 Batz l'une, soit près de deux semaines à deux chevaux et deux chars.

Enfin, au mois de juin, 10 jours furent nécessaires au mesurage de la chaux vive obtenue. Comme aucun frais de transport de chaux vive n'est mentionné, nous en déduisons que son transport était à la charge des clients.

Quant au bois préparé et utilisé pour la fabrication du four et la cuisson de la chaux, nous savons que Schaffter en a acquis environ 21 1/4 toises à la Commune (Commune bourgeoise selon lettre du 5 décembre 1850), auxquelles viennent s'ajouter d'après nos calculs quelques 7 toises d'origines diverses. En retranchant la toise et demie non

68 Archives conservées à l'Hôtel de Ville de Moutier. Cote: Section IV, casier 4, dossier 28.

69 Nous n'avons trouvé trace de ce Dupuis ni dans les Registres des votants ni dans ceux du contrôle des étrangers de la Commune de Moutier (archives municipales). S'agissait-il d'un artisan ambulant qui résidait dans les environs?

70 La toise de bois bernoise vaut 2,65 stères, soit 2,65 m³; Dubler 1988, 2.

71 Un boisseau contient 21 litres: Dubler 1988, 33, 34 et 37, tabl. 5 (Moutier); Miserez 1983, 180-181.

72 Une société horlogère importante. La raison de cette commande nous échappe.

Tab. 5: Compte pour un four à chaux des Evalins à Moutier (1850 et 1851)

	Volume de chaux en		% de la production	Prix en francs de 1851
	boisseau	m ³		
Julien Schaffter, requérant	1 495	31.395	71.5	366.275*
Commune bourgeoise de Moutier	170	3.57	8.2	41.65
Société industrielle de Moutier	158	3.318	7.6	38.70
Mme Vve D. Schaffter, tanneur	157	3.297	7.5	38.465
Victor Bernard	40	0.840	1.9	9.80
Gypseur [du requérant]	40	0.840	1.9	9.80
Ab. Louis Boivin	15	0.315	0.7	3.675
Solde	15	0.315	0.7	3.675*
Total	2 090	43.490	100.0	512.04

* le requérant paie sa chaux indirectement dans la mesure où il a à charge le chaufournier, les journées d'homme, le voiturage et le bois nécessaire à la construction du four et à la cuisson. Quant au maigre solde, nul ne sait ce qu'il est advenu.

En 2000, le prix de la chaux grasse (en fosse) est d'environ Frs 20.- les 10 kg, contre Frs 4.- la chaux hydratée et Frs 2.- le ciment type Portland.

Tab. 6: Tableau comparatifs de données techniques de trois fours à chaux de conception proche avec le calcul théorique de Vital:

	Moutier 1851	Metz 1828 ¹	Valchava 1982	Calcul de Vital
Roches calcaires m ³	48	44.4	32	50
Roches calcaires t	72	66.6	48	75
Chaux vive m ³	43	42.8	24	40
Déchets m ³ (% total)	5 (10%)	?	8 (25%)	?
Bois de feu stère (toise)	≥62.5 (24)	46.5	104	85.1
Chaux hydratée m ³	64	?	36	60
Stères de bois / m ³ de calcaire	≥1.3	1.04	3.25	1.7

italique: chiffres déduits à partir des données à disposition

¹ D'après Biston 1828, 61; d'autres fours lorrains décrits ayant une consommation proche.

utilisée, on obtient une quantité de bois pour la construction et la cuisson approchant les 26 toises. Nous en retranchons volontairement deux toises pour la construction du boisage extérieur.

Sachant que le chaufournier a pu produire 2090 boisseaux de chaux vive (43 m³), on peut estimer la consommation de bois à environ 1,3 stère par mètre cube de roche. Ces valeurs (tab. 6) sont comparables à celles indiquées par Fourcroy de Ramecourt ou Biston.⁷³ Par contre, elles sont nettement inférieures à celles obtenues lors de l'expérience de Valchava⁷⁴, où plus de trois stères de bois étaient nécessaires par mètre cube de roche. Peut-être cela tient-il d'une maîtrise imparfaite de la conduite du feu, les anciens chaufourniers n'étant plus là pour seconder les expérimentations actuelles.

Malheureusement, notre document ne fournit aucune information quant à la construction même du four. Dans sa requête préalable datée du 5 décembre 1850, Schaffter sollicite un «emplacement» et «la permission de prendre la terre nécessaire pour la construction [du four]». Il faut en déduire que le four devait être encore creusé, ce que fit sans doute le chaufournier. Il n'est pas fait non plus allusion aux pierres calcaires à extraire.

8. Conclusion

Peu ou mal connus, sans doute en raison de leur caractère trop peu spectaculaire ou trop récent, les fours à chaux n'ont jusqu'ici pas vraiment retenus l'attention des chercheurs. Forts nombreux dans les régions riches en calcaire, comme l'arc jurassien (fig. 43), ils ont souvent laissé une trace toponymique sur les anciennes cartes ou les plans cadastraux. On ne compte plus en effet, les chéfour, chafour ou encore raffour, raffort dispersés dans toute la Suisse romande. Il manque pour l'heure une véritable typologie des fours à chaux, car des variations régionales semblent transparaître, notamment au niveau de la forme (circulaire ou rectangulaire), mais aussi au niveau de leur utilisation unique ou répétée. Les futures recherches archéologiques devraient permettre de mieux cerner les catégories de fours à chaux et de saisir un peu plus précisément le mode de construction du boisage qui retient le manteau isolant. En outre, il semble que de grandes disparités existent entre les rendements de ces fours, ce qui mé-

73 Fourcroy de Ramecourt 1766, 19; Biston 1838, 54-64.

74 Bitterli 1990, 150 (Valchava).

riterait à n'en pas douter une analyse plus détaillée tant au niveau des qualités de combustibles utilisés qu'au niveau des qualités des roches.

Les recherches occasionnées par la construction de l'A16, entre Roches et Court, contribueront, c'est en tout cas notre souhait, à redécouvrir ces vestiges du passé qui témoignent d'une activité importante et fondamentale dans l'économie locale, dès l'instant surtout où l'usage des mortiers s'est généralisé dans la construction.

Le site de Moutier reste exemplaire à ce titre car il a révélé neuf fours à chaux – plus ou moins contemporains – sur une étroite bande de terrain. Cette concentration dénote d'une part, les forts besoins en chaux à Moutier à cette époque et d'autre part sans doute la présence d'un matériau de bonne qualité, abondamment exploité. Les rares documents d'archives conservés apportent un éclairage particulier sur le thème de la fabrication de la chaux et permettent d'aborder les questions du travail, du rendement et du prix de revient du matériau fini.

Fig. 43: Non loin du site de Moutier, l'œil attentif découvre au détour d'un chemin, dans un beau pâturage boisé à l'écart des travaux de l'A16, un grand four à chaux, témoignage d'une activité intense disparue de nos contrées.



Partie 2: Roches - Combe Chopin

I. Présentation du site et déroulement des travaux

La Combe Chopin (fig. 44 et 45) se développe d'est en ouest dans un secteur à la géologie complexe, entre l'anticlinal de Raimeux au sud et une zone de perturbations tectoniques complexes au nord. Elle est recouverte de marnes oxfordiennes. Le sud de la combe qui nous intéresse plus particulièrement est formé de calcaires du Hauptrogensstein supérieur (Dogger), que l'on retrouve en masse dans les éboulis.

Du point de vue archéologique, Quiquerez⁷⁵ signale la découverte, en 1862, d'un tronçon de route à rainures dans les environs du moulin de Roches. Il s'agit-là du seul indice archéologique recensé par le Service archéologique dans ce secteur, avant que ne débutent les travaux de sondages systématiques sur le tracé de la route nationale A16. Ces travaux commencèrent fin septembre pour se terminer à la mi-novembre 1995. Au cours de cette brève campagne de fouille, centrée dans le secteur de la place d'installation de chantier de la galerie de sondage du tunnel de Raimeux, trois fours à chaux, deux meules à charbon et diverses structures ont été relevés. En tout, sur les 3000 m² décapés mécaniquement, 400 furent fouillés plus ou moins manuellement. Les relevés se limitèrent aux seules structures nettement visibles.

Le site sidérurgique et une partie de l'ancienne route des gorges, repérés lors du décapage général, furent fouillés entre la mi-mars et la mi-novembre 1996.⁷⁶ La fouille du site sidérurgique s'étendait sur une surface de 350 m², celle de la route sur quelque 100 m².

Pour les deux campagnes de fouille dans la Combe Chopin, la documentation établie représente 65 plans (planimétries, stratigraphies, coupes) dessinés au 1:20 et 151 clichés photographiques.

Le secteur B, le plus complexe, fit l'objet de trois décapages successifs, suivis d'autant de relevés. Quant aux autres surfaces, elles ne connurent qu'un seul décapage extensif.

En 1996, une campagne de sondages complémentaires fut entreprise dans la Combe Chopin (fig. 46), mais aucun nouveau vestige n'apparut.

75 Indicateur d'histoire et d'antiquités suisses 1863, 9/2, 13-14.

76 Ont participé aux campagnes de fouilles de 1995 ou 1996 sous la direction de Christophe Gerber assisté de Daniel Kissling et Martin Portmann: Antonio Bisaccia, Adriano Boschetti, Giuliana Censullo, Pierre Eichenberger, Chantal Gassmann, Béatrice Gyax, Christian Kündig, Beat Liechti, Marc Müller, Federico Rasder et Katharina Ruckstuhl.



Fig. 44: Roches - Combe Chopin. Emplacement du site fouillé en 1995/96. PK25, © 1996.



Fig. 45: Roches - Combe Chopin 1996. Vue générale du site prise depuis le Vevay en direction de l'est.

II. Les fours à chaux

Lors des travaux préliminaires à l'installation du chantier de la galerie de sondage du tunnel de Raimeux, trois fours à chaux ont fait l'objet d'une intervention archéologique. Deux possédaient encore une élévation assez bien conservée, alors que le troisième était très arasé, quoique sa gueule fut encore en place. Ces fours sont situés au pied d'un large cône d'éboulis constitués surtout de calcaires oolithiques du Dogger. C'est ce matériau qui fut exploité. La chaux vive ainsi produite a pu présenter des impuretés, en raison des oolithes ferrugineuses contenues dans la matière première!

1. Description des vestiges

A. Four 1

Le four 1 est circulaire, son diamètre intérieur atteint 315 cm au niveau du sol de la chambre de chauffe. Il a été aménagé dans une fosse creusée dans le terrain naturel argilo-graveleux (éboulis). Le manteau en moellons est conservé sur 100 cm en amont et 160 cm en aval. Pour ren-

forcer le secteur de la gueule, des blocs plus gros ont été utilisés. En raison de son bon état de conservation et de la possibilité de le protéger par un épais remblai durant les travaux autoroutiers, seule une moitié du four a été fouillée (fig. 47 et 49).

Gueule

L'élévation du four peut être restituée grâce à la marque en négatif laissée dans le terrain naturel par la charge incandescente, qui a formé une croûte de chaux de 220 cm de hauteur sur la paroi. Un sondage pratiqué à travers la paroi du four a montré que le vide situé entre le parement et le bord de la fosse d'implantation était comblé au moyen de fragments de calcaire de 2 à 3 cm d'arête, entassés à sec.

Chambre de chauffe

Elle est délimitée par un manteau de pierre (fig. 48) circulaire d'un diamètre moyen de 320 cm. De part et d'autre de la gueule, des blocs d'un plus grand calibre renforcent la partie du four la plus sollicitée. Une trace charbonneuse en forme de disque, visiblement confinée 20 à 30 cm en retrait de la maçonnerie, indique que la voûte prenait appui sur la sole horizontale et très compacte; elle fut trouvée recouverte d'une épaisse couche de charbons. Nous imaginons une voûte en berceau sur montants verticaux en raison de l'implantation très haute de la gueule. En admettant une gueule de 60 cm de hauteur, on peut estimer le volume de cette chambre à un minimum de 6 m³.

La base de la gueule est située très haut, à 135 cm au-dessus du sol du four. Elle mesure 60 cm de large pour une hauteur conservée de 60 cm environ. Nous supposons qu'une dalle de calcaire reposait sur les deux piliers conservés (fig. 49). A l'extérieur, la pente naturelle du terrain permettait l'économie d'une aire de chauffe. L'implantation élevée de la gueule, outre le fait qu'elle complique la réalisation de la voûte fermant la chambre de chauffe, réduit le volume de la chambre à calciner.

Laboratoire

Le volume du laboratoire dépend de la hauteur hors-tout que l'on prend en considération. En admettant une élévation de 4 m à partir de la sole, on obtient un volume de chargement de 39 m³ environ, ce qui autorise de classer l'installation dans la catégorie des grands fours.

Par sa morphologie, le four 1 se rattache aux fours semi-enterrés, c'est-à-dire à la Variante 2 définie dans le cadre de l'étude du site de Moutier - Combe Tenon (voir Partie 1, chap. II). Ce four se distingue par le fait qu'il connut une nouvelle affectation après son abandon, puisqu'il fut transformé en fosse de stockage pour la chaux hydratée. En effet, au-dessus de l'épaisse couche de charbon du foyer, une strate grisâtre assez ferme, constituée de cendres et de chaux recarbonatée marque le dernier niveau d'extraction de chaux vive du four 1. Par la suite, la grande dépression laissée vacante servit de creux d'extinction, ou à tout le moins de fosse de stockage. Pour preuve, l'épaisse

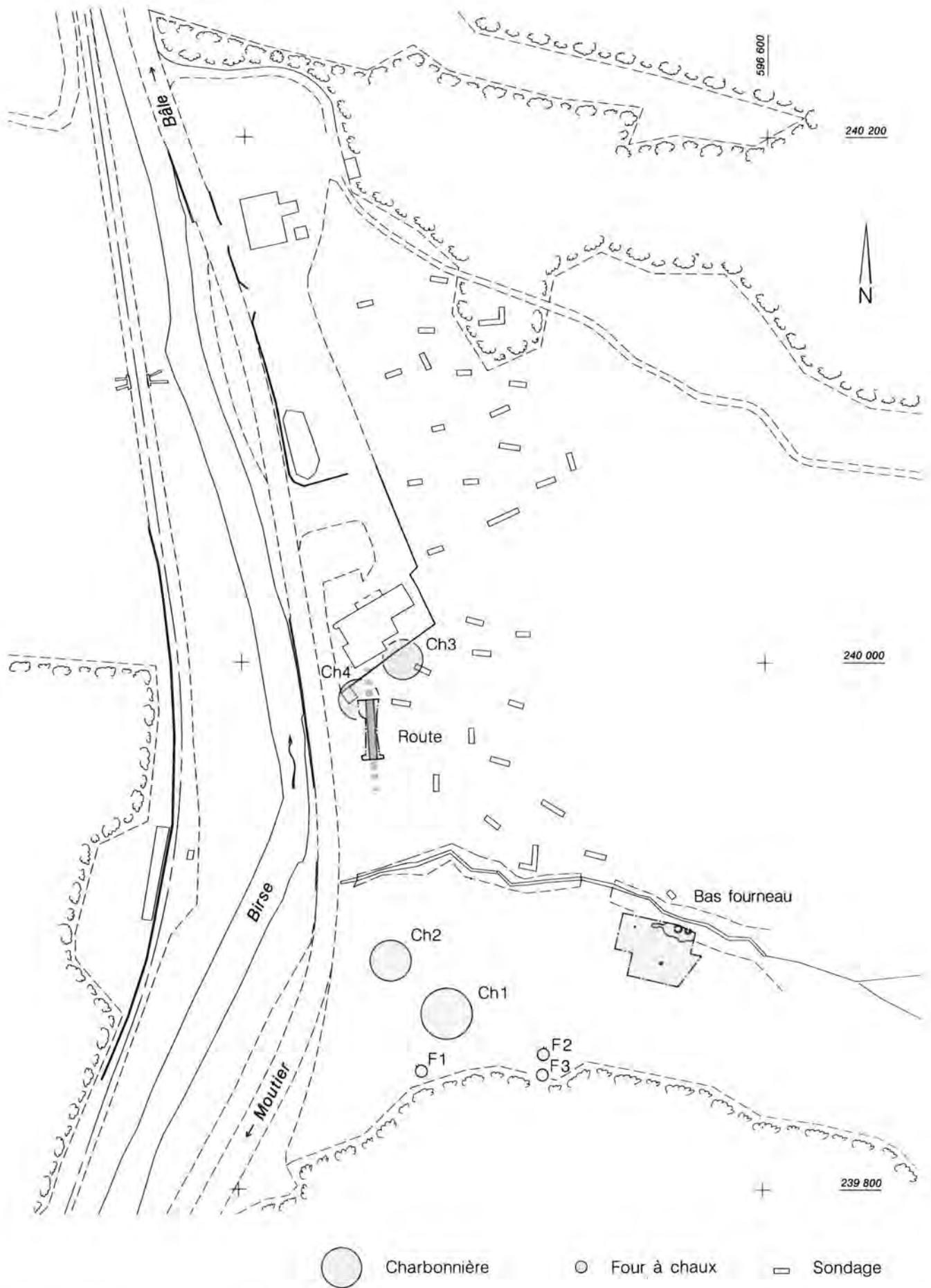


Fig. 46: Roches - Combe Chopin 1996. Plan de situation où figurent les principales structures mises au jour et les sondages de reconnaissance. Echelle 1:2000.



Fig. 47: Roches - Combe Chopin 1995. Vue plongeante dans le four à chaux 1, excavé pour moitié seulement. La masse blanchâtre est de la chaux hydratée parfaitement conservée. Au fond, on remarque la sole couverte de charbon.



Fig. 48: Roches - Combe Chopin 1995. Manteau de bloc monté à sec. Vue vers l'ouest en direction de la gueule.



Fig. 49: Roches - Combe Chopin 1995. Montants latéraux délimitant la gueule du four à chaux 1. Au premier plan, le niveau de circulation contemporain du four. Vue vers l'est.

couche de chaux hydratée encore crémeuse et parfaitement utilisable qui remplit le four. Par endroit, la couche s'est toutefois carbonatée retournant ainsi à son état initial solide, en raison d'une étanchéité insuffisante.

B. Four 2

Ce four est aménagé dans un creux excavé au sein des déblais du four 3. Sa forme est circulaire et son diamètre intérieur atteint en moyenne 370 cm. En élévation, le parement n'est conservé que sur 100 cm environ, ce qui représente trois à quatre assises de blocs (fig. 50). Il repose directement sur la sole du four qui fut aplanie avant la première cuisson. Une couche peu épaisse, mais solidifiée, d'argile rubéfiée mêlée de chaux et de cendres recouvre le fond du four; il s'agit d'un niveau pietiné lors de l'extraction de la chaux. Les parois sont partiellement couvertes de chaux çà et là encore crémeuse (chaux hydratée naturellement?).

Chambre de chauffe

Malgré leur état de conservation moyen, les vestiges permettent une reconstitution du four. Le sol du foyer dans son ensemble montre un fort durcissement qui indique un large foyer. La gueule est implantée près d'un demi-mètre plus bas que celle du four 1; cela suppose l'existence d'une large voûte, dont le départ serait matérialisé par l'anneau de pierres restant. Comme aucune banquette n'a été repérée lors de la fouille, nous supposons que la voûte prenait appui à même le sol du foyer, comme dans le cas des fours 1 et 3. Pour l'édification de la voûte, un échafaudage de bois était nécessaire. Les cinq poteaux carbonisés disposés de manière régulière dans la chambre de chauffe (fig. 51) auraient pu matérialiser cette construction temporaire, mais leur disposition porte plutôt à croire qu'il s'agit de perches servant de cheminées. Le volume de la chambre de chauffe demeure assez difficile à estimer, toutefois nous pensons que celui-ci devait atteindre environ 10 m³.

Gueule

Orientée vers l'amont, la gueule est implantée 90 cm au-dessus de la base du foyer. Elle mesure 80 cm de largeur et sa hauteur conservée est de 40 cm environ. Elle s'ouvre en trapèze vers l'extérieur où elle atteint 150 cm de large (fig. 52). Sa base est formée par une grande dalle calcaire posée à l'entrée de la chambre de chauffe. La fouille des différents niveaux n'a pas révélé d'aire de chauffe.

Dans ce four, nous avons pu mettre en évidence le «bouchon» (fig. 52, 53), constitué de blocs calcaires et d'argile, qui obturait la gueule et bloquait l'arrivée d'air, lorsque le processus de calcination était achevé.

Laboratoire

Sur la base des observations archéologiques, nous devons restituer une chambre de chauffe, dont le sommet est altimétriquement plus élevé que le niveau de circulation re-

péré autour du four. Dès lors, le laboratoire se développait hors du sol, sur plusieurs mètres de hauteur, et rendait nécessaire la confection d'un manteau argileux isolant recouvrant l'ensemble de la charge. Pour une hauteur hors terre estimée à 3,5 m, on obtient un volume de charge de 60 m³ environ, ce qui est considérable.

Le four 2 apparaît comme un cas un peu hybride, puisque les assises de blocs délimitant la chambre de chauffe reposent sur la sole, comme pour les fours à chaux de la Variante 2. Toutefois, la partie enterrée du laboratoire reste très limitée. L'emplacement et la forme de la voûte ne peuvent être précisés. Finalement, ce four se rattache plutôt à la Variante 1, celle des fours de surface.

C. Four 3

Ce four (fig. 54), en partie recouvert par des éboulis récents, a été découvert dans une tranchée lors des sondages préliminaires. D'un point de vue stratigraphique, il est antérieur au four 2. De forme ovale, le four mesure 260 cm par 290 cm au niveau du foyer. Son parement, conservé sur sept assises est constitué de moellons de 15 à 25 cm de côté, jointoyés avec un peu d'argile.

Chambre de chauffe

Dans la mesure où le parement stabilisateur est de forme ovale, la chambre de chauffe devait certainement respecter ce plan. La voûte n'a laissé aucune trace d'appui sur la sole durcie, mais on peut penser qu'il s'agissait d'une voûte en berceau semblable à celle du four 1, ce qui aurait permis de conserver un maximum de volume de charge à disposition. Le volume de la chambre de chauffe peut être estimé à 5 m³.

Gueule

La gueule n'a pas été retrouvée en place. Lors du creusage mécanique d'une tranchée, une épaisse dalle calcaire disposée horizontalement sous une trentaine de centimètres d'humus, fut arrachée. A ce moment, nous ne soupçonnions pas même l'existence d'un four aussi proche du four 2. Comme la topographie ne permet pas d'orienter le four au sud, puisque le cône d'éboulis débute immédiatement après le four, il nous faut la restituer plutôt au nord, éventuellement au nord-ouest ou nord-est. Les rares observations faites lors du creusage de la tranchée, notamment la présence de cette grande dalle, confirment cette idée. Nous pouvons donc déduire au vu des vestiges que la gueule du four 3 s'élevait environ un mètre au-dessus de la sole.

Laboratoire

L'élévation du parement du four est conservée sur près de 160 cm. Les restes d'argile rubéfiée découverts dans le remplissage du four attestent la présence d'un manteau d'isolation. Pour une hauteur hors-tout de 4 m, on peut estimer le volume à calciner à 35 m³.

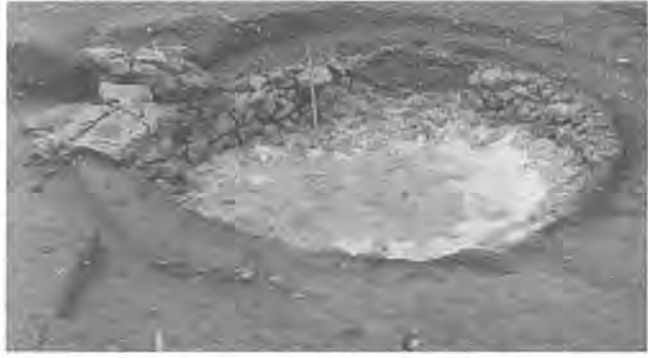


Fig. 50: Roches - Combe Chopin 1995. Vue générale du four à chaux 2. On distingue la gueule (à droite), le manteau pierreux ainsi que des restes de chaux fusée.



Fig. 51: Roches - Combe Chopin 1995. Cinq poteaux en partie calcinés ont été dégagés sur la sole du four à chaux 2; un sixième se cachait peut-être sous le quartier non fouillé à gauche du mètre. Vue plongeante en direction de la gueule, vers l'est.



Fig. 52: Roches - Combe Chopin 1995. Détail du bouchon (blocs calcaires) obstruant volontairement la gueule. On remarque la grande dalle marquant l'entrée du four. Vue en direction du four.



Fig. 53: Roches - Combe Chopin 1995. Détail du bouchon (blocs calcaires) obstruant la gueule, vue depuis l'intérieur du four.



Fig. 54: Roches - Combe Chopin 1995. Four à chaux 3 après dégagement partiel. On remarque encore une partie du manteau pierreux délimitant les chambres de chauffe et de calcination. Vue vers le sud.

2. Conclusion

Les trois fours sont de taille plus ou moins équivalente quoique le four 3 soit tout de même plus petit. Les deux variantes de fours décrites à Moutier - Combe Tenon (fig. 29 et 40) se retrouvent à Roches. La mise en évidence d'éléments appartenant à la ventilation interne de l'installation constitue une découverte assez intéressante. Ainsi, les fours de Roches complètent-ils notablement les observations réalisées à l'occasion des fouilles de Moutier, réalisées deux ans plus tard. Une planche de relevés et un tableau récapitulatif synthétisent les données recueillies (fig. 55 et tab. 7).

3. Datation

L'absence de matériel archéologique datant (un seul tesson céramique dans ce secteur) ne permet pas une grande précision chronologique. Deux échantillons de charbon ont été datés par la méthode du radiocarbone et les résultats obtenus confirment une datation récente pour au moins deux des trois fours à chaux. Le four 1 est daté de 105 +/- 55 BP, alors que le four 2 remonte lui à 65 +/- 60 BP.⁷⁷ La chronologie relative indique que le four 3 est antérieur au four 2 daté du XIX^e siècle, mais postérieur au XVII^e siècle (terminus post quem livré par un tesson de céramique à glaçure interne brun clair).

Tab. 7: Roches - Combe Chopin 1995. Données techniques mesurées et estimées des fours à chaux

	Four 1	Four 2	Four 3
Diamètre du foyer m	2.6/3.0	3.4/3.8	2.3/2.6 ?
Diamètre intérieur (base) m	3.2/3.6	3.4/3.8	2.6/2.8
Diamètre intérieur (gueule) m	?	?	-
Diamètre extérieur (charge) m	3.9	4.0/4.4	3.3/4.0
Diamètre total (y c. isolation) m	env. 5.0	env. 6.2	env. 4.5/5.2
Hauteur conservée m	2.2	1.0	1.6
Dimensions gueule (l/ h/ p) m	0.6/±0.5/0.8	0.8/±0.35/ 1.2	-
Hauteur gueule s/ sole m	1.35	0.9	-
Hauteur gueule s/ fosse m	-	-	-
Volume chambre de chauffe m ³ *	12	24?	8
Volume de la charge m ³ **	24	23	22
Volume manteau isolant m ³ *** (épaisseur estimée à 0.6 m)	10	18	12
Forme générale	circulaire	ovale	ovale
Fosse de travail	non	non	non
Gueule orientée vers	aval	amont	// pente ?
Gueule orientée à	nord-ouest	nord-est	nord ?
Boisage extérieur observé	non	non	non
Nombre de cuissons attestées	1	1	1
Datation absolue ou relative	105 ±55BP	65 ±60 BP	antérieur au four 2

* Volume de la demi-sphère: $V = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot h^3$

** Volume du manteau: $V = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \text{côté} \cdot (D + d) \cdot \text{épaisseur}$

*** Diamètre moyen (d) = $\frac{1}{2} \cdot (d \text{ base} + d \text{ charge})$; h = 4 m. Volume du cylindre = $(\frac{1}{2} \cdot d)^2 \cdot \pi \cdot h$

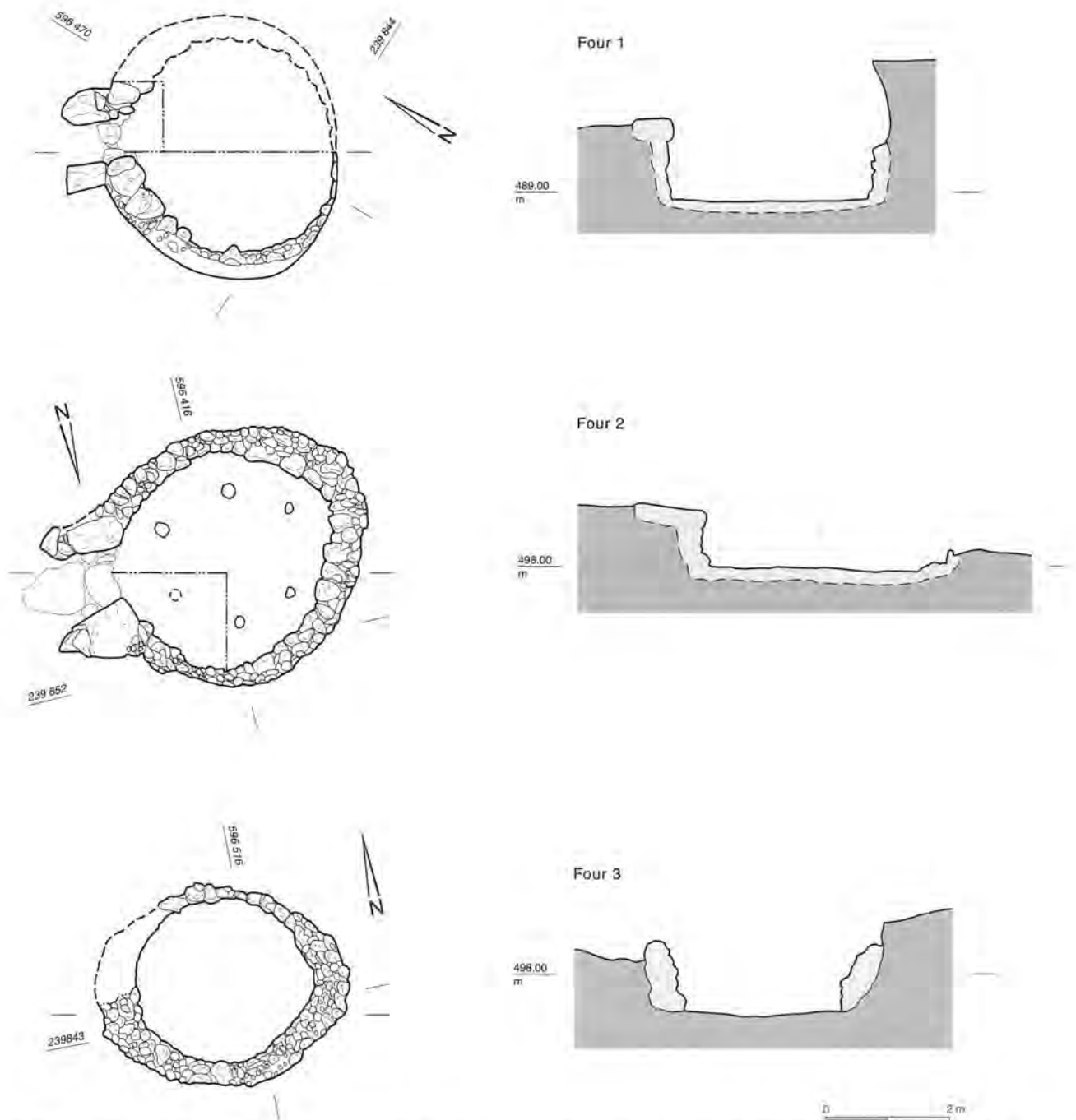


Fig. 55: Roches - Combe Chopin 1995. Tableau comparatif des plans et coupes des trois fours à chaux fouillés. Trame claire: vestiges du four, trame foncée: terrain naturel. Echelle 1:100.

III. Les charbonnières

En automne 1995, les décapages de terre végétale qui ont précédé les travaux d'installation du chantier de la galerie de reconnaissance du Raimeux, ont révélé une première paire de charbonnières. Une seconde paire est apparue en 1996, lors de la fouille d'un tronçon de route et durant la campagne de sondages.

Le toponyme «La Charbonnière», qui figure encore sur le plan cadastral actuel, ne laissait d'ailleurs aucun doute quant à l'existence de lieux de charbonnage dans le sec-

teur, mais il était difficile de les localiser durant la phase de prospection pédestre. Toutefois, la topographie mouvementée et la forte déclivité du secteur restreignaient considérablement les opportunités d'implantation des meules. Les zones relativement planes du bas de la Combe

77 Echantillons n° inv. UZ-3913/ETH-15451 et UZ-3914/ETH-15452 préparés par le Laboratoire radiocarbène de l'Institut de géographie de l'Université de Zurich (GIUZ) et datés au moyen de la technique AMS sur l'accélérateur Tandem de l'Institut de physique des particules de l'ETH-Hönggerberg.



copié d'après nature par P. Birman

La Charbonnière.

se trouve à Basle chez P. Birman.

Gravé par F. Hugi

Fig. 56: Roches - La Charbonnière. Charbonniers au travail.

Chopin, favorisées par la proximité de l'ancienne route et de la rivière, paraissaient les mieux adaptées à la cuisson du charbon.

Une gravure à l'eau-forte, exécutée d'après un dessin de P. Birman, illustrant le *Voyage pittoresque de Basle à Bienne* paru en 1802, représente des charbonniers qui dressent une meule de bois. La scène se déroule au bord de la Birse, à proximité d'un pont de bois et d'une hutte de planches et rondins adossée aux rochers (fig. 56). Vers la gauche une seconde meule est en train de cuire.

Dans la série d'aquatintes qui accompagnent l'ouvrage, Birman s'est évertué à restituer les lieux avec une grande fidélité. Aussi, doit-on penser qu'il observa réellement cette scène de charbonnage, qui porte comme titre *La Charbonnière*. Le site même, qui a sans doute subi de profondes modifications topographiques au cours des réaménagements successifs de la route cantonale et de la réalisation de la ligne ferroviaire Moutier – Delémont ouverte en 1876, reste en effet difficile à identifier.

Visiblement ce lieu se trouvait au bord de la Birse, peut-être à l'emplacement de l'actuelle place d'évitement (env. 596°370/239°800), si ce n'est carrément sur l'autre rive.

1. Description des vestiges

L'endroit paraît bien choisi, bien que le terrain ait dû être aplani au préalable pour l'édification des meules 1 et 2. La rivière et le ruisseau qui coulent à proximité, constituent la source d'eau nécessaire au mouillage du poussier recouvrant la meule et à l'extinction des charbons lors de l'extraction. L'accès aux meules est aisé, puisque la route des gorges passe à quelques mètres. La charbonnière 3 a même été aménagée sur la route désaffectée au XIXe siècle. Les vestiges des meules 1 et 2 étaient recouverts par des colluvions limono-argileux mêlés de graviers calcaires qui apparaissaient directement sous l'humus. Aucune stratigraphie n'a été relevée. La nature du sous-sol (très argileux par endroit), la forte déclivité du terrain et les mauvaises conditions météorologiques ont passablement perturbé les travaux de décapage, ce qui a conduit à la destruction partielle des charbonnières 1 et 2. Toutefois, les travaux de documentation planimétriques se sont déroulés dans de bonnes conditions, même si nous nous trouvons dans une situation d'urgence dans le périmètre de la piste d'accès au portail nord du tunnel de Raimeux.

A. Charbonnière 1

La charbonnière 1 (fig. 57 et 58) présentait un état de conservation moyen, puisque seule sa partie amont était encore conservée. Quelques lambeaux argileux fortement rubéfiés matérialisaient son extension vers l'aval. La couche charbonneuse pulvérulente atteignait par endroit 15 à 20 cm d'épaisseur et contenait de gros morceaux de charbon. Il s'agit certainement de la couche de poussier que les charbonniers étalent volontiers avant l'édification de la meule, pour la protéger des remontées humides et garantir une bonne cuisson de l'étage inférieur. On peut estimer le diamètre de la meule à 14 m environ.

Avant l'édification de la meule, le terrain dut être aménagé: la partie amont fut excavée jusqu'au terrain naturel et le matériau extrait déposé en aval (remblais). Après son abandon, le site fut recouvert par des colluvions de pente et des éboulis qui gommèrent totalement le replat de la place de charbonnage. La pente était redevenue régulière, si bien qu'on ne remarquait plus aucune anomalie.

En l'absence de tout matériel archéologique datant, la méthode du radiocarbone était la seule manière de situer dans le temps l'activité charbonnière. Un échantillon de bois carbonisé prélevé au sein des restes charbonneux a livré une datation ^{14}C brute de $405 \pm 55 \text{ BP}^{78}$ qui, calibrée à 2 sigma, fournit une fourchette chronologique située entre 1433 et 1635 (intervalle de 95,4% de confiance, avec pics de probabilité à 1422, 1470 et 1643). Il s'agit de la seule datation ^{14}C effectuée sur la meule 1, mais celle-ci suffit à situer grossièrement l'époque de cette première charbonnière.



Fig. 57: Roches - Combe Chopin 1995. Vue des vestiges de la charbonnière 1. Vue vers le sud-ouest.



Fig. 58: Roches - Combe Chopin 1995. Vue des vestiges de la charbonnière 1. Vue vers le nord.

B. Charbonnière 2

La seconde charbonnière (fig. 59) est apparue dans le Sondage 5, une dizaine de mètres en contrebas de la meule 1. Elle se présentait sous la forme d'une couche charbonneuse de 10 cm d'épaisseur recouverte de colluvions graveleuses. L'interprétation des vestiges ne fut possible qu'à la suite du décapage général de la surface. De la meule, il ne restait plus qu'une bande charbonneuse de 1,5 m de large, dessinant une courbe peu prononcée. Partiellement détruite lors de l'aménagement du chemin de pâturage, cette meule était mutilée, si bien que son diamètre initial reste difficile à envisager. On peut toutefois l'estimer à une dizaine de mètres. Cette seconde meule n'a fait l'objet d'aucune analyse particulière. La proximité des deux premières meules et leur recouvrement par une couche de colluvions identique et de même épaisseur suggèrent une certaine contemporanéité des deux structures.

C. Charbonnière 3

En 1996, lors du décapage de la terre végétale recouvrant l'ancienne route des gorges, une troisième place de charbonnage (fig. 60) a été mise au jour. Celle-ci repose sur le

78 L'échantillon (ETH-15002/UZ-3875) préparé par le Laboratoire de Radiocarbone de l'Institut de Géographie de Zurich (GIUZ) a été daté par la méthode AMS (accelerator mass spectrometry) sur l'accélérateur Tandem de l'Institut de Physique des particules de l'EPFZ-Hönggerberg à Zurich.



Fig. 59: Roches - Combe Chopin 1995. Vue des maigres restes de la charbonnière 2, perturbés au centre par un sondage mécanique. Vue vers l'ouest.



Fig. 60: Roches - Combe Chopin/Charbonnière 1996. Vue de la charbonnière 3 aménagée sur l'ancienne route des gorges. A l'arrière plan, masqué par des arbres, le restaurant La Charbonnière. Vue vers le nord.

dernier niveau de route (6). Bien que la meule fut relativement bien conservée, seule une moitié a été dégagée. Une tranchée profonde recoupant la route à angle droit (coupe nord) forme la stratigraphie de référence et permet d'établir la chronologie relative du site. La chaleur dégagée au cours de la carbonisation a engendré la dégradation du revêtement routier: éclatement et rubéfaction des graviers. L'installation de cette meule sur la route ne fut possible qu'après l'abandon de cette portion de tracé. Un plan exécuté après 1825 (fig. 65) indique les changements notoires apportés au tracé routier à cet endroit précis.⁷⁹ La charbonnière 3 est donc postérieure à cette date.

D. Charbonnière 4

Une quatrième meule est apparue immédiatement sous l'humus lors des sondages mécaniques préliminaires pratiqués au sein de l'emprise d'installation de chantier. Située à proximité immédiate de l'arrière-cour du restaurant actuel de La Charbonnière, la meule 4 avait été fortement perturbée par la mise en terre de nouvelles lignes téléphoniques. Sa situation en limite d'emprise, dans un secteur particulièrement perturbé, nous a incité à ne pas poursuivre le dégagement de la meule. Un relevé succinct a été établi, puis la tranchée fut remblayée. Affleurant sous l'humus, à peu de distance l'une de l'autre, les meules 3 et 4 sont assurément contemporaines et récentes, la meule 3 décrite précédemment remonte au XIXe siècle.

Une cinquième meule a peut-être existé sous le four à chaux 2. Malheureusement, les impératifs du chantier, ne nous ont pas permis de l'étudier en détail. Elle apparaissait sous la forme d'une trace charbonneuse horizontale de 8

à 10 cm d'épaisseur visible sur près de 8 mètres.⁸⁰ Aucune datation n'a été réalisée.

En l'absence de prélèvements d'échantillons de charbon de bois, aucune analyse des essences charbonnées ne peut être menée. On peut relever cependant que dans la forêt actuelle de la Combe Chopin, les essences dominantes sont le hêtre et l'épicéa, mêlés de quelques autres feuillus. L'épicéa reste abondant dans les secteurs ombragés de l'envers de la combe.

2. Charbon de bois et sidérurgie

A partir du XVIe siècle, la forêt jurassienne connaît une exploitation de plus en plus vive qui connaîtra son apogée au cours des XVIIIe et XIXe siècles. La politique de développement économique engagée par le prince-évêque Jacques-Christophe Blarer de Wartensee dès la fin du XVIe siècle et durant les premières décennies du siècle suivant, donnera naissance à plusieurs complexes sidérurgiques d'importance, notamment à Undervelier et à Courrendlin. Le choix d'implantation de ces sites dépendait de plusieurs critères, dont celui de la proximité de grandes forêts à charbonner, n'était assurément pas des moindres. En effet, les hauts fourneaux et les nombreuses forges établis dans les vallées de Delémont et de la Birse consommaient d'énormes quantités de charbon de bois. Rapidement les forêts environnantes ne suffirent plus à alimenter les four-

⁷⁹ STAB AA VIII V4.

⁸⁰ Couches 20a et 20b de la documentation de fouille

neaux. Il fallait charbonner toujours plus loin et toujours plus haut, jusque dans les forêts des hautes-joux⁸¹ de la vallée de la Birse, du Petit-Val et du Cornet.⁸²

Mais revenons à notre site de la Combe Chopin. Demandons-nous à qui pouvait profiter ce charbon de bois? Les archives ne signalent aucune forge à Roches, qui vers 1576, ne comptait encore que trois maisons.⁸³ Moulins et scierie ne furent établis que plus tard, autour du XVIIIe siècle. Il y avait peut-être bien une forge à Moutier, au fil de la Birse, mais l'exploitation des forêts locales devait suffire à l'alimentation de ses foyers peu gourmands. Il n'y avait donc aucune raison pour que l'on exploite des forêts plus éloignées. Il nous faut donc admettre que le charbon produit par les plus anciennes meules repérées à la Combe Chopin, soit les meules 1 et 2, était acheminé en dehors du territoire de Roches. La datation radiocarbone obtenue sur la meule 1 ne fournit qu'une indication chronologique à manier avec précaution. On ne peut en effet pas exclure que l'échantillon provienne d'un arbre âgé.

En 1604 un haut fourneau est construit à Courrendlin, à une petite dizaine de kilomètres au nord de Roches, dans un secteur qui ne comptait pas encore d'installation industrielle de ce type et qui offrait certainement de belles réserves forestières à exploiter.

Nous avons retrouvé un contrat daté du 5 avril 1698⁸⁴ accordant aux charbonniers Bockstaller, de Vicques, le droit de charbonner un «canton de bois (...) dit et appelé la Combe Chopin». Le charbon obtenu fut livré en 1699 aux forges de Courrendlin au prix de deux sols et six deniers bâlois le cuveau.

Cette combe à la topographie mouvementée n'offrait guère de possibilité à l'établissement de meules à charbon, si ce n'est en bordure de route ou de rivière.

Nous sommes donc tentés de mettre en relation l'exploitation des richesses forestières de cette combe avec les importants besoins en charbon du site sidérurgique de Courrendlin.

Le Registre des bois exploités dans les hautes-joux⁸⁵ révèle qu'au XVIIIe siècle encore, les forêts des vallées de Delémont et Moutier Grandval alimentaient toujours les forges et fourneaux d'Undervelier et Courrendlin. On y apprend en outre que la Combe Chopin était déjà un pâturage en 1770, ce qui suppose une exploitation assez intense auparavant.⁸⁶ Nous notons même que le bois coupé dans la Combe de la Belle Face fut transporté à la Combe Chopin, soit deux kilomètres plus loin, pour y être charbonné par un dénommé Joseph Kauffmann, d'Oberdorf.⁸⁷

La production s'est élevée à 532 cuveaux⁸⁸ (61,1 tonnes) de charbon pour l'année 1785 et 1997 cuveaux (229,6 tonnes) pour l'année 1786. Le volume de charbon produit durant ces deux années consécutives correspond à celui de 26 meules de 110 stères environ, à l'image de celle dressée à Bassecourt en 1982.

Le Registre précise dans son Inventaire des hautes-joux, dressé en 1787, que sur le territoire de Roches, 115^{1/4} journeaux pourraient encore produire 7500 cuveaux de charbon (862,5 tonnes ou 86 meules environ). Cette réserve n'a probablement pas été charbonnée, en tout cas nous n'en avons trouvé aucune trace dans les archives consultées.

Depuis la construction de la meule jusqu'à l'extraction du charbon un mois pouvait facilement s'écouler. A cela s'ajoute encore le temps nécessaire à la préparation du bois: abattage, élaguage, sciage et acheminement sur la place de charbonnage. A ce rythme-là, les charbonniers de la Combe Chopin auraient dû construire quelque 22 meules en une année pour assurer une production de 229 tonnes de charbon. Or à raison d'un mois de travail minimum par meule – en admettant que le bois est acheminé sur place par d'autres ouvriers – une seule place de charbonnage ne suffit pas; deux à trois emplacements sont nécessaires. L'exploitation en parallèle de plusieurs sites de production proches améliore sensiblement le rendement, même si elle nécessite plus de personnel. Pendant qu'une meule cuit, une seconde peut être construite, alors que le charbon pourrait même être extrait d'une troisième. Ainsi, on parviendrait sans autre à cuire 22 meules par an.

Les maigres traces charbonneuses découvertes à la Combe Chopin n'autorisent aucune restitution de l'élévation de la meule. De surcroît, les pourtours de meule relevés ne correspondent pas forcément à l'emprise effective de la meule; une certaine dispersion de charbons a pu se produire lors de l'extraction.

3. Exploitation des forêts

Enfin, il n'est pas lieu ici de détailler les difficultés rencontrées par les charbonniers professionnels sous contrat pour fournir en charbon de bonne qualité tel fourneau ou telle forge. Des conflits ont du reste éclaté à maintes reprises entre ces charbonniers et quelques amateurs qui cuisaient occasionnellement du mauvais bois ou une partie de leur forêt privée, afin d'améliorer leur quotidien. La question du déboisement et de l'exploitation des forêts

81 Les hautes-joux sont des domaines princiers sis en altitude en général abornés.

82 Petites vallées latérales à l'est et l'ouest de Moutier.

83 Document dénombrant les domos de la Prévôté de Moutier-Grandval; AAEB B 245/45 MG (ca. 1576).

84 AAEB A 55/24 MG, Bois et Forêts (1326–1788), document daté 5 avril 1698 et signé Lansard?

85 AAEB B 134/32 Mines. Registre des bois (1746–1786). Les pages 139–142 et 210 concernent Roches. Les hautes-joux sont des domaines princiers en général abornés.

86 Registre des bois, p. 141.

87 Au nord de Soleure; Registre des bois, p. 140.

88 Quiquerez 1855, tableaux 1 et 2: un cuveau de charbon valait 230 livres, soit 115 kilogrammes.

étaient sévèrement réglées par différentes Ordonnances princières.

Nous remarquons avec intérêt que la Table générale des arts et métiers de 1770⁸⁹ ne signale qu'un seul charbonnier pour la Prévôté de Moutier-Grandval, alors que le Baillage de Delémont où se concentrait une bonne partie des exploitations sidérurgiques (hauts fourneaux et forges) en compte 15. Pour autant que les chiffres énumérés soient complets et reflètent la réalité, nous devons donc envisager des charbonniers qui se déplacent d'une commune ou d'une seigneurie à l'autre, au gré des contrats de charbonnages obtenus. Le charbonnier est donc régulièrement amené à exercer son métier en dehors de son lieu d'établissement, à l'écart de ses proches.

IV. La route des gorges de Moutier

Les prospections pédestres effectuées entre Moutier et Choindex ont montré qu'il ne subsistait quasiment rien de l'ancien tracé de la route des gorges. Celui-ci a presque totalement disparu suite aux grands réaménagements routiers du XIXe siècle. Quiquerez avait observé un tronçon de route à rainures taillées en 1862, lors de travaux à la



Fig. 61: Roches - Combe Chopin/Charbonnière 1996. Vue de l'ancienne route des gorges aujourd'hui délaissée dans un pâturage. Vue vers le nord.

hauteur du moulin de Roches.⁹⁰ De nos jours, le seul tronçon conservé se situe justement dans la Combe Chopin, entre le transformateur des Forces motrices bernoises et le restaurant La Charbonnière. Il apparaît sous la forme d'un replat bordé par un talus naturel en amont (fig. 61) et par un accotement en bourrelet vers l'aval. Comme ces vestiges pouvaient être en partie menacés par les travaux d'installations de chantier, une fouille s'avérait nécessaire. Un tiers de la route, soit environ 20 m, fut fouillé en 1996; les deux tiers restants ont pu être exclus de la zone de chantier et bénéficient ainsi d'une mise sous protection.

1. Description des vestiges

Deux niveaux de routes principaux ont fait l'objet d'un relevé et d'une analyse systématique: le premier et l'avant-dernier état. En outre, une place à charbon installée sur le replat formé par l'ultime niveau de la chaussée a également été fouillée. Les travaux ont débuté par une tranchée de reconnaissance creusée au sud. Celle-ci forme la limite de fouille sud. Ensuite, nous avons procédé au décapage de la route proprement dit. L'ultime niveau étant mal conservé, nous avons gratté les fines recharges graveleuses jusqu'à la mise à nu d'un niveau de route convenable. Ainsi, ce sont entre 5 et 15 cm de revêtement (couche 8) qui ont été éliminés. Dans la moitié nord de la fouille la couche était plus importante. Afin de relever la place à charbon découverte à l'extrémité nord de la fouille, seule une bande de route de la largeur de la pelle mécanique a été dégagée. Une seconde tranchée transversale (stratigraphie nord) a ensuite été creusée à proximité du restaurant La Charbonnière.

Comme cette stratigraphie révélait une succession de recharges et remblais qui n'étaient pas visibles au sein de la première tranchée, nous avons décidé de dégager le niveau de route le plus ancien (26). Celui-ci fut dégagé à la pelle rétro du nord au sud. A mesure que l'on s'approchait de la tranchée sud, la route devenait de plus en plus difficile à distinguer des fines recharges successives, si bien que le tiers restant fut dégagé à la main.

L'accotement amont n'a été fouillé que sur quelques mètres à proximité de la coupe nord; le reste avait été détruit lors de la pose d'une ligne téléphonique. Quant à l'accotement aval, il n'a pas été dégagé pour deux raisons: d'une part, il faisait office de remblai de protection contre d'éventuelles chutes de pierres sur l'actuelle route cantonale très fréquentée et située quelques mètres plus bas, et d'autre part, il servait à l'entreposage d'une partie des matériaux d'excavation.

89 Panorama jurassien II 1981, annexe p. 195.

90 Quiquerez 1863, 13-14.

A. La route: premier état

Le plus ancien niveau de route (fig. 62 et 63) repéré dans ce secteur a été aménagé sur un remblai (28) comblant les inégalités du terrain naturel (16), constitué d'anciens matériaux glissés et éboulés. La route se présente sous la forme d'un empierré peu épais, constitué de petits blocs et galets calcaires, dont la partie supérieure est très usée. En coupe, l'empierrement 26 reste difficile à distinguer du remblai sous-jacent (28), au contraire des fins dépôts argilo-sableux (boues de route). La largeur maximale mesurée atteint 340 cm au niveau de la coupe nord. Vers le sud, le bord amont de la route a été détruit en 1995 lors de la pose d'une nouvelle ligne téléphonique.

A l'origine, le niveau de circulation devait être relativement horizontal. Il n'est d'ailleurs pas exclu qu'il se soit étendu un peu plus en amont, entre les axes 452 et 454, car dans le prolongement du niveau de circulation, on remarque que la partie supérieure du terrain naturel a été arasée. Il peut s'agir d'une intervention contemporaine ou postérieure à la construction de la route. L'accotement amont fut ensuite progressivement recouvert par des dépôts de pente (5).



Fig. 62: Roches - Combe Chopin/Charbonnière 1996. Ancienne route empierrée, dont le revêtement est marqué de plusieurs ornières d'usure. Vue vers le sud.

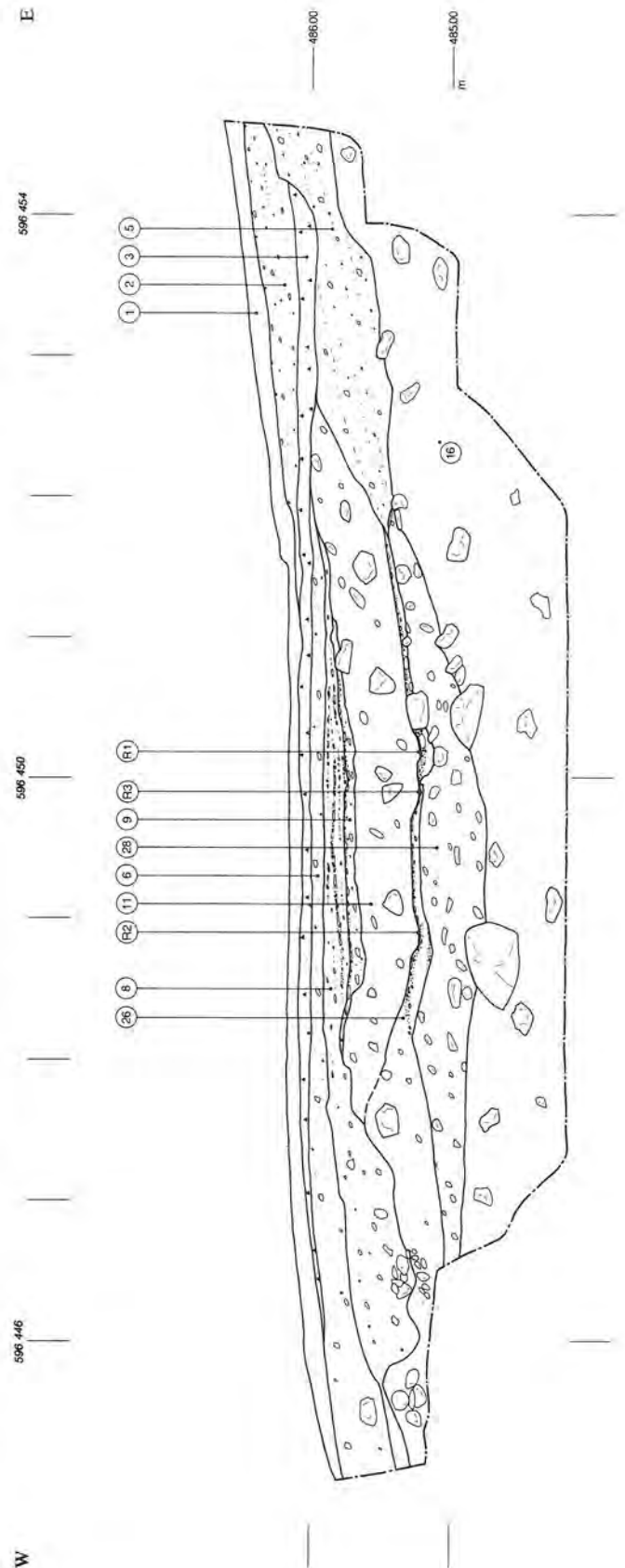


Fig. 63: Roches - Combe Chopin/Charbonnière 1996. Ancienne route: coupe transversale. Echelle 1:50.

Au fil du temps, le radier se tassant et le revêtement s'usant, l'ensemble de la route s'affaissa peu à peu. L'accotement aval, formé par les matériaux excédentaires et les rejets issus de l'entretien de la chaussée se développait au fil du temps et finit par créer une véritable cuvette. La bande de roulement pris un aspect légèrement bombé entre les ornières. Le tassement général s'explique en partie par la faible compacité du terrain naturel, constitué surtout d'éboulis à matrice argilo-limoneuse, voire sableuse par endroit. Sur les 20 m dégagés, la chaussée a une pente moyenne de 6,4%; elle descend vers le nord. La surface de roulement est très compacte et recouverte de fins dépôts argilo-sableux gris (boues de route), dont l'épaisseur varie entre 1 et 5 cm. A mesure que l'on remonte vers le sud, l'épaisseur du radier et du remblai sous-jacent diminue, disparaissant complètement à la hauteur de la tranchée sud (limite de fouille), où les chaussées 26 et 9 se confondent.

Plusieurs ornières se détachent sur la bande médiane de la route (fig. 64), mais une seule paire (R1/R2), dont l'écartement interaxe atteint 135 cm, peut être suivie sur la totalité de la section dégagée. Les ornières R3 et R4, dont l'écart interaxe est identique à la paire précédente, peuvent également être associées. La lecture des traces permet encore d'envisager un fonctionnement croisé entre ces deux paires, soit R1/R4 et R2/R3, pour un écartement interaxe moyen de 110 cm environ. La cinquième ornière (R5), située en amont de R1, doit être associée à R2 (135 cm), éventuellement à R4 (175 cm). Mais cette ultime variante paraît peu probable dans la mesure où elle n'est pas attestée ailleurs sur notre tracé. De surcroît, l'ornière R5 s'est formée dans un secteur où le revêtement était défoncé (apparition de gros blocs pris dans le terrain naturel). Quant à la largeur des ornières, nous constatons qu'elle est liée à l'écartement interaxe, donc sans doute aussi à la taille du char. En effet, aux chars à faible écartement (110 cm par exemple) correspond une largeur d'ornière de 4 à 8 cm, alors qu'aux chars à écartement large, plus lourds, correspondent des traces 12 à 15 cm de large. Ces mesures ont été relevées dans les secteurs où les traces étaient bien marquées.

En résumé, on retiendra que deux écartements principaux se détachent sur la chaussée 26, ainsi que sur les dépôts de boues routières: 110 cm et 135 cm. Même si aucun enseignement chronologique ne peut être tiré de ces mesures interaxiales, il n'en reste pas moins intéressant de les confronter aux indications de Quiquerez.⁹¹ En effet, le chercheur jurassien a mesuré une largeur de route hors tout de 120 cm, ce qui – en soustrayant la moitié de chacune des deux rainures – équivaut bien au plus petit écartement interaxial, soit 110 cm, observé sur le premier état de notre route.

B. La route: avant-dernier et ultime états

Le second niveau fouillé correspond à peu de chose près à l'avant-dernier état, soit à la route 9. Une petite incertitude demeure çà et là en raison de la difficulté qu'a représenté le décapage mécanique de ce niveau, dont les recharges parfois très localisées s'arrêtaient après quelques décimètres. On peut donc considérer qu'il s'agit ici d'un niveau moyen: route 9 avec quelques éléments du niveau 8, plus récent.

Par rapport à la route 26, la nouvelle chaussée est plus large et atteint environ 5 m. Elle repose sur un épais remblai (11), localisé surtout dans la moitié nord du tronçon dégagé, qui compense sensiblement la pente générale de la chaussée précédente. Le niveau de circulation en léger dévers est recouvert d'une fine couche de boue routière grise. Quelques ornières marquent la bande de roulement. Elles offrent une distance interaxiales de 104 et 140 cm environ. La largeur des ornières ne paraît pas significative ici, puisque dans les deux cas, elle oscille entre 8 et 11 cm. L'ultime état, soit la phase la plus récente de cette route, n'a fait l'objet d'aucun relevé, car elle ne remonte au plus tôt qu'à la fin du XVIIIe ou au début du XIXe siècle. Cette route fut abandonnée peu après 1825 suite à l'aménagement de la route cantonale actuelle qui entraîna par ailleurs une modification du cours de la Birse (fig. 65).

A proximité immédiate du restaurant La Charbonnière, le replat que formait l'ancienne route a servi dans le deuxième quart du XIXe siècle à l'installation de la charbonnière 3 (fig. 60 et 66), qui a pu être étudiée sur la moitié de sa superficie environ. Une analyse plus détaillée de la meule figure au sein du chapitre III de la Partie 2.

2. Datations

Les recherches routières récentes, entreprises notamment sur le tracé de l'A16 entre La Heutte et Tavannes, ont montré et confirmé, qu'il était impossible de dater une chaussée, un chemin, sur la base de mesures d'écartements interaxiaux. Ceux-ci varient peu et perdurent souvent depuis l'Antiquité jusqu'à l'époque moderne.

Le rare matériel archéologique récolté consiste surtout en clous divers, notamment des clous de fer d'équidé, qui ne fournissent aucune datation précise. Il aurait été intéressant de pouvoir préciser le cadre chronologique de la plus ancienne route repérée, mais l'absence dans la couche 28 de matériel archéologique ou de restes organiques datables par la méthode du radiocarbone, rend vaine une telle approche. Le degré d'usure du revêtement de la route, ainsi que les importants dépôts de boues routières montrent à l'évidence que la première chaussée fut utilisée durant une

91 Quiquerez 1863, op. cit.

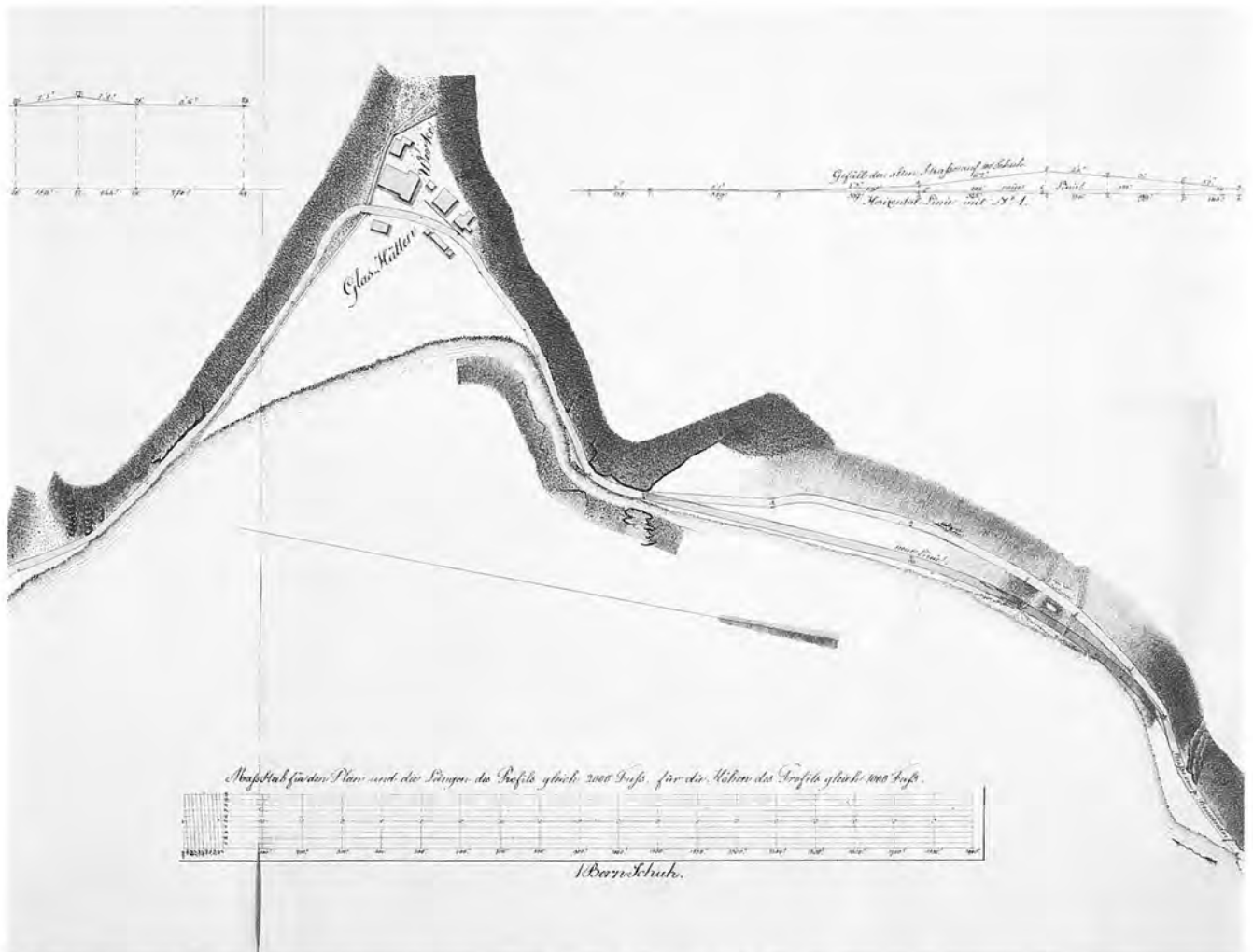


Fig. 65: Roches - La Roche Saint-Jean: projet de modification du tracé daté de 1824/1825. On remarque l'ancien tracé et le nouveau plus proche de la Birse.



Fig. 66: Roches - Combe Chopin/Charbonnière 1996. Vue de la charbonnière 3 aménagée directement sur le dernier niveau de route, après son abandon. Vue vers le nord-ouest.

Cette date signe selon toute vraisemblance l'aménagement de ce chemin.⁹⁶

Un chemin a certainement existé au Moyen Age, mais nous ne savons pas quelle était sa nature: chemin muletier, petit chemin carrossable? La présence d'un bas fourneau à la Combe Chopin ne permet en aucune manière de prouver l'existence d'une route carrossable, car le minerai a fort bien pu y être acheminé à dos d'âne ou de mulet.

Par contre, des documents d'archives font état d'importants travaux de correction à l'explosif, en 1710, entre Courrendlin et Moutier.⁹⁷ On peut penser qu'il s'agissait surtout d'améliorer les passages étroits, notamment au niveau des différents étranglements rocheux connus à Choindez, à proximité de l'ancien martinet, et à la Roche Saint-Jean. Il n'est pas exclu qu'à l'occasion de cette remise en état, notre tronçon ait été rechargé de gravier frais.

96 Gerber 1997, 109-110. La date nous fut révélée en 1998 par Ph. Hauser, de Moutier; nous lui en sommes gré.

97 AAEB B 245/ 38 MG.

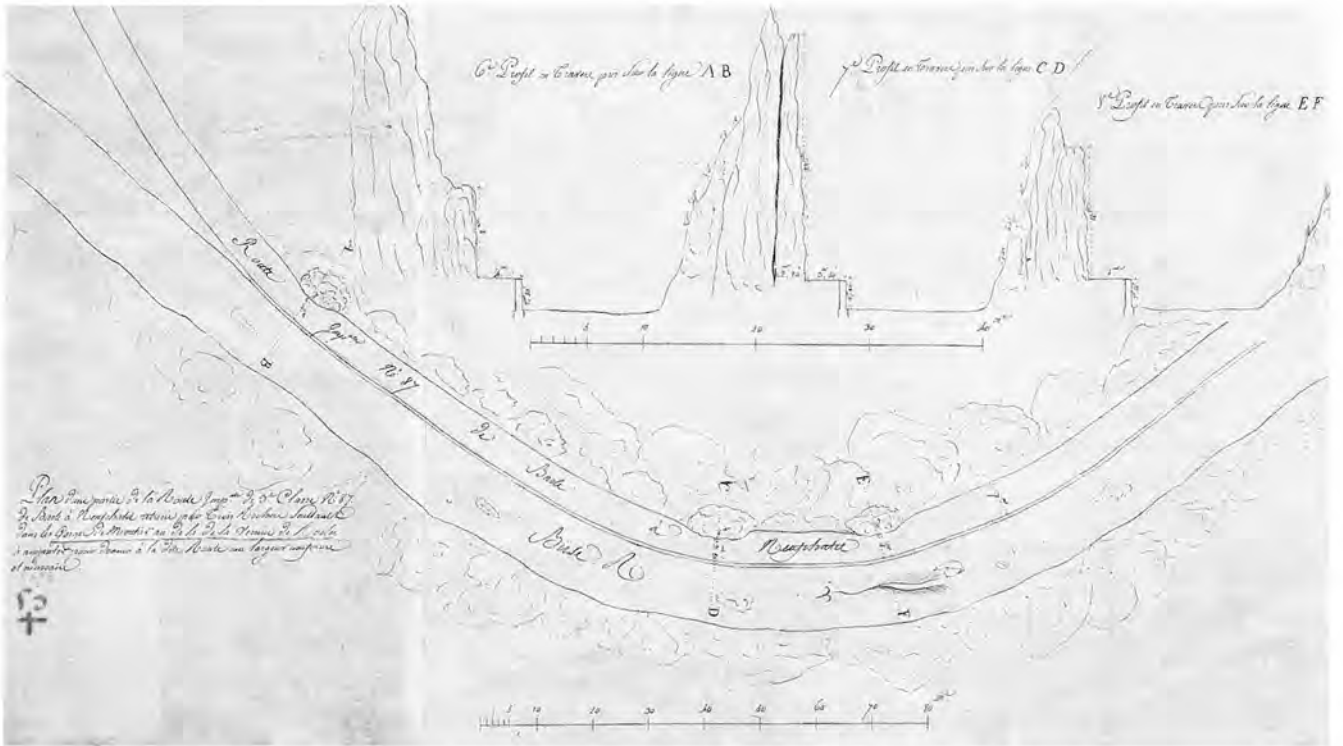


Fig. 67: Roches - La Roche Saint-Jean. Plan manuscrit de la correction de la route de Bâle à Neuchâtel complété de trois coupes transversales. Vers 1800, époque française.



Fig. 68: Roches - Combe Chopin/Charbonnière. Vue de l'étranglement rocheux dénommé La Roche Saint-Jean. On remarque au premier plan à gauche, la Birse flanquée de la nouvelle chaussée et au second plan, l'ancien chemin qui s'écarte vers la droite.

Ce tracé, qui a vraisemblablement peu varié au cours des siècles, fut corrigé peu après 1825⁹⁸ au profit d'une chaussée neuve. Des travaux conséquents visant à canaliser en partie le cours de la Birse et à aménager une large route cantonale ont aussi été entrepris. Un plan manuscrit de l'époque napoléonienne⁹⁹ daté vers 1800 (fig. 67) indique certains réaménagements envisagés quelques centaines de mètres plus au nord (Roche Saint-Jean), afin d'y établir une chaussée de largeur uniforme et régulière à la hauteur de l'éperon rocheux. Différentes coupes indiquent les soutènements envisagés en bordure de rivière.

Sur la gravure de Winterlin (fig. 68), exécutée en 1836, on remarque une route plane qui longe la Birse et passe au pied de la Roche Saint-Jean, où des garde-fous ont été implantés de manière serrée. Il s'agit de la chaussée réaménagée vers 1825 d'après les plans d'E. Müller. Sur la droite de l'image, on distingue l'ancien chemin, dont un tronçon fut fouillé en 1996. D'autres corrections¹⁰⁰ routières intervinrent encore entre Moutier et Roches vers 1845/46.

V. Le bas fourneau par V. Serneels et Ch. Gerber (Relecture critique L. Eschenlohr)

En 1995, les décapages mécaniques révélaient la présence de nombreuses scories ferreuses, accompagnées de quelques tessons de céramique médiévale à pâte sombre, qui supposaient l'existence d'un bas fourneau à proximité. L'hypothèse se confirma avec la localisation d'un amas de scories au bord du ruisseau, en amont de la zone décapée. Comme ce site était menacé par les mesures compensatoires de revitalisation du ruisseau de la Combe Chopin¹⁰¹, une intervention archéologique s'avéra nécessaire. Celle-ci se déroula d'avril à novembre 1996.

1. Présentation du site et déroulement des travaux

Le site se développe autour de la structure principale, le bas fourneau, et s'étend vers l'ouest et le sud. Trois secteurs distincts, représentant plus de 550 m², ont fait l'objet d'une fouille manuelle; ils sont désignés par les lettres A, B et C (fig. 69).

Secteur A

Le Secteur A s'étend sur près de 120 m² en aval de l'amas de scories. Les maigres témoignages archéologiques apparaissent directement sous l'humus. Ce secteur a livré un foyer de 60 cm de diamètre (fig. 70) constitué de pierres calcaires rubéfiées disposées en demi-cercle, des scories ferreuses et quelque 200 tessons de céramique qui signalent sans doute un niveau d'occupation (fig. 71). Le faible ensevelissement de ce dernier explique sans doute son mauvais état de conservation. On ne peut attribuer aucune fonction particulière à ce foyer. La dispersion autour de ce foyer de tessons de céramique glaçurée appartenant à un

même plat, pourrait indiquer qu'il s'agit d'une structure plus tardive, remontant au XVI^e siècle, se rapportant plutôt aux charbonnières attestées sur place.

De larges ravines, comblées avec des colluvions limoneux mêlés de paillettes de charbons, parcourent le terrain dans le sens de la pente. Le matériel archéologique (scories et céramique) apparaît régulièrement dans la partie supérieure du remplissage, marquant l'antériorité des ravines par rapport à l'activité sidérurgique sur le site.

Secteur B

Le Secteur B, qui couvre environ 130 m², s'étire en bordure du ruisseau de la Combe Chopin sur une vingtaine de mètres. C'est dans cette partie du site que sont apparus les principaux vestiges médiévaux: bas fourneau, amas de scories, trous de poteaux et grand foyer circulaire. Une étrange tache claire en forme d'anneau brisé (86) ouvert en direction de l'alandier du grand foyer se dessine sur l'amas de scories. Il pourrait s'agir d'un phénomène naturel ou de fins dépôts (rejets?) liés à l'exploitation du four. Malheureusement, les prélèvements ténus de matériau se sont perdus rendant impossible toute analyse. Ce secteur particulièrement riche fait l'objet d'une description détaillée à partir du chapitre 3.5.

Secteur C

Située à l'écart des structures principales du Secteur B, cette zone de 300 m² a fait l'objet d'une fouille partielle. La surface fut préalablement décapée mécaniquement (terre végétale et colluvions graveleux). Elle fut ensuite prospectée au moyen de sept tranchées de reconnaissance¹⁰² réalisées par décapages successifs de quelques centimètres d'épaisseur (fig. 72). Ces derniers n'ont pas permis de mettre en évidence un niveau d'occupation ou des traces associées à l'exploitation du bas fourneau (entreposage du combustible ou du minerai, par exemple). Seul un foyer ouvert, non aménagé, de 130 cm de diamètre, matérialisé par une importante tache rubéfiée, a été découvert dans le sondage 12. Aucun élément ne permet d'associer ce foyer à l'exploitation du minerai de fer. En outre, un trou de poteau isolé, de forme quadrangulaire, sans pierre de calage, qui mesurait 30 cm de côté pour une profondeur minimale de 10 cm (niveau d'implantation incertain) a été découvert.

Deux concentrations de céramiques médiévales, en majorité à pâte sombre, ont encore été relevées. Elles pourraient matérialiser l'emplacement d'un petit abri temporaire ou signaler à tout le moins la présence d'un ancien sol d'occupation. Les tessons de céramique présentent des

98 Plan de la nouvelle route (1824/1825), STAB AA VIII V 4.

99 STAB AA VIII 42/7; document de l'époque française: la route porte le titre de route impériale n° 87.

100 STAB AA VIII V 4 (plans et profils de 1825), BB X 4160 (courriers et actes); AA VIII V30 (Moutier - Moulin de Roches, 1845/55).

101 N16, Rapport d'impact, partie III: mesure R2.

102 Tranchées manuelles numérotées de 12 à 18.

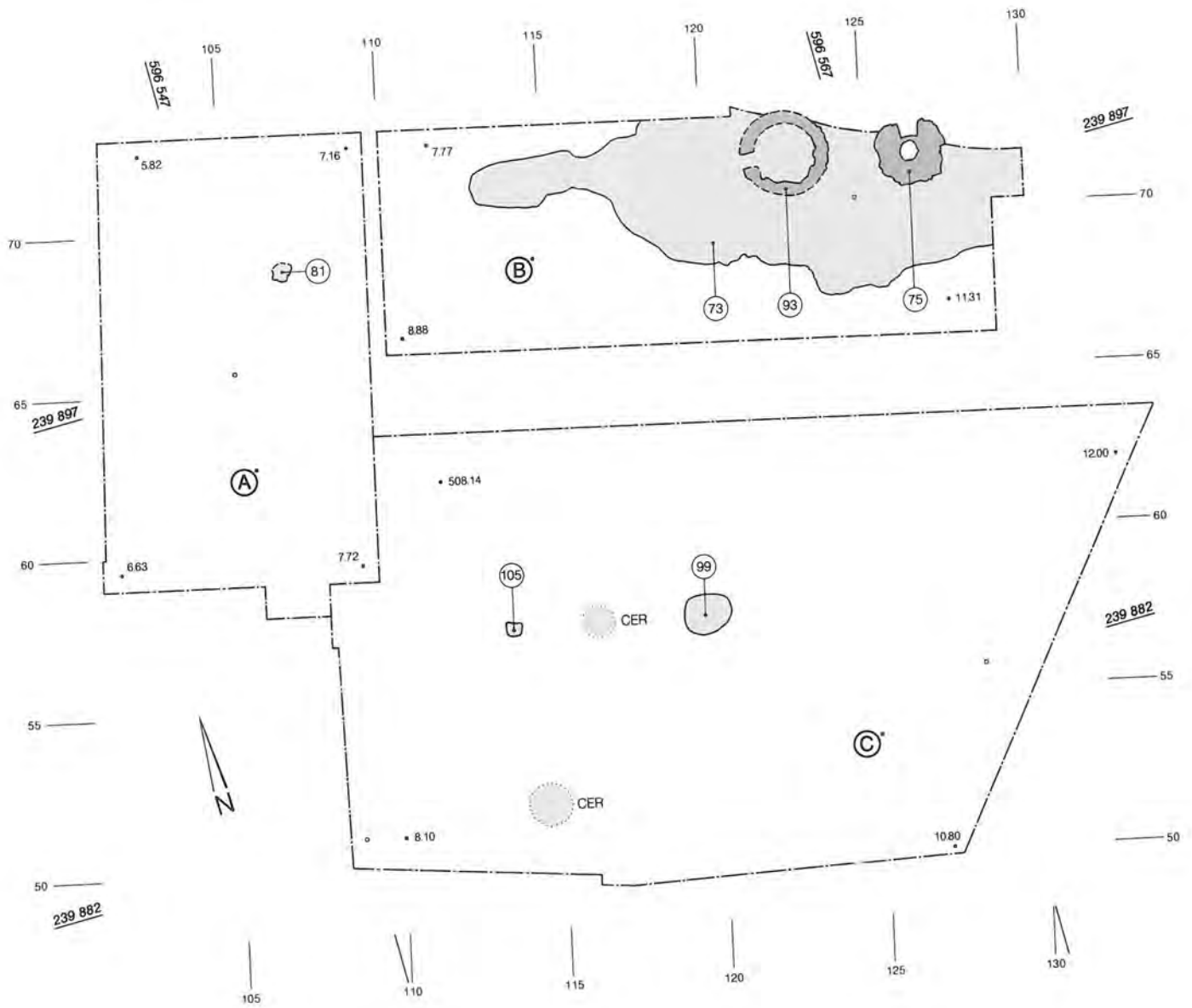


Fig. 69: Roches - Combe Chopin 1996. Plan du site métallurgique avec les trois secteurs fouillés et les principales structures découvertes. A, B et C: secteurs de fouille; trame foncée: bas fourneau (75) et foyer (93); trame claire: amas de scories; CER: concentration de céramiques. Echelle 1:200.



Fig. 70: Roches - Combe Chopin 1996. Secteur A; détail du petit foyer 82.



Fig. 71: Roches - Combe Chopin 1996. Vue d'ensemble du secteur A avec au centre, décalé vers la gauche, le foyer 82. Vue vers le sud.



Fig. 72: Roches - Combe Chopin 1996. Vue générale des secteurs A (premier plan) et C (second plan).



Fig. 73: Roches - Combe Chopin 1996. Vue verticale du bas fourneau. Au centre, la cuve partiellement vidée; la porte se situe à la hauteur de l'interruption du manteau de pierres calcaires.

bords similaires à ceux découverts autour du bas fourneau, et remontent également aux XIe-XIIe siècles. Les rares structures observées dans le secteur C se rapportent donc très vraisemblablement à l'exploitation du bas fourneau.

2. Description du bas fourneau

Le bas fourneau est implanté dans le flanc nord d'un monticule naturel peu élevé qui s'étire vers l'aval (fig. 73 et 74). Le terrain naturel (80) a été creusé sur une profondeur de 40 cm environ et la construction a été placée à l'intérieur de ce creusement (tab. 8).

Le fourneau est constitué d'un épais manteau de blocs calcaires de tailles diverses (75A), les plus gros atteignant 50 cm d'arête. Les blocs ont des formes quadrangulaires ou irrégulières qui peuvent résulter de la fracturation naturelle ou d'une mise en forme sommaire. Ces blocs sont disposés à l'intérieur du creusement, contre les parois. La construction paraît être plus circulaire que quadrangulaire mais les limites sont relativement difficiles à préciser. Le manteau de pierres externe entoure une cuve dont la section horizontale est grossièrement ovale. La paroi interne de cette cuve a été recouverte, à plusieurs occasions d'un revêtement extrêmement sableux (75J) qui s'appuie sur les pierres et dont la surface a été régularisée. Ce matériau a réagi à un fort impact de la chaleur et porte des traces de fusion évidentes (fig. 75). On constate que cette couche de protection a été réparée plusieurs fois par rechapage. Dans le quart sud-est de la cuve, on distingue trois parois successives (75B-D). Ailleurs, les rechapages se confondent. La section de la cuve, au moment de son abandon, n'est plus que de 50 par 60 cm. Au moment de la construction,

Tab. 8: Roches - Combe Chopin 1996. Données techniques du bas fourneau.

Emplacement	dans le substrat creusé de 40 cm	
Diamètre externe	220 cm	40 000 cm ² an
Épaisseur du manteau de pierres	70–80 cm	
Hauteur conservée	50–70 cm	
Hauteur totale supposée	plus de 200 cm	
Nature des blocs calcaire		
Nature du revêtement interne	sableux	
Épaisseur de revêtement interne	10–25 cm	
Scorification des parois internes	sur l'ensemble de la section	
Nombre de rechapages	au moins 3	
Section horizontale de la cuve	oval approximatif	
Dimensions horizontales internes initiales	70 x 80 cm	4 400 cm ²
Dimensions horizontales internes finales	50 x 60 cm	2 350 cm ²
Fond	légère dépression s'ouvrant vers la porte	
Porte (largeur x hauteur)	60 x 40 cm	
Absence de tuyère		
Volume de la cuve supposé	0.5–1 m ³	

ses dimensions devaient être plus importantes, de l'ordre de 70 par 80 cm. La hauteur conservée du massif de pierres est au maximum de l'ordre de 70 cm. Les plus gros blocs, comme celui de l'angle nord-est, reposent directement sur le sol naturel. Ailleurs, plusieurs assises peuvent être conservées. La structure est clairement arasée et la restitution de la partie supérieure ne peut être faite que sur la base des comparaisons avec d'autres fourneaux fouillés. Latéralement, une porte est aménagée dans le mur, au nord, c'est-à-dire perpendiculairement à la pente, dans l'axe de la plus grande dimension de la cuve (fig. 76).

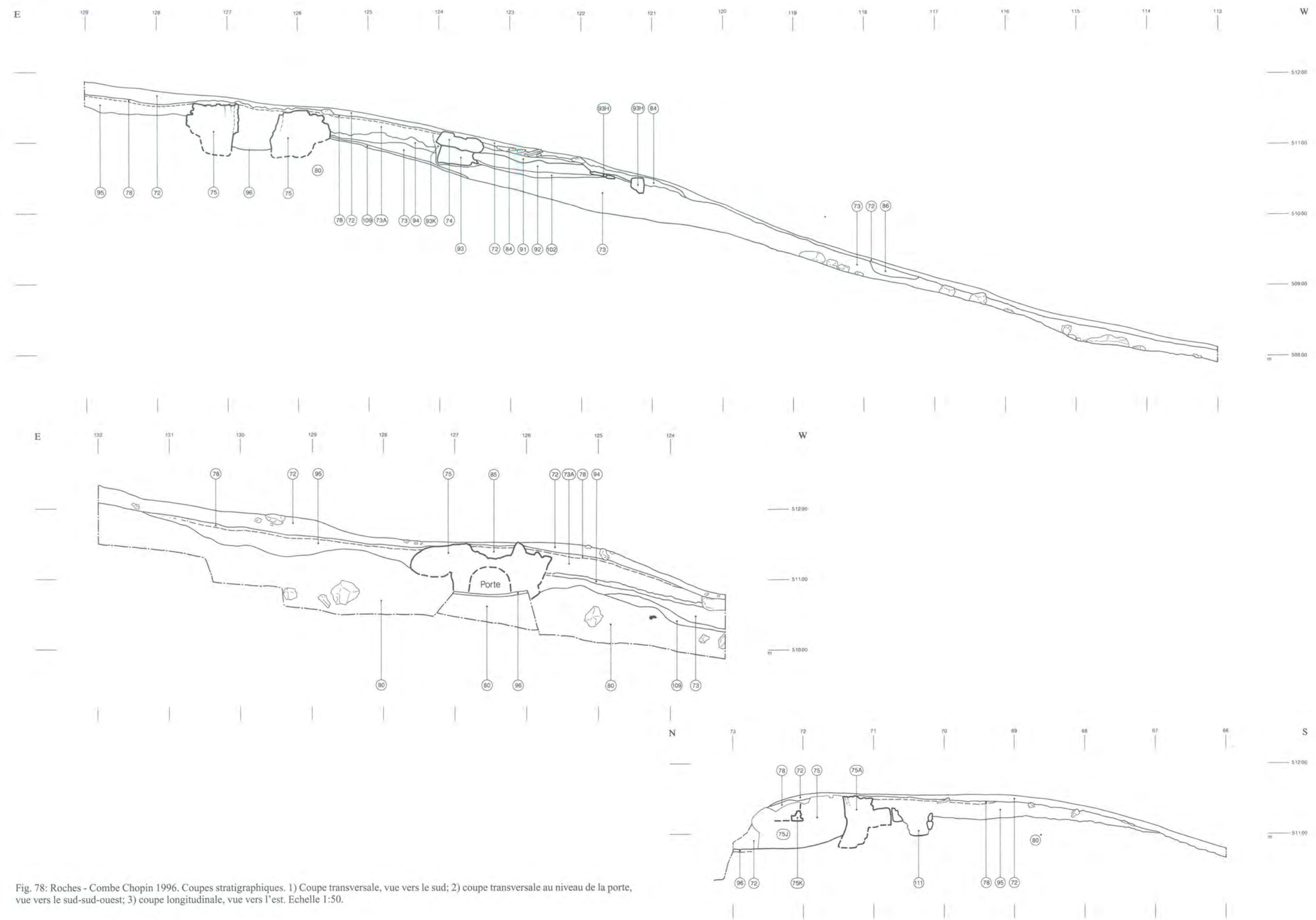


Fig. 78: Roches - Combe Chopin 1996. Coupes stratigraphiques. 1) Coupe transversale, vue vers le sud; 2) coupe transversale au niveau de la porte, vue vers le sud-sud-ouest; 3) coupe longitudinale, vue vers l'est. Echelle 1:50.



Fig. 79: Roches - Combe Chopin 1996. Vue d'ensemble du bas fourneau avec marquage des trous de poteaux.



Fig. 80: Roches - Combe Chopin 1996. Vue de détail du grand trou de poteau avec pierres de calage (111), accolé au bas fourneau.

Cette ouverture a environ 60 cm de large et 40 cm de haut. Le revêtement interne de la cuve, fortement induré, est resté en place au-dessus de ce conduit et le délimite clairement. Par contre, les pierres du mur ont été arrachées à cet endroit.

Le fond de la cuve forme une légère dépression dont les bords remontent vers les parois, sauf en direction de la porte qui est en très légère déclivité. Il est tapissé d'une couche limoneuse (96) de quelques centimètres d'épaisseur, fortement chargée de paillettes de charbon de bois. Cette couche se poursuit au-delà de la porte. Aucune limite au sol entre l'intérieur et l'extérieur du fourneau n'a été observée. Un bloc de molasse (75), délité et fortement rubéfié, appuyé contre le montant aval de la porte était peut-être utilisé pour boucher le conduit.

La cuve semble être inclinée. La partie conservée de la paroi amont est presque verticale alors que la paroi aval remonte en s'évasant. La paroi opposée à la porte semble s'élever légèrement en porte-à-faux. Comme les parois ont été remaniées et sont recouvertes localement de scorie et de matières fondues, il est difficile d'être complètement affirmatif à ce propos.

Autour du bas fourneau, l'espace de circulation est relativement plan, dans un rayon de quelques mètres. Au-delà, la pente du terrain est notable, atteignant à l'aval jusqu'à 30% (fig. 74 et 78). En direction du nord, le bas fourneau jouxte le lit profondément entaillé d'un ruisseau. Dans l'état actuel, l'espace qui se trouve ainsi devant la porte du bas fourneau est particulièrement étroit et il serait mal commode d'y travailler. On ne peut pas réellement restituer la disposition des lieux à l'époque du fonctionnement. Autour du fourneau, s'étend une couche humifère charbonneuse, parsemée de scories et de pisolithes (109), dont

la teneur en charbon augmente à mesure que l'on s'éloigne du four. Elle ne paraît pas avoir formé un véritable niveau de circulation dans la mesure où elle n'est que faiblement compactée. Cette couche a dû se former au cours de l'exploitation du bas fourneau, lors du déversement des charges de combustible et de minerai de fer.

De l'autre côté du fourneau, au sud, cinq trous de poteaux (fig. 74, 79 et 80) formant deux alignements parallèles, distants d'un mètre environ, ont été dégagés. Trois trous de 30 cm de diamètre environ avec des pierres de calage, forment une première ligne quasiment adossée au fourneau. Deux autres poteaux, plus petits (10 à 15 cm de diamètre), légèrement décalés par rapport aux premiers, dessinent un second alignement. Cet ensemble témoigne de la présence d'une structure en bois associée au fourneau, soit pour le protéger des intempéries, soit pour faciliter le chargement du minerai et du charbon par l'ouverture sommitale de la cuve.

A l'aval du fourneau, soit à l'ouest, sur environ 70 m², s'étend la halde de scories. La plus grande partie a pu être reconnue mais la limite nord a sans doute été érodée par le ruisseau qui coule à proximité.

3. Reconstitution de l'architecture et comparaisons archéologiques

L'état de conservation des vestiges rend difficile une reconstitution volumétrique du fourneau, en particulier, de la partie supérieure. Les propositions doivent s'appuyer sur des comparaisons avec d'autres bas fourneaux fouillés et les résultats de l'archéologie expérimentale.

Manifestement, le bas fourneau de la Combe Chopin est

une structure permanente destinée à fonctionner un grand nombre de fois. La construction est solide et a demandé un effort important. Les rechapages visibles à l'intérieur de la cuve montrent le caractère réutilisable de cette structure.

Les scories produites au cours de l'opération de réduction pouvaient être écoulées à l'extérieur du fourneau par la porte située au bas de la cuve. Elles ont pu aussi être retirées en fin d'opération après le refroidissement.

Une partie des fragments de scories montre une morphologie écoulee mais souvent on observe des formes très complexes et de nombreuses empreintes de charbon de bois. Il est donc probable que seulement une partie des scories était extraite pendant l'opération elle-même et que des masses importantes restaient dans le fourneau jusqu'à la fin du travail. L'état de fragmentation des scories ne permet pas de fixer la proportion entre les deux groupes. On n'a pas trouvé de scories en place devant la porte du bas fourneau.

Pour permettre la combustion du charbon de bois, le fourneau doit être alimenté en comburant, c'est-à-dire en air. Techniquement, on peut envisager deux solutions qui ont pu être observées par les ethnologues travaillant sur les cultures traditionnelles d'une part, et expérimentées au cours de reconstitutions d'autre part.

La première fait appel aux systèmes de tirage naturel. On peut profiter d'un vent dominant et le canaliser en direction de la cuve. De manière à pouvoir contrôler la combustion, il est souhaitable de pouvoir compter sur des vents réguliers, tant du point de vue de leur force que de leur direction. Ce type de solution est envisagé pour expliquer des vestiges archéologiques principalement en fonction de la morphologie des fourneaux et de leur implantation dans le paysage. Le cas des fourneaux étudiés au Sri Lanka et datant des premiers siècles de notre ère, est relativement clair. Ces fourneaux sont très larges et peu profonds, disposés face au vent avec une rangée de tuyères à la base. En plus, les emplacements sont choisis de manière à être balayés par les vents réguliers de la mousson (Juleff 1996). Le tirage naturel peut aussi être assuré par l'appel d'air que crée une simple cheminée. Pour peu que l'élévation de la structure soit importante, l'air canalisé par la cheminée s'y engouffre naturellement. Cet effet est accentué par la différence de température entre l'extérieur et la cuve. Plus la cheminée est haute et élancée, plus cet effet de tirage est favorisé. Pour une cuve de 50 à 80 cm de diamètre, qui était au moins partiellement remplie de charbon et de minerai, il faut une élévation assez importante mais difficile à calculer de manière théorique. L'expérimentation sur ce type de ventilation montre qu'une cuve de plus de 200 cm de hauteur permet un fort tirage et donc une température élevée.¹⁰³

Dans le cas du bas fourneau de la Combe Chopin, on soulignera l'absence d'éléments permettant de reconstituer un dispositif de soufflerie. Dans la partie en place de la cons-

truction, on ne décèle aucune particularité qui permettrait de mettre en évidence un tel dispositif. S'il a existé, il devait donc déboucher dans la cuve à une hauteur appréciable, supérieure à 50 cm au moins. On rappellera cependant que tel est le cas dans certains bas fourneaux d'époque romaine (Domergue 1999).

Aucune tuyère ou fragment de tuyère n'a été retrouvé sur le site, ni à proximité du fourneau ni dans l'amas de scories. Cette absence paraît significative quand on connaît les fréquentes découvertes de fragments de tuyère en céramique associées aux bas fourneaux fouillés à Boécourt - Les Boulies JU (Eschenlohr et Serneels 1991) et à d'autres cas similaires (Pelet 1993).

L'absence de tuyère n'est cependant pas un argument décisif. De nombreux fourneaux fonctionnent avec un apport d'air soufflé dans un simple trou percé à travers la paroi sans que celui-ci soit renforcé par une pièce en céramique fabriquée spécialement. Cependant un tel dispositif laisse des traces identifiables sous la forme de fragments de cette paroi percée. De telles pièces n'ont pas été observées à la Combe Chopin.

Il faut aussi mentionner la possibilité de l'utilisation d'une tuyère métallique. La tuyère en cuivre deviendra la règle dans le haut-fourneau mais son usage en bas fourneau n'est pas connu. Il faut souligner qu'une telle pièce, recyclable ou réutilisable, a relativement peu de chance de se conserver sur un site archéologique.

Il y a peu d'éléments supplémentaires pour discuter la question de la ventilation. Les cinq trous de poteau qui se trouvent au sud du fourneau à l'extérieur à l'opposé de la porte ont pu avoir pour fonction de supporter des soufflets placés sur un plancher par exemple. Cette interprétation ne s'appuie cependant sur aucun argument précis et il est possible d'interpréter ces traces au sol comme les vestiges d'un abri ou d'une plate-forme de chargement.

La proximité du ruisseau pourrait aussi inciter à émettre l'hypothèse d'un dispositif de soufflerie hydraulique. L'implantation du fourneau à proximité du ruisseau paraît en effet peu pratique. L'espace devant la porte se trouve très réduit et les débordements éventuels de ce ruisseau en cas d'orage pourraient occasionner des dégâts à l'installa-

103 Au cours de ses expérimentations, P. Andrieux a obtenu des températures supérieures à 1000°C dans un four inspiré des descriptions de Quiquerez pour une cuve d'une hauteur dépassant 225 cm, remplie sur 150 cm par du charbon. Il a constaté une température plus élevée de 1150°C dans un four similaire de 250 cm de haut et en présence de minerai de fer (four VTN 82-1 et 2, Andrieux 1990, p.66-67). Des conditions suffisantes pour la réduction du minerai de fer sidérolithique jurassien ont été obtenues dans le fourneau expérimental inspiré du même modèle et reconstitué par Eschenlohr et le Groupe d'Archéologie du Fer Jurassien. Dans ce cas également, la hauteur de la cuve est de l'ordre de 250 cm. Ces travaux sont en cours d'élaboration.

Évidemment, de nombreux autres paramètres devraient être pris en compte pour affiner ces résultats. La relation entre la hauteur de la cuve et la température atteinte dépend aussi de la nature de la charge (combustible, minerai) et de sa perméabilité. Les détails de ces conditions ne sont pas encore bien connus.

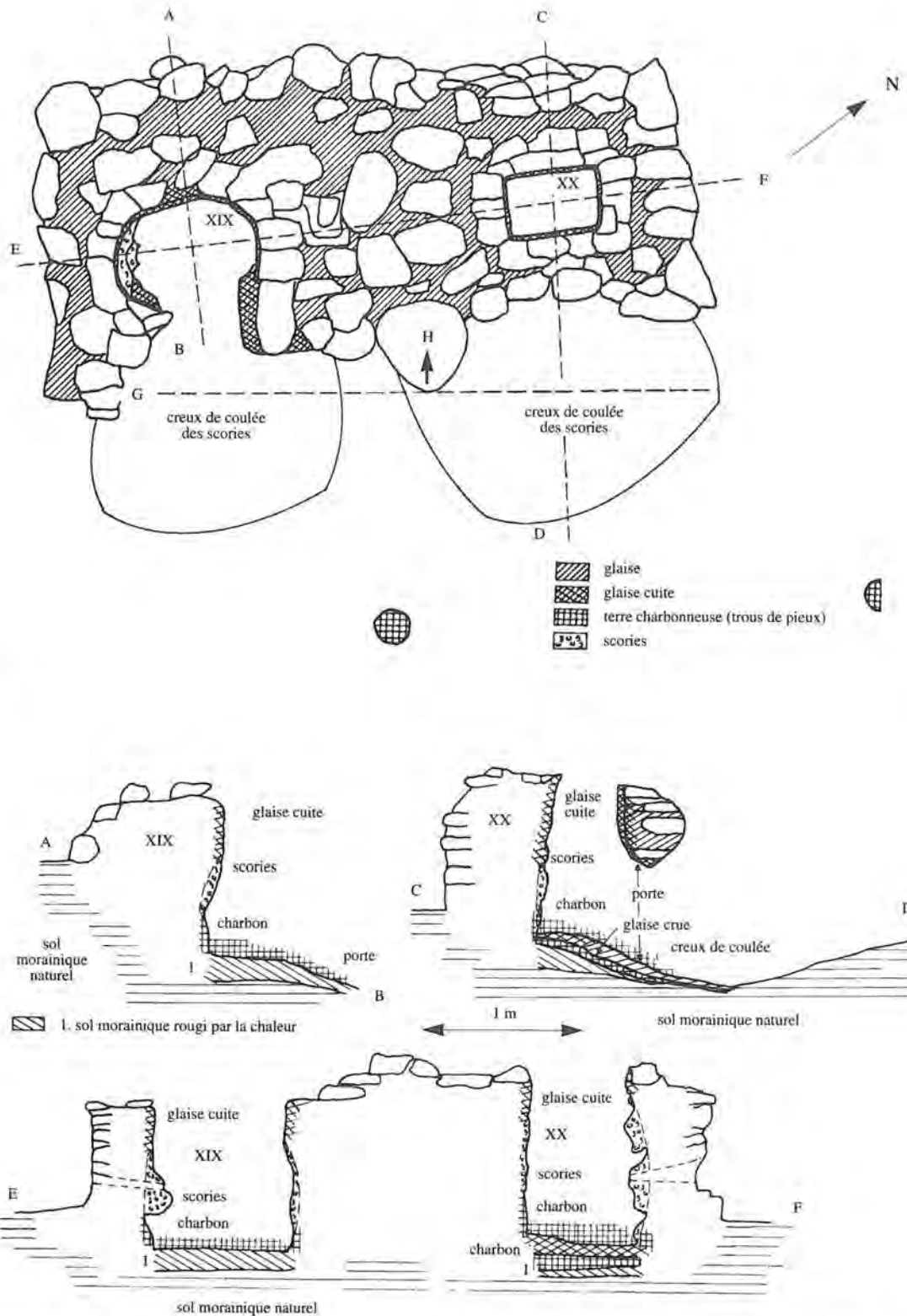


Fig. 81: Plan et coupes des bas fourneaux jumelés XIX et XX de Bellaires III (d'après Pelet 1993, fig. 98 et 99). Haut Moyen Age.

tion. Pour justifier cette implantation peu rationnelle, on pourrait invoquer l'utilisation de la force hydraulique. L'étude du terrain ne fournit aucun argument soutenant cette thèse. Le cours irrégulier du ruisseau est un inconvénient et on n'observe aucune trace d'un dispositif destiné à le régulariser comme une retenue d'eau. Enfin, rien ne permet d'affirmer que le ruisseau occupait à l'époque du

fonctionnement du site, la même position qu'aujourd'hui. On doit donc raisonnablement écarter cette hypothèse. On rappellera cependant que les recherches entreprises ont mis en évidence des installations de ce type dans le Jura. Il en existe certainement au XVe siècle. Ces installations pourraient même être beaucoup plus anciennes si il se confirme que c'est bien la technologie utilisée à Corcelles -

La Creuse BE; l'activité de cet atelier remontant au XI^e siècle déjà (Eschenlohr 2001).

Il est donc impossible, sur la base des vestiges archéologiques seuls, d'affirmer sans réserve que le fourneau de la Combe Chopin ne disposait d'aucune soufflerie artificielle. L'hypothèse la plus probable est cependant que ce fourneau utilise un tirage naturel.

Dans le cas de la Combe Chopin, la morphologie du fourneau avec sa porte plutôt étroite et l'orientation de l'ouverture ne semblent pas favorables à l'utilisation d'un vent naturel. De plus, les vents locaux ne sont pas particulièrement réguliers.

Le massif construit autour de la cuve est solide et bien agencé. On a pris soin d'encastrer la base du fourneau dans le substrat. Cette construction a fort bien pu s'élever à une hauteur supérieure à deux mètres, mais les maigres vestiges ne permettent pas de préciser son aspect.

Les éléments provenant de la destruction de l'élévation n'ont pas été retrouvés, ce qui s'explique par la forte pente du terrain et la présence à proximité immédiate du ruisseau de la combe. Les vestiges archéologiques ne permettent donc pas d'affirmer que la hauteur de ce fourneau dépassait deux mètres mais cela reste l'hypothèse la plus probable.

Les comparaisons avec les autres fourneaux connus dans la région apportent des arguments. Les bas fourneaux de

Boécourt - Les Boulies, avec leur cuve en dôme et leur système de soufflerie appartiennent clairement à une famille complètement différente (fig. 81). Par contre, un autre groupe de fourneaux existe dans le Jura à la période médiévale. Ce type de fourneau a été décrit par Quiquerez qui a eu l'occasion de faire dégager des exemplaires très bien conservés. Il publie trois relevés schématiques qui possèdent de nombreux points communs (fig. 82). Les fourneaux sont des constructions circulaires de grand diamètre (3 à 4 m). Ils possèdent une cuve centrale, étroite dont la section n'est pas toujours régulière, de même que l'inclinaison. La cuve est délimitée par un revêtement interne réfractaire, blanc et très sableux qui s'appuie sur un blocage de terre et de pierres retenus par un parement externe en pierres brutes et sans mortier. La hauteur conservée est d'au moins deux mètres et peut atteindre les trois mètres. A la base de la cuve, on observe une ouverture en entonnoir, très resserrée vers l'intérieur avec un diamètre de l'ordre de 10 cm et s'ouvrant vers l'extérieur. Mis à part le gueulard, aucune autre ouverture dans la cuve n'est mentionnée par Quiquerez.

Un autre fourneau a été partiellement fouillé à Lajoux - Le Grand Pré JU en 1972/3 (Joos 1994). Il présente plusieurs points communs avec les structures décrites par Quiquerez, en particulier en ce qui concerne les dimensions de la cuve (diamètre 70 cm, hauteur conservée 130 cm), son inclinaison (cuve hélicoïdale) et les traces de scorification interne. La porte était aussi très étroite au niveau de la cuve et évasée en direction de l'extérieur.

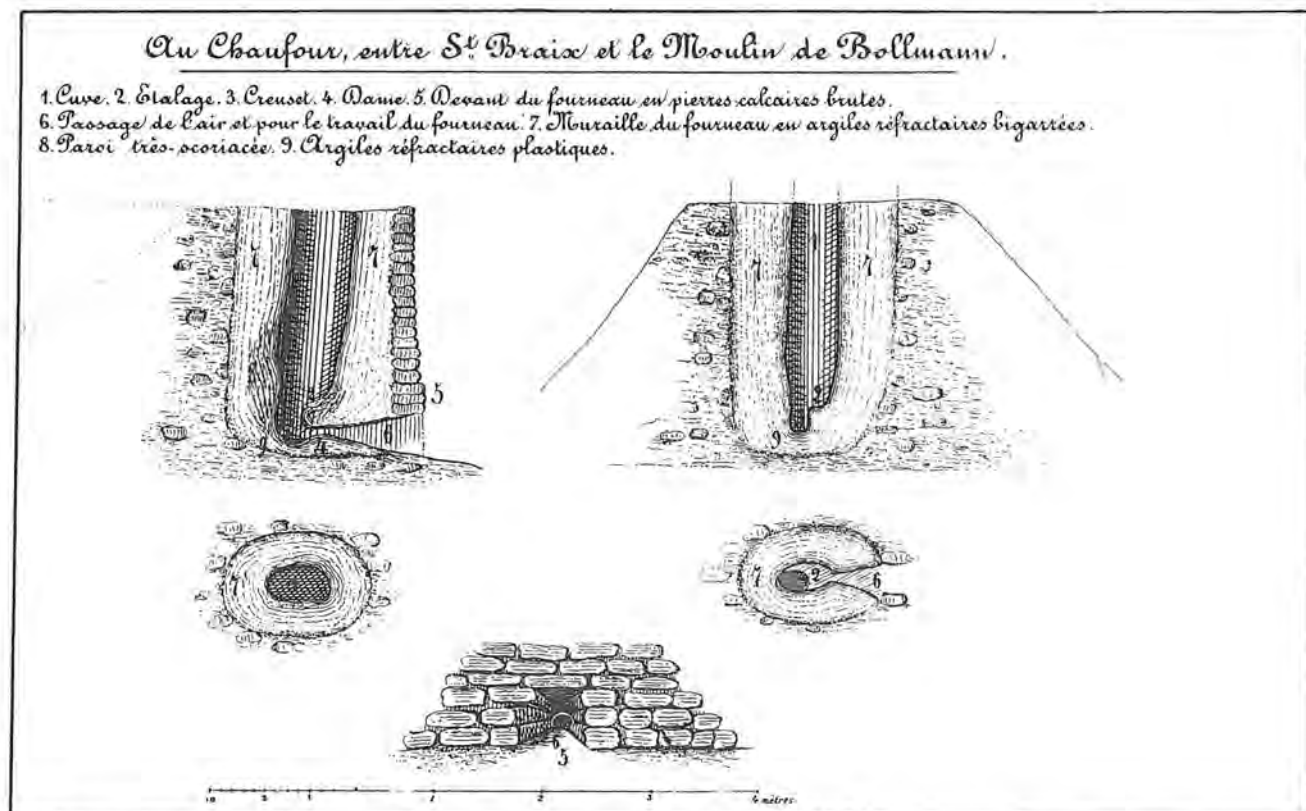


Fig. 82: Plans et coupes du bas fourneau du Chaufour, entre Saint-Brais et le moulin de Bollmann. Quiquerez 1866.

Enfin, quelques données concernent un fourneau partiellement dégagé à Monible - Sous Ce Mont 2 (Eschenlohr 2001) qui présente des similitudes frappantes avec les précédents, en particulier quant à l'architecture interne et les dimensions de la cuve. D'après l'étude globale du district sidérurgique du Jura, il semble que les fourneaux de ce type appartiennent à la période médiévale. Il en existe certainement aux XIIe–XIVe siècles mais on ne peut pas encore dater avec précision ni leur apparition ni leur abandon.

Le fourneau de la Combe Chopin présentent plusieurs points communs avec les structures de ce groupe que l'on tend à appeler de «type Quiquerez», en particulier, les dimensions et l'architecture interne de la cuve ainsi que l'absence d'élément de soufflerie artificielle. Des différences existent également. Les autres fourneaux jurassiens sont des constructions plus grandes et les murs possèdent un blocage interne en terre et pierres que l'on n'observe pas à Roches. De même, l'ouverture à la base de la cuve ne présente pas de rétrécissement manifeste vers l'intérieur.

Dans l'état actuel des connaissances, le fourneau de Roches semble pouvoir être rapproché du «type Quiquerez» mais pas sans nuance. Les éléments disponibles laissent penser qu'il s'agit d'un fourneau dont la hauteur est importante (2 mètres et plus) fonctionnant grâce au tirage naturel.

4. Four 93

Environ un mètre cinquante à l'ouest du bas fourneau, une seconde structure de combustion de grande taille a été dégagée (fig. 83–86). Sa forme générale est circulaire. Elle est constituée d'une fondation en gros blocs calcaires (93) disposés en cercle autour d'une lentille d'argile cuite (102) qui forme la sole du four. Les dimensions sont respectables: diamètre extérieur 250 cm, diamètre intérieur 170 cm. Du point de vue stratigraphique (fig. 78), le four 93 est aménagé dans l'amas de scories (73B); la fosse d'implantation (93K) n'a été repérée qu'au moment du démantèlement du four. La démolition du bas fourneau (94) s'appuie contre la maçonnerie du nouveau four, et est recouverte par un remblai de nivelage formé de scories récupérées (73A).

Le premier état (102) constitue peut-être déjà une réparation d'un four antérieur, puisque de nombreux fragments d'argile cuite ont été découverts dans la partie inférieure de la couche 102 (remblai de nivelage¹⁰⁴). En aval, un décrochement matérialisé par quelques blocs calcaires (93H) semble marquer l'emplacement d'un alandier (fig. 77). Celui-ci recoupe en partie le sol 102 et pourrait avoir remplacé une ouverture antérieure. Toutefois, cet alandier a dû servir à alimenter le four durant le premier état déjà. La sole du four a subi au moins une réfection totale au cours de son utilisation, comme en témoigne un remblai¹⁰⁵ et une



Fig. 83: Roches - Combe Chopin 1996. Four 93, premier état: vue de la sole, des restes de maçonnerie et peut-être de l'alandier, à droite. Vue vers le sud.



Fig. 84: Roches - Combe Chopin 1996. Four 93, deuxième état: détail de la structure 118 interprétée comme alandier.



Fig. 85: Roches - Combe Chopin 1996. Four 93, deuxième état: coupe partielle montrant une partie de la sole sous-jacente appartenant au premier état. Vue vers le nord-est.

104 Couche 108 de la documentation de fouille.

105 Couche 97 de la documentation de fouille.



Fig. 86: Roches - Combe Chopin 1996. Four 93, troisième état: la sole relève ici encore du deuxième état.

nouvelle chape d'argile cuite 92 (fig. 85). Dans les deux états, l'aire de feu était parfaitement entretenue et propre, puisque les charbons de bois et la cendre étaient pratiquement inexistantes. Quelques rares pisolithes grillés ont été récoltés çà et là dans les bords du four.

Un troisième état pourrait être matérialisé par un réhaussement de la maçonnerie à sec qui a entraîné une modification de la forme générale du four. De circulaire celui-ci devint quadrangulaire (fig. 86). De cet état, seuls deux murets de pierres sèches (74 et 76, dorénavant 74), constitués de deux rangées de moellons calcaires liés par un peu de limon argileux, sont conservés. Ces murets forment un angle (fig. 77) et délimitent une couche limoneuse rubéfiée, mêlée de charbons de bois (91) interprétée comme une aire de foyer. Nous parlons de foyer car seule la rangée de pierres intérieure de cette structure est rubéfiée (feu moins intense?). Enfin, la couche 91 est recouverte par de la démolition (parois de four?) constituée essentiellement de dalles calcaires, dont la surface est rubéfiée.

Analyse minéralogique

Une étude minéralogique de la sole a été effectuée par H. Béarat¹⁰⁶ sur quatre points disposés le long d'un axe passant par l'alandier. Quatre échantillons par point ont été prélevés, soit 16 échantillons au total. Par ces analyses, nous espérons pouvoir mettre en évidence des traces du matériau préparé dans le four 93. Ainsi, nous aurions pu proposer une interprétation de la structure.

L'analyse de la diffraction des rayons X montre que l'argile prélevée dans le terrain naturel à proximité du four et celle utilisée pour la confection de la sole sont manifestement semblables (argile illitique riche en calcium avec présence d'oolithes ferrugineuses). La présence de ces oolithes pourrait suggérer l'utilisation, dans la confection de la sole, d'argile issue d'une installation de lavage

du minerai de fer, située peut-être à proximité du site d'extraction.

Quant à la température de fonctionnement du four, elle a été déterminée sur la base d'une comparaison entre les associations minéralogiques observées dans les échantillons prélevés et celles repérées dans l'échantillon de référence porté à différentes températures entre 500 et 1000 °C (paliers de 100 °C). La température maximale observée en surface atteint 650–800 °C; elle paraît distribuée régulièrement sur l'ensemble de la sole.

La présence de ces oolithes ferrugineuses dans les sédiments meubles superficiels de la combe s'explique par le substratum géologique local qui est principalement constitué par les marnes du Dogger supérieur qui contiennent telles oolithes en petite quantité. La présence de ces concrétions ferrugineuses n'est pas une indication probante en faveur de l'utilisation de ce foyer dans le contexte de la métallurgie du fer. L'étude géochimique des déchets métallurgiques indique clairement que c'est uniquement le minerai sidérolithique qui a été traité.

L'analyse chimique d'un fragment de la sole a été réalisée à titre de comparaison dans le cadre de l'étude des déchets métallurgiques et des autres matériaux du site.¹⁰⁷ Il s'agit d'une marne très riche en carbonate de calcium (CaCO₃ env. 55%), très différente des matériaux siliceux mis en oeuvre pour le revêtement interne du bas fourneau. Un tel matériau possède des qualités réfractaires nettement moins bonnes et résisterait fort mal à des températures supérieures à 1000 °C. Cette analyse confirme que les utilisateurs du four 93 n'ont pas cherché à construire une structure capable de résister aux fortes températures.

Identification

A notre avis, la superposition des foyers 93 et 74 suggère la continuité d'une activité sur place. Le lien entre ce four et le bas fourneau n'est pas évident. L'implantation du four 93 dans l'amas de scories suggère d'une part un décalage chronologique (antériorité du bas fourneau) et d'autre part, la recherche d'un site particulier. L'endroit devait être jugé judicieux pour qu'on y aménage un nouveau foyer. Recherchait-on un lieu sec et facile à aménager? En l'absence d'indices pertinents la question reste ouverte. La présence discrète de pisolithes grillés et non grillés sur l'aire de feu n'autorise pas à interpréter cette structure comme un foyer de grillage, tel qu'envisagé lors de la fouille.

La difficulté principale réside dans l'identification définitive de cette structure. Dans un habitat on l'interpréterait volontiers comme un four domestique servant à la cuisson

106 Institut de minéralogie et pétrographie de l'Université de Fribourg; rapport du 13.12.1996.

107 Echantillon n° RCC 751, Annexe 3.

d'aliments ou comme un four à pain. Mais dans notre cas, aucune structure d'habitation n'a été mise en évidence; par ailleurs, les coteaux de la Combe Chopin (humidité, ensoleillement absent durant la période hivernale) ne paraissent pas être des lieux d'une hospitalité particulière.

Doit-on dès lors associer ce four à une activité artisanale? S'agirait-il d'un four de potier? On s'attendrait à trouver un foyer à sole percée, et surtout de nombreux ratés de cuisson, qui font cruellement défaut sur notre site.

La présence de quelques dizaines de pisolithes sidérolithiques grillés et non grillés sur l'aire de feu n'autorise pas à interpréter cette structure comme un foyer de grillage du minerai de fer. D'une part, ces quelques concrétions ferrugineuses ne forment pas une concentration particulièrement notable sur le site.

D'autre part, même si on ne dispose pour le moment pas de données archéologiques sur les structures de combustion destinées au grillage des minerais de fer pour l'époque médiévale, rien n'indique qu'il pourrait être construit de cette manière.¹⁰⁸ Compte tenu des quantités à traiter, on imaginerait plus volontiers des structures plus petites et également plus ouvertes. De même, on s'attendrait à trouver des accumulations nettement plus importantes de minerai et de combustible, comme ce fut le cas sur les aires de combustion repérées à Boécourt - Les Boulies (Eschenlohr et Serneels 1991).

5. Matériel archéologique et datation

Le présent catalogue décrit la quasi totalité du matériel archéologique découvert lors des campagnes de prospection (1995) et de fouille (1995 et 1996). Les objets sont rassemblés par secteur et groupés par types dans la mesure du possible. Les objets sont dessinés à l'échelle 1:2. Comme nous étions en présence d'un ensemble clos, il nous semblait important de publier non seulement les bords, qui permettent l'analyse typo-chronologique, mais également les fonds et quelques parois, décorées ou non, qui leur sont associés.

Dans l'ensemble, le matériel médiéval jurassien demeure mal connu et/ou mal publié. Les meilleurs ensembles de références qui puissent nous intéresser proviennent de la région bâloise, et du pied du Jura. Le complexe en cours d'étude de Nidau - Schloss 1985 (à paraître) et celui issu des récentes fouilles de l'habitat médiéval de Court - Mévilier offrent un matériel assez comparable au notre.¹⁰⁹

A. Céramique

Les trois secteurs A, B et C ont livré 658 tessons¹¹⁰ de céramique, dont 630 à pâte brune ou grise, sur une surface de quelque 350 m². On dénombre 66 bords (un seul glaçuré) correspondant à un minimum de 25 récipients médiévaux. Enfin, quatre récipients plus récents proviennent également de ces secteurs.

La distribution des tessons est assez uniforme sur l'ensemble de la fouille: 216 pour le secteur A, 242 pour le secteur B et 173 pour le secteur C. Toutefois, la quantité de céramique recueillie apparaît relativement abondante si l'on se réfère à la nature du site, à son exposition aux phénomènes d'érosion (faible enfouissement des vestiges, ruissellement de surface) et à l'absence de traces d'habitat. Les trouvailles proviennent pour l'essentiel de la faible couche d'humus (70 et 72), remaniée par des racines d'arbres, du niveau de circulation 78 qui semble recouvrir les restes du bas fourneau (75 et 73A), et de la partie supérieure de l'amas de scories (73B-D). Il s'agit essentiellement de pots culinaires.

La grande homogénéité que l'on observe au travers des différents complexes, suggèrent sinon une contemporanéité, du moins une période d'activité réduite du site sidérurgique. Parmi le matériel récolté, les bords simples, évasés, à col peu développé et lèvre arrondie, traditionnellement datés du XIe-XIIe siècle, dominant (n° 1-4, 22-24, 32 et 33). Quelques bords épaissis, plus développés, à lèvre arrondie ou redressée (n° 10, 11, 13), plus tardifs, sont aussi représentés. On trouve encore un bord éversé simple à col court (n° 52) et un bord à marli souligné de cannelures (n° 25), que l'on peut situer au plus tôt vers la fin du XIIe. Deux pots à bord évasé, dont la lèvre triangulaire est soulignée d'une cannelure interne marquant l'emplacement d'un couvercle (n° 40 et 41), sont encore à signaler. Nous notons en outre la présence d'un bord (n° 39) qui préfigure la lèvre à bandeau typique dès la première moitié du XIIIe siècle. Nous n'avons relevé aucune lèvre en bandeau du XIIIe siècle, ni aucune lèvre en col de chemise encore plus tardive.

Les parois sont généralement assez épaisses, entre 6 et 8 mm, et rarement ornées d'un décor linéaire ou ondulé. Les fonds lenticulaires bien que dominants coexistent avec les fonds plats. Leur épaisseur varie de 4 à 8 mm, les fonds lenticulaires étant souvent les plus fins.

Les pâtes sont en majorité de couleur brune. Toutefois, on remarque un large éventail de nuances allant du brun rouge au brun noir, en passant par le gris, parfois aussi sur un même récipient. Quant aux dégraissants, ceux-ci sont sableux, de granulométrie fine à moyenne, et fréquemment micacés. Les pâtes sont dans l'ensemble bien cuites.

108 Dans le *De Re Metallica* d'Agricola, qui date du début du XVIe siècle, de nombreux fours et fourneaux métallurgiques sont représentés mais malheureusement pas de fourneau de grillage pour les minerais de fer. On voit par contre des installations pour le grillage des minerais sulfurés de cuivre et de plomb. Ce sont des stalles quadrangulaires de un mètre sur deux, sans couverture, fermées sur trois côtés par des murets de faible hauteur (0.5 à 1 m), et ouvertes sur le quatrième.

109 Je tiens à réitérer mes remerciements amicaux à Eva Roth Heege pour son soutien compétent lors de l'établissement de ce catalogue.

110 Parmi les 91 tessons ramassés en surface en 1995, 64 sont assignables au secteur A; les 27 tessons restants n'ont pas de pedigree précis. Les secteurs B et C n'ont été découpés qu'en 1996.

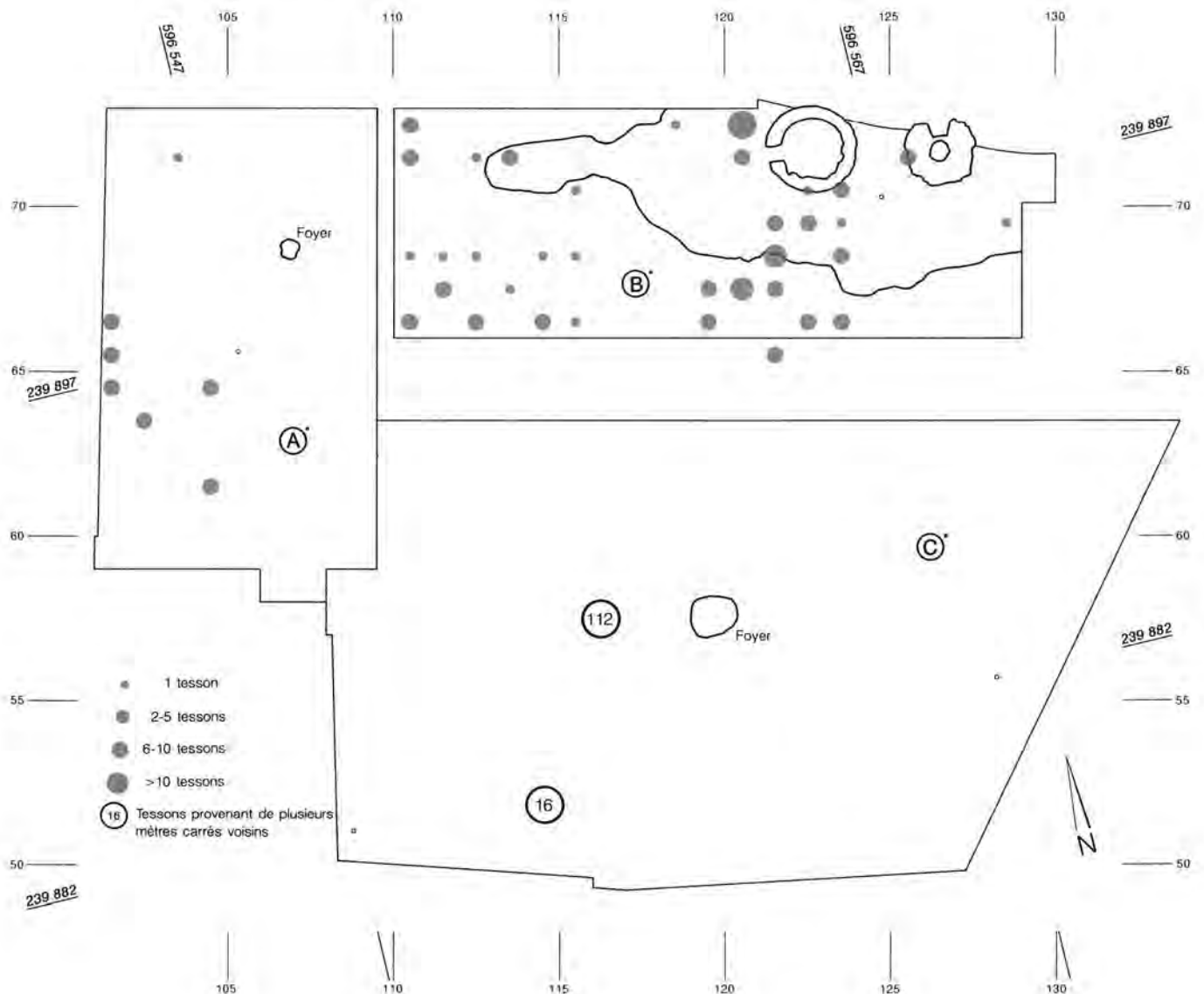


Fig. 87: Roches - Combe Chopin 1996. Carte de répartition du matériel céramique médiéval. Echelle 1:200.

La répartition spatiale (fig. 87) des tessons découverts au sein et à la base de l'humus 70 et 72, sur le niveau de circulation 78 et au sommet de l'amas de scories 73, montre à l'évidence une concentration de trouvailles en aval du bas fourneau, en particulier autour du four 93/74, dont l'implantation a certainement occasionné un brassage du matériel contenu dans les couches de scories.

Trois remontages réalisés entre les couches 72, 73a, 78 et 95 démontrent l'étroite contemporanéité des couches associées au fonctionnement du bas fourneau.

Quelques rares tessons postérieurs au XVI^e siècle ont aussi été trouvés au sein de la couche humifère recouvrant le site. Ils doivent être associés aux activités de charbonnage et à l'exploitation de la chaux. Il s'agit de tessons glaçurés apparus dans les secteurs A, B et C. Nous retons un caquelon tripode, dont il manque les pieds, à glaçure brun miel (n° 56) et un plat à pied en bourrelet (n° 17). Notons encore la découverte d'une pipe en terre blanche remontant au XVIII^e siècle (n° 51).

B. Métal

Quelques objets métalliques en fer ont été récoltés lors de la campagne de fouille de 1996. Quatre fers d'équidé fragmentaires, un anneau, un tranchant de couteau et plusieurs clous de fer d'équidé à tête en clef de violon. Une boucle de sangle médiévale ou moderne en bronze (n° 50) complète l'inventaire.

Les fers d'équidés (n° 19, 30, 47 et 57) sont trop incomplets pour que nous puissions en tirer une quelconque indication chronologique. Par contre, les nombreux clous de fers à tête en clef de violon (plus ou moins usée) doivent dater du Moyen Âge (n° 20, 21, 48, 59-61).

Même si ces objets demeurent difficiles à dater, rien ne s'oppose à ce qu'ils soient associés à l'exploitation sidérurgique. Ces clous attestent l'utilisation d'animaux de bât (mulets) pour le transport du minerai et du bois nécessaires à la réduction du minerai.

C. Catalogue des objets

Secteur A (fig. 88)

Couches 70 et 82: humus et sous-couche limoneuse

- 1 Pot. Bord à lèvre évasée, carrée. Pâte grise, à dégraissant sableux moyen. N° inv. 52611-1. Comparaisons: forme proche Barfüsserkerche pl. 22,1 (avant 1250); St-Petersinsel fig. 371,3. Datation: XIIe s.
- 2 Pot. Bord à lèvre évasée, petite cannelure interne. Pâte gris foncé bien cuite, à dégraissant fin. N° inv. 52578-1. Comparaison: Nidau - Schloss 1985 n° inv. 6560 + 6561-7 (datation dendrochronologique: après 1180); ACBE 5 à paraître. Datation: XIIe s.
- 3 Pot. Bord à lèvre évasée, aplatie. Pâte brune, dégraissant sableux moyen. Forme proche du précédent. N° inv. 52615-1. Proche du précédent.
- 4 Pot. Fragment de bord à lèvre évasée, verticale peu marquée. Petite cannelure externe sous la lèvre. Pâte gris foncé à fin dégraissant sableux, bien cuite. Ramassage de surface 1995. N° inv. 52154-3.
- 5 Pot. Bord à lèvre évasée, carrée. Pâte grise à dégraissant sableux moyen. N° inv. 52582-1. Comparaison: Barfüsserkerche pl. 31, 1 (XIe-XIIe s.). Datation: XIIe s.
- 6 Pot. Bord à lèvre évasée, peu épaisse. Pâte grise, orangée en surface. N° inv. 52566-1.
- 7 Pot. Bord évasé, lèvre en bourrelet, souligné par une petite cannelure interne. Pâte brun-orange (cœur) et brun-beige (surface), dégraissant sableux moyen. N° inv. 52613-1.
- 8 Pot. Bord à lèvre évasée, petite cannelure interne. Pâte brun-orange à dégraissant sableux moyen, surface brunâtre. Ramassage de surface 1995. N° inv. 52157-3.
- 9 Pot. Bord à lèvre évasée, verticale peu marquée. Pâte gris foncé, à fin dégraissant sableux. N° inv. 52620-1.
- 10 Pot. Bord à lèvre épaissie peu marquée. Pâte brun-rouge à l'intérieur et grise en surface à dégraissant sableux moyen. Sondage 7, couche 82. N° inv. 52636-1. Comparaisons: Barfüsserkerche pl. 35, 6-7 (XIe s.); Rickenbach 1995, p. 91, 4 (XIe s.). Datation: XIIe s.
- 11 Pot. Bord à lèvre épaissie peu marquée. Pâte gris foncé à fin dégraissant sableux, bien cuite. Ramassage de surface 1995. N° inv. 52154-4. Idem précédent.
- 12 Pot. Bord à lèvre peu développée, amincie. Pâte brun clair à dégraissant moyen sableux. N° inv. 52555-1.
- 13 Pot. Bord à lèvre épaissie peu marquée. Pâte gris foncé à fin dégraissant sableux. Ramassage de surface 1995. N° inv. 52155-1.
- 14 Pot. Paroi épaisse. Pâte brune, fin dégraissant sableux. Surface extérieure peignée, trace de suie. Ramassage de surface 1995. N° inv. 52156-1 à 14.
- 15 Pot. Fond lenticulaire. Pâte brune, dégraissant sableux micacé, surface extérieure grise. N° inv. 52564-1.
- 16 Pot. Fond plat. Pâte grise à fin dégraissant sableux. Sondage 7, couche 82. N° inv. 52636-4.
- 17 Fragment de fond de pot? Pâte orange sableuse, dégraissant assez grossier. Glaçure interne verdâtre sur engobe blanc, traces de glaçure externe? N° inv. 52557-5. Datation: XVIIIe s.?
- 18 Grand anneau de chaîne? en fer. Section circulaire, diamètre 15 mm; dimensions: 116 mm par 80 mm. N° inv. 52633-1.
- 19 Fragment de fer d'équidé. Branche s'élargissant rapidement, rainure et crampon. N° inv. 52552-2.
- 20 Clou de fer d'équidé à tête en forme de clef de violon, peu usé. Longueur 28 mm, tête 18 mm sur 5 mm. N° inv. 52603-2.
- 21 Clou de fer d'équidé à tête en forme de clef de violon, usé. Longueur 30 mm, tête 14 mm sur 3 mm, pointe tordue. N° inv. 52650-7.

Secteur B (fig. 89)

Couches 73B, 73C, 73D, 80A et 98: activité du bas fourneau

- 22 Pot. Bord évasé à lèvre arrondie. Pâte brune à fin dégraissant sableux, bien cuite. Couche 73C. N° inv. 52780-1 et 2.
- 23 Pot. Bord évasé, épaissi, à lèvre arrondie. Pâte grise (cœur) et brun orangé (surface), fin dégraissant sableux. Couche 98. N° inv. 52798-4 et 8. Comparaison: Vivre au Moyen Age 1990, 349, dessin en haut à gauche (XIIe s.). Datation: XIIe s.

- 24 Pot. Bord évasé à lèvre épaissie. Pâte grise à fin dégraissant sableux. Couche 73C. N° inv. 52780-4. Comparaison: Vivre au Moyen Age 1990, 349. Datation: XIIe s.
- 25 Pot. Bord à marli, faiblement déversé. Col peu développé, souligné de petites cannelures. Pâte grise à fin dégraissant sableux. Couche 80A, en bordure de fouille. N° inv. 52776-1, 2 et 7. Comparaison: Nidau - Schloss 1985 n° inv. 6564-57 (datation dendrochronologique: après 1180); ACBE 5 à paraître. Datation: XIIe s.
- 26 Fragment de paroi. Pâte grise, dégraissant sableux. Décoré d'une cannelure. Couche 73C. N° inv. 52780-10.
- 27 Fragment de paroi. Pâte brun-gris, dégraissant sableux; surface peignée. Décor ondulé. Couche 98. N° inv. 52798-5.
- 28 Pot. Paroi et amorce de fond plat? Pâte gris cendré à fin dégraissant micacé, légèrement savonneuse. Surface peignée. Couche 73D. N° inv. 52781-1.
- 29 Pot. Fond plat. Pâte brune, dégraissant sableux. Couche 73C. N° inv. 52780-9.
- 30 Fragment de fer d'équidé. Branche étroite, bord légèrement ondulé, crampon usé. Couche 80A. N° inv. 52776-11. Datation: médiévale, complexe XIIe s.
- 31 Grand couteau en fer. Fragment de lame à dos horizontal. Tranchant de section triangulaire. Longueur conservée 109 mm. Couche 73C. N° inv. 52744-1. Datation: médiévale, complexe XIIe s.

Couches 72, 73A, 78, 87B et 95: activité du four 93, puis 74/76 (fig. 90).

- 32 Pot. Bord évasé à lèvre arrondie. Pâte brune à fin dégraissant sableux, bien cuite. Couche 73A. N° inv. 52775-2 et 3 et 52629-2. Comparaisons: Nidau - Schloss 1985 n° 6550-14 (datation dendrochronologique: après 1180); ACBE 5 à paraître. Datation: XIIe s. CONTROLER.
- 33 Pot. Bord à lèvre évasée, arrondie. Pâte grise finement dégraissée (quartz et micas), bien cuite. Fragments attenants: n° inv. 52775-1 (couche 73A) et 52773-1 (couche 78).
- 34 Pot. Bord évasé à lèvre épaissie. Pâte grise (cœur) et beige-orange (surface), dégraissant sableux moyen. Couche 72. N° inv. 52767-3.
- 35 Pot. Bord évasé à lèvre triangulaire? Pâte grise à fin dégraissant sableux. Couche 72. N° inv. 52755-1. Comparaison: Vivre au Moyen Age 1990, 349, dessin en haut à gauche (XIIe s.). Datation: XIIe s.
- 36 Pot. Bord coudé, épaissi, à lèvre arrondie. Pâte brune (cœur) à brun-orangé (surface), dégraissant sableux moyen. Couche 73A. N° inv. 52775-33, 34 et 37.
- 37 Pot. Bord évasé à lèvre épaissie. Pâte grise (cœur) et brun-orange (surface) à fin dégraissant sableux. Couche 73A. N° inv. 52775-32.
- 38 Pot. Bord épaissi à lèvre peu marquée. Pâte grise à fin dégraissant sableux. Couche 72. N° inv. 52645-1.
- 39 Pot. Bord à courté lèvre en bandeau. Pâte brun clair, bien cuite, à fin dégraissant sableux. Couche 72. N° inv. 52639-1. Comparaison: Barfüsserkerche pl. 47, 6-7 (XIIe s.). Datation: XIIe s.
- 40 Pot. Bord évasé à lèvre triangulaire soulignée par une cannelure interne. Pâte brune à fin dégraissant sableux. Traces de suie sur les deux faces. Couche 95. N° inv. 53139-1 à 3. Comparaison: Tauber 1980, pl.137, n° 189 (Pleigne - Löwenburg, fin Xe s.!). Datation: XIIe s.
- 41 Pot. Bord évasé à lèvre triangulaire soulignée par une cannelure interne. Pâte brun gris à fin dégraissant sableux. Traces de suie sur la face extérieure. Couche 72. N° inv. 52629-1 et 53157-1.
- 42 Pot. Fragment de paroi. Pâte brun clair, dégraissant sableux. Décoré d'une cannelure. Couche 73A. N° inv. 52777-5.
- 43 Pot. Fond lenticulaire. Paroi mince. Pâte grise (cœur) et brun-orange (surface), fin dégraissant sableux. Couche 72. N° inv. 52642-1.
- 44 Pot. Fond plat, épais. Paroi mince. Pâte brun clair, à dégraissant sableux moyen. Traces de doigt sur la partie inférieure. Couche 73A. N° inv. 52775-4 à 6.
- 45 Pot. Fond plat, épais. Pâte brun clair, surface intérieure beige se délitant; dégraissant sableux fin. Couche 78. N° inv. 52773-6 à 10 et 52778-1,2.
- 46 Pot. Fond plat. Amorce de paroi épaisse. Pâte brun clair, dure, à dégraissant sableux moyen. Couche 73. N° inv. 52777-4.
- 47 Fragment de fer d'équidé usé. Etampure carrée? incomplète. Couche 72. N° inv. 52644-1.
- 48 Clou de fer d'équidé à tête en forme de clef de violon. Longueur 25 mm, tête 15 mm sur 4 mm. Couche 87B. N° inv. 52785-2.

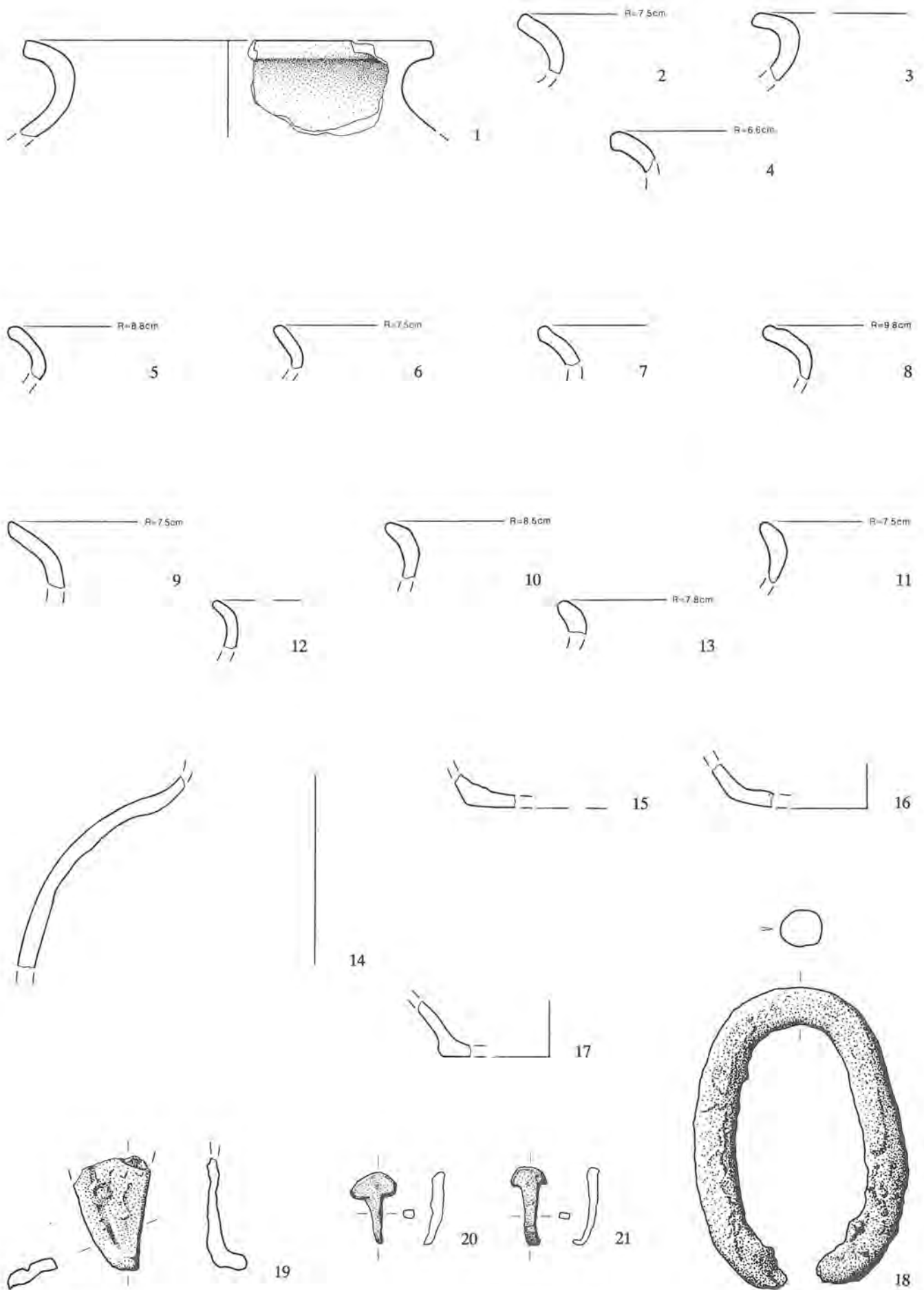


Fig. 88: Roches - Combe Chopin 1996. Matériel du secteur A, couches 70 et 82. Echelle 1:2. Légende page 85.

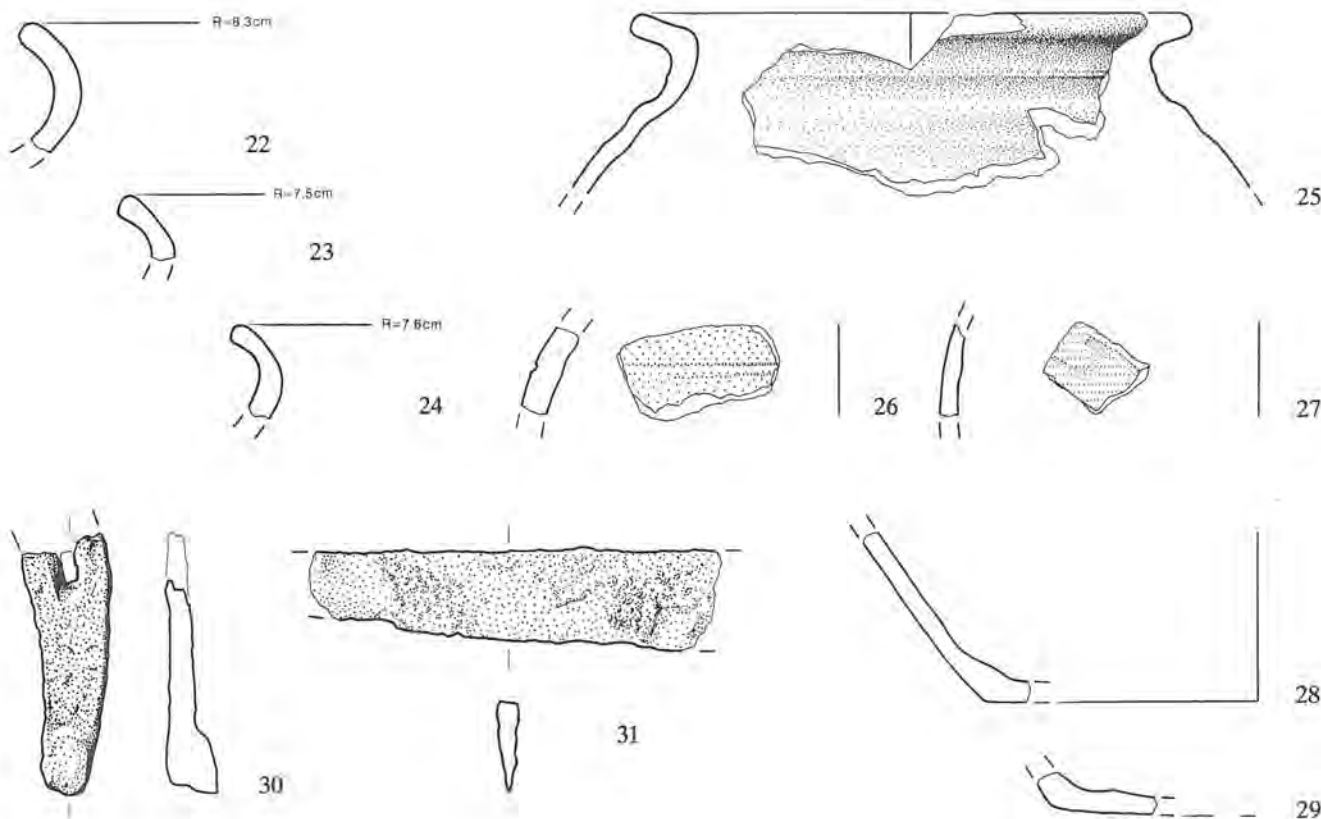


Fig. 89: Roches - Combe Chopin 1996. Matériel du secteur B, couches 73 B-D, 80A et 98. Echelle 1:2. Légende page 85.

- 49 Clou de fer d'équidé à tête carrée, facettée, peu usée. Longueur 36 mm, tête 10 mm de côté et 9 mm de haut. Couche 72. N° inv. 52753-1.
- 50 Petite boucle unguiforme en bronze. Ardillon cassé. Couche 72. N° inv. 52751-1. Datation: médiévale ou moderne.
- 51 Fourneau de pipe en terre blanche. Liseré soulignant la bouche. Talon estampillé: chiffre 96 ou 46, peut-être surmonté d'une couronne; côté gauche marqué de trois globules disposés en triangle. Diamètre extérieur: 24 mm; ouverture: 19 mm. Couche 72 (humus). N° inv. 52756-1. Forme comparable: Röber 1995, 32 et 33; ACBE 3A, 177, 3 et 184, 4; Schmaedecke 1999 ne signale ni le talon au chiffre 96 ni la marque aux trois globules disposés en triangle. Il s'agit probablement d'une copie d'un modèle hollandais (de Gouda?). Datation: XVIIIe s.
- 57 Fragment de fer d'équidé. Branche étroite, crampon usé, étampure rectangulaire. N° inv. 52786-52.
- 58 Clou de chaussure en fer, tige repliée. Longueur 10 mm, tête circulaire, aplatie de 10 mm de diamètre. Sondage 13. N° inv. 52790-4.
- 59 Clou de fer d'équidé à tête en forme de clef de violon, tête peu usée. Longueur 30 mm, tête 15 mm sur 6 mm. Sondage 16. N° inv. 52786-53.
- 60 Clou de fer d'équidé à tête en forme de clef de violon, usée. Longueur 30 mm, tête 16 mm sur 4 mm. Sondage 17. N° inv. 52793-6.
- 61 Clou de fer d'équidé à tête en clef de violon, fragmenté, usé. Longueur 20 mm, tête 7 mm sur 12 mm. Sondage 13. N° inv. 52790-3.
- 62 Clou de fer d'équidé? à tête arrondie, usée. Longueur 37 mm, tête plus ou moins circulaire de 10-12 mm de diamètre. Sondage 13. N° inv. 52790-2.
- 63 Clou de fer d'équidé à tête carrée, aplatie, fragmenté, usé. Longueur 28 mm, tête de 11 mm de côté. Sondage 15. N° inv. 52792-8.
- 64 Clou de fer d'équidé à tête quadrangulaire. Sondage 16. N° inv. 52786-54. Datation: moderne.

Secteur C (fig. 91)

- 52 Pot. Bord évasé à lèvres biseautées. Col cintré peu développé. Pâte brun-orange, bien cuite, à fin dégraissant sableux et calcaire. Sondage 18. N° inv. 53153-12 à 15. Comparaison: Barfüsserkirche pl. 43, 1-2 (Xe s.), Datation: XIIIe s.
- 53 Pot. Bord déversé à lèvres épaissies, arrondies. Col tronconique peu développé. Pâte grise à fin dégraissant micacé. Sondage 16. N° inv. 52786-1 à 4. Comparaison: proche de Nidau - Schloss 1985 n° inv. 6562, 6550 et 6568 (datation dendrochronologique: après 1180); ACBE 5 à paraître. Datation: XIIIe s.
- 54 Pot. Bord évasé à lèvres en bourrelet, soulignée d'une cannelure interne. Pâte brun clair à fin dégraissant sableux. Sondage 15. N° inv. 52792-1.
- 55 Pot. Bord évasé, aminci? Pâte brun-rouge (cœur) à gris foncé (extérieur), fin dégraissant sableux. Sondage 16. N° inv. 52786-36 et 37.
- 56 Marmite tripode. Pâte beige-rosé, fin dégraissant sableux. Surface interne glaçurée brun miel sur engobe blanc. N° inv. 52789-1 à 3, 5 et 8. Datation: XVIIIe s.?

Matériel non stratifié, provenant des secteurs A, B et C confondus (fig. 91)

- 65 Fragment de col de cruche. Pâte orange fine, savonneuse, fin dégraissant à inclusions calcaires. Traces d'anneau et amorçe d'anse. Sondage de reconnaissance 3 (1995). N° inv. 52153-1, 2. Datation: époque romaine.
- 66 Pot. Fragment de paroi. Pâte grise à dégraissant sableux fin. Décor de fines stries de tournage et d'une ligne ondulée. Sondage 18. N° inv. 52787-7, 8 et 53153-4.
- 67 Pot. Fragment de paroi. Pâte brune, fin dégraissant sableux. Décoré de deux cannelures. N° inv. 52787-9, 10.
- 68 Pot. Fragment de paroi. Pâte gris-brun, fin dégraissant sableux. Décoré de deux cannelures. N° inv. 52787-13, 14.

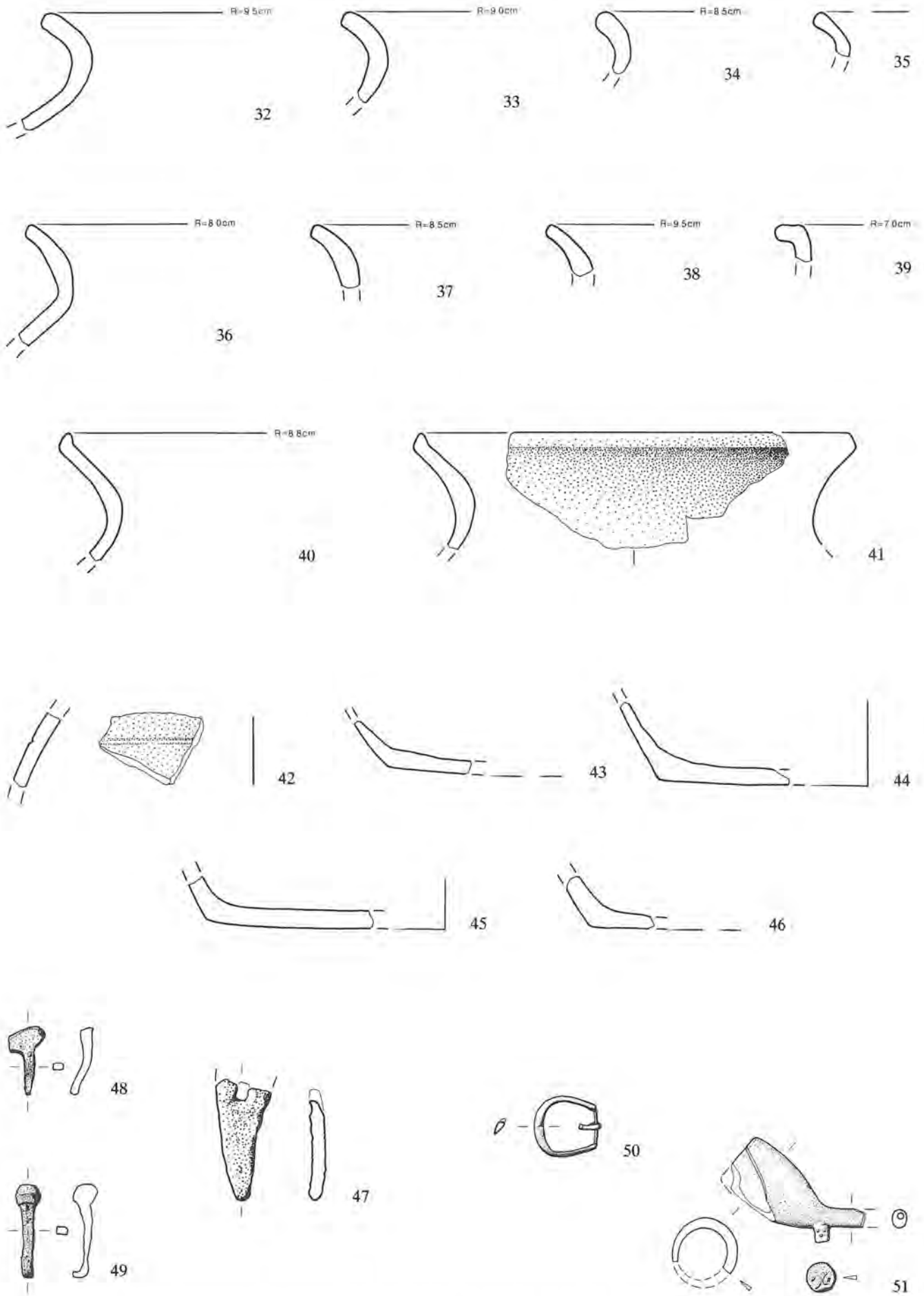


Fig. 90: Roches - Combe Chopin 1996. Matériel du secteur B, couches 72, 73A, 78, 87 B et 95. Echelle 1:2. Légende p. 85-86.

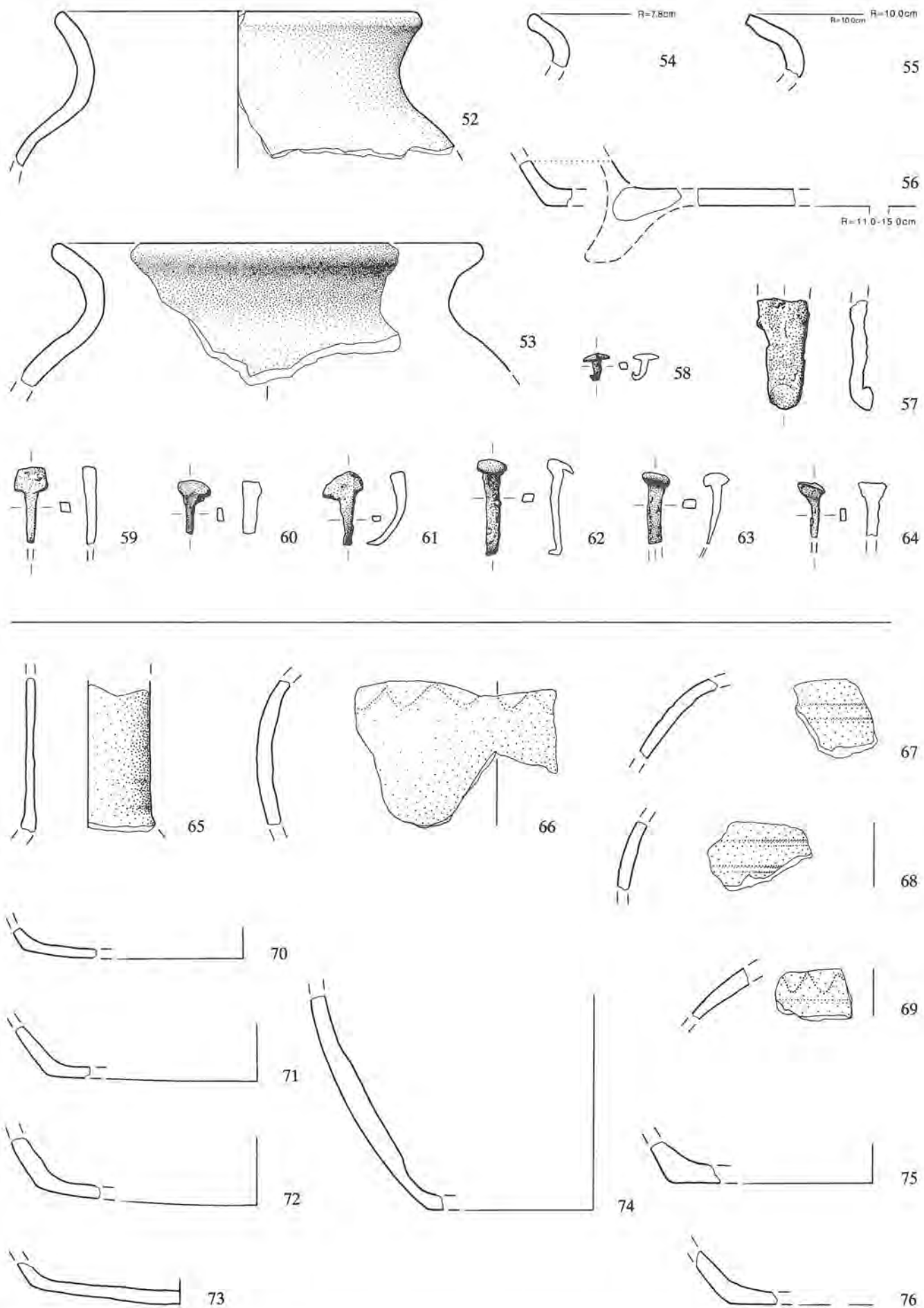


Fig. 91: Roches - Combe Chopin 1996. Matériel du secteur C (en haut) et matériel non stratifié de l'ensemble de la fouille (en bas). Echelle 1:2. Légende p. 87 et 90.

- 69 Pot. Fragment de paroi. Pâte grise à dégraissant sableux fin. Décor de fines stries de tournage et d'une ligne ondulée. Sondage 16. N° inv. 52786-6.
- 70 Pot. Fond lenticulaire. Pâte grise à fin dégraissant sableux. Sondage 16. N° inv. 52786-34 et 35.
- 71 Pot. Fond lenticulaire. Pâte brun-ocre à dégraissant sableux et calcaire moyen. Sondage 16. N° inv. 52786-47 à 49.
- 72 Pot. Fond lenticulaire. Pâte grise (cœur) et brun-rouge (surface) à dégraissant sableux moyen. Dépôt beige à l'intérieur. Couche 71A. N° inv. 52788-1.
- 73 Pot. Fond lenticulaire. Pâte brun-orangé à l'intérieur et grise à l'extérieur, dégraissant sableux moyen. Sondage 16. N° inv. 52786-49.
- 74 Pot. Fragment de panse. Pâte grise à fin dégraissant sableux et inclusions calcaires, un peu savonneuse. Extérieur lissé. Sondages 16 et 18. N° inv. 52786-13 à 15 et 52787-17 à 21.
- 75 Pot. Fond plat? Pâte brune à l'extérieur et grise à l'intérieur, dégraissant sableux à inclusions calcaires. Paroi extérieure lissée. N° inv. 53157-9.
- 76 Pot. Fond plat. Pâte gris clair, dure, à fin dégraissant sableux (inclusions calcaires?). Dépôts ferreux? à l'intérieur. Sondage 18. N° inv. 52787-22.

D. Datations archéologiques

Dans l'introduction au catalogue, nous avons mis en évidence la coexistence au sein de mêmes complexes de formes céramiques variées, pas forcément contemporaines. Les différents complexes présentent une certaine unité dans le spectre des formes, ce qui nous conduit à envisager une contemporanéité des horizons, ou en tout cas une activité du site limitée dans le temps, peut-être à quelques années seulement.

Les pots culinaires à lèvres évasées simples sont traditionnellement datés du XIe-XIIe siècle, mais ces formes en raison de leur simplicité persistent certainement plus longtemps que les pots, dont les bords présentent une lèvre plus moulurée qui font défaut ici. Les formes représentées à Roches - Combe Chopin offrent de très bons parallèles avec la céramique de Nidau - Schloss 1985 (ACBE5 à paraître), dont les complexes sont bien datés (terminus post quem dendrochronologique de 1180). On retrouve un certain nombre de formes dans les horizons d'habitat antérieurs à l'édification de la Barfüsserkirche de Bâle, dont la fondation remonte à 1250. Aucune lèvre à bandeau, si typique de la deuxième moitié du XIIIe siècle, n'est présente, ce qui indique clairement que l'atelier de la Combe Chopin remonte avant 1250. Les datations ¹⁴C réalisées confirment d'ailleurs cette datation (tab. 9). Ainsi notre céramique peut-elle être grossièrement située entre 1180 et 1250.

E. Datations physico-chimiques

Deux méthodes de datation ont été appliquées au site de la Combe Chopin. La première est celle du radiocarbone ou ¹⁴C; la seconde, moins utilisée, est la thermoluminescence. Les résultats obtenus par ces deux méthodes paraissent confirmer la succession rapide de deux activités différenciées sur le site.

a) Datations par radiocarbone

Trois échantillons de charbon prélevés dans les niveaux associés ou liés à l'exploitation du bas fourneau, ont été datés par la méthode du radiocarbone. Deux analyses ont été pratiquées sur des fragments de charbon provenant de la couche 96 qui forme un tapis charbonneux au fond du fourneau. Le troisième échantillon de charbon a été extrait d'une scorie de la couche 73B.

Les résultats révèlent des intervalles presque identiques, donc une faible dispersion. Ceci rend vaine toute tentative d'affiner la datation du fourneau. Les datations calibrées obtenues (valeur 2σ) sont: 1033-1260, 1021-1238 et 1039-1273 (voir tab. 9). Elles situent donc la construction et la mise en service du bas fourneau entre le XIe et le XIIIe siècle. Deux échantillons (ETH-16785 et 16212) ont livré des résultats très proches, notamment au niveau des pics de probabilité, qui se situent autour des années 1068/1070, 1130 et 1191/1200, avec respectivement 20 à 26%, 11 à 15% et 59 à 69% de probabilité. Le troisième échantillon daté présente une image semblable, mais la probabilité statistique diffère: 1075, 1130 et 1169 avec 47%, 27% et 26% de probabilité.

Sur la base de ces résultats, il semble que nous puissions situer l'activité du bas fourneau plutôt vers la fin du XIIe siècle, ce que vient confirmer d'ailleurs aussi l'analyse typologique des formes céramiques découvertes sur le site.

Tab. 9: Roches - Combe Chopin. Datations ¹⁴C, valeur 2σ, intervalle 2σ le plus probable (%) et valeur 1σ. Calibration effectuée au moyen du Radiocarbon Calibration Programm 1993 (REV 3,0.3) de l'University of Washington, Quaternary Isotope Lab: INTCAL93.14C.

ETH-16212/880 ± 55 BP	1025-1279 ADcal (valeur 2σ)
UZ-3944	1033-1260 ADcal (2σ-100%)
Charbon de bois couche 96 n° inv. 52771	1048-1228 ADcal (valeur 1σ)
ETH-16786/910 ± 55 BP	1016-1257 ADcal (valeur 2σ)
UZ-3973	1021-1238 ADcal (2σ-100%)
Charbon de bois couche 96 n° inv. 53215	1034-1216 ADcal (valeur 1σ)
ETH-16785/870 ± 60 BP	1025-1283 ADcal (valeur 2σ)
UZ-3972	1039-1273 ADcal (2σ-100%)
Charbon de bois couche 73B n° inv. 53214	1052-1248 ADcal (valeur 1σ)

Les échantillons ont été préparés par le Laboratoire de Radiocarbone de l'Institut de Géographie de l'Université de Zurich (GIUZ), puis datés au moyen de la technique AMS (accelerator mass spectrometry) sur l'accélérateur Tandem de l'Institut de Physique des particules de l'EPFZ-Hönggerberg à Zurich.

b) Datation par thermoluminescence

En l'absence de charbon de bois suffisant, une datation par thermoluminescence a été tentée sur le premier et le second sols du four 93. Les mesures du rayonnement gamma

ont été effectuées sur place par I. Wagner¹¹¹ au moyen d'un spectromètre à quatre canaux. Il a en outre été prélevé une quantité représentative de matière du four. Des deux échantillons prélevés sur place par Wagner lui-même, un seul a pu être daté. Le résultat obtenu après calibration est de 1324 +/- 122a (2σ)¹¹², ce qui correspond à une fourchette chronologique située entre 1202 et 1446. Le second échantillon n'a pu être daté en raison d'un déficit en grains de quartz. Quoiqu'un peu plus tardive, cette datation ne remet pas en cause la chronologie du site, puisque stratigraphiquement, ce foyer – dont la fonction n'a pu être établie avec certitude – est postérieur ou au plus tôt contemporain du bas fourneau.

Précisons encore qu'afin de préserver le bas fourneau en vue de sa mise en valeur, aucune datation archéomagnétique n'a été entreprise.

En conclusion, la confrontation des données typologiques et des datations physico-chimiques permet de situer l'exploitation sidérurgique de la Combe Chopin plutôt dans la deuxième moitié du XIIe siècle. La présence, parmi des tessons du XIIe siècle, de formes céramiques plus anciennes (pots à lèvres simples) ne constitue pas à proprement parlé une surprise ou une distorsion chronologique. Nous sommes d'avis que des formes traditionnelles peuvent fort bien perdurer durant plusieurs générations. De surcroît, nous ne pouvons pas exclure que sur le site de la Combe Chopin, les sidérurgistes aient utilisé intentionnellement de vieux pots usagés, de moindre valeur.

Les résultats des datations radiocarbone et par thermoluminescence confirment les conclusions de l'analyse typologique du matériel céramique qui situe l'exploitation sidérurgique de Roches vers la fin du XIIe siècle.

c) *Cadre historique*

Les premières mentions de Roches, en tant que courtine ou territoire dépendant de la Prévôté de Moutier-Grandval, remontent à 1308 et 1317.¹¹³ On n'y trouve aucune information relative à une quelconque exploitation de minerai de fer. Les terres situées dans cette partie des gorges de Moutier dépendent alors, en partie du moins, du monastère de Moutier-Grandval. En 999, Rodolphe III, roi de Bourgogne fait don du monastère et de ses dépendances – donc certainement le passage des gorges de Moutier – à l'évêque de Bâle Adalbert, qui accroît ainsi de manière considérable les territoires sous son influence. Plus tard, les comtes de Soyhières, puis ceux de Ferrette deviennent avoués ou protecteurs laïques du monastère de Moutier-Grandval¹¹⁴, et ce jusqu'à la fin du XIIIe siècle. La juridiction temporelle sur toute cette région appelée le Salisgau, comprenait les vallées de la Sorne et de la Birse, donc aussi la majeure partie des possessions du monastère de Moutier, devenu Chapitre à la fin du XIe siècle. Ce territoire reviendra au prince-évêque de Bâle à l'extinction des comtes de Ferrette.¹¹⁵

Mais revenons brièvement au XIe siècle. Vers 1080 l'évêque bâlois acquiert le comté d'Härkingen (Olten-Oensin-

gen) et le Buchsgau¹¹⁶ (Welschenrohr, vallée de la Dünneren). Par là-même, il assoit son autorité sur des territoires situés à l'est de Moutier-Grandval, qui n'auraient que peu d'intérêt pour notre étude, s'ils ne recelaient pas eux aussi des mines de fer, exploitées dès le Haut Moyen Age. La mainmise progressive de l'évêché sur les territoires méridionaux procure non seulement d'évidents avantages stratégiques, mais garantit aussi de nouveaux revenus.

On constatera encore avec intérêt qu'une confirmation des biens du Chapitre de Moutier-Grandval exécutée en 1179, mentionne qu'un quart des mines de fer d'Eschert «quartam de ferrofodinis de Escert»¹¹⁷ revenait au Chapitre. Cette révélation est des plus intéressantes, puisqu'elle signale l'exploitation de mines de fer, durant la deuxième moitié du XIIe siècle, dans le Grand-Val qui fait partie du même espace géopolitique que Roches. De surcroît, nous apprenons que le Chapitre en partage le revenu peut-être avec le prince-évêque ou les avoués du Chapitre.

La rareté des documents d'archives témoignant de l'exploitation du fer dans le Jura, n'autorise pas d'aller plus avant dans les hypothèses. De nombreuses questions subsistent, notamment celle du rôle qu'ont pu jouer les abbayes de Moutier et Bellelay, en tant que grands propriétaires fonciers, dans l'exploitation des mines de fer. Ces deux monastères, respectivement bénédictin et prémontré n'ont assurément pas exploité de leurs propres mains, tel l'ordre dit «métallique» des Cisterciens, les richesses minières de leurs terres. Ces fondations religieuses ont-elles servi à ranimer la foi chrétienne des cultivateurs, mineurs, charbonniers et autres forgerons qui défrichaient et exploitaient les flancs de nos vallées? Ces moines et chanoines avaient-ils un droit de regard ou même un pouvoir de décision quant à l'exploitation des richesses minières que recelaient leurs domaines? Peut-être pas, mais il est hautement probable qu'ils en aient tiré des revenus.

6. Scories et autres déchets métallurgiques associés

Sur le site de Roches - Combe Chopin, les déchets métallurgiques étaient concentrés dans les deux secteurs attenants A et B. La halde, c'est-à-dire la zone de rejet principale, se trouvait dans le secteur B. Toutes les scories du site ont subi un traitement succinct au moment de la fouille: prélèvement, nettoyage rapide et pesage. Les fragments de taille moyenne ont été récupérés par tamisage. Certains éléments ont été prélevés, en particulier des pièces dont la

111 Laboratoire de recherche archéométrique de l'Académie des sciences de Heidelberg (Institut de physique nucléaire Max Planck).

112 Calibration 1s: 1324 61a. En doublant la marge d'erreur on obtient une datation à valeur 2s.

113 Trouillat III, 131 et 259.

114 Nouvelle Histoire du Jura 1984, 70.

115 Nouvelle Histoire du Jura 1984, 76.

116 Nouvelle Histoire du Jura 1984, 66.

117 Trouillat I, 371.

forme semblait particulièrement intéressante ainsi que quelques gros éléments provenant de la paroi du fourneau. Ces pièces ont été conservées et inventoriées. D'autre part, des prélèvements en bloc de l'ensemble du matériel provenant de quelques mètres carrés ont été effectués de manière à fournir un échantillonnage représentatif pour l'étude approfondie.

La halde a été fouillée sur environ 70 m². Elle s'étend en nappe peu épaisse tout autour du bas fourneau. A l'aval, à cinq ou six mètres à l'ouest du bas fourneau, elle forme un léger bombement dans la topographie et atteint une épaisseur de l'ordre de 50 cm au maximum. Au-delà, la couche s'amincit progressivement et a pu être repérée sur encore une quinzaine de mètres. La limite sud se trouve à quatre mètres du bas fourneau. A l'est, la couche a été fouillée sur trois mètres environ ce qui a permis de constater la disparition presque complète des scories. De même au nord, l'extension n'est pas connue car la couche a été érodée par le ruisseau.

D'après les vestiges observables, l'extension maximum de la halde de scories ne devait pas dépasser les 100 m². Le volume est de l'ordre de 20 m³.

La quantité totale de scories recueillies au cours de la fouille de la majeure partie de cette halde est de 8'000 kg environ. Le volume érodé ne peut pas être évalué avec beaucoup de précision mais il est peu probable que le volume total soit nettement supérieur à la dizaine de tonnes. On ne trouve que peu de débris dans la pente à l'aval du site.

En moyenne donc, on peut estimer que la couche contient de l'ordre de 100 kg de déchets au mètre carré pour une épaisseur moyenne de 20 cm. Un mètre cube de sédiments archéologiques contient environ 500 kg de déchets métallurgiques.¹¹⁸

Avec un tel volume, le site de la Combe Chopin reste un ferrier de taille modeste par rapport aux plus grands sites du district jurassien (Eschenlohr 2001). Quelques sites médiévaux des Franches-Montagnes atteignent ou dépassent les 500 m³. A Corcelles, les volumes de déchets des deux grands sites complexes sont estimés respectivement à 2000 et 3000 m³. Ces ferriers importants sont tout de même exceptionnels dans le Jura, la moyenne des sites médiévaux se trouvant plutôt vers 150 m³. Les sites plus précoces, ceux du Haut Moyen Age, sont en général plus modestes, avec moins de 50 m³ de déchets.

La couche de scories du mètre carré 118/70 a fait l'objet d'un prélèvement systématique en vrac de 60 kg qui a pu être étudié au laboratoire (tab. 10). De même, les échantillons prélevés au cours de la fouille et lors de plusieurs visites sur le terrain donnent une image assez précise de la nature de ces matériaux et de leur fréquence.

Le matériel collecté a fait l'objet d'une classification morphologique basée sur les critères de reconnaissance

Tab. 10: Roches - Combe Chopin 1996. Quantification des déchets métallurgiques pour le m² 118/70 et estimation des quantités pour l'ensemble du site.

CLASSIFICATION DES DECHETS METALLURGIQUES	m ² 118/70	%	ensemble du site kg
	couche 73 gr		
minerai			< 5
paroi	355	1	80
scorie vitreuse noire SVN	53 200	89	7 120
scorie grise dense SGD	5 100	8	640
verre noir	500	1	80
scorie ferreuse rouillée SFR	855	1	80
Total	60 010	100	8 000

macroscopique comme l'aspect, la couleur, la forme, la réaction à l'aimant et la densité apparente. Une fois les catégories établies, le matériel a été trié et pesé de manière à obtenir une image globale du contenu de la halde et donc des déchets produits par ce bas fourneau.

Par la suite, des échantillons représentatifs des différentes catégories de déchets ont été sélectionnés et ont fait l'objet d'analyses chimiques et autres observations complémentaires. Ces travaux ont été effectués au Centre d'Analyse Minérale de l'Université de Lausanne. Les analyses et les descriptions des échantillons figurent en annexe.¹¹⁹

A. Les différentes catégories de déchets métallurgiques

Le sédiment de la halde contenait une forte proportion de débris divers. La grande majorité des fragments sont des scories au sens propre, c'est-à-dire des corps ayant subi une fusion au cours d'un processus métallurgique. On distingue quatre grandes catégories de scories dans le matériel de Roches. Les autres éléments sont des fragments de minerai, des éléments de paroi et des matériaux argilo-sableux fondus. Il faut aussi noter la présence d'un peu de

¹¹⁸ Un essai en laboratoire de mesure de la densité apparente des scories a donné un chiffre comparable. Une caisse de 18 litres de contenance a été remplie avec des scories propres et pesées. Les mesures sont les suivantes: 8,5, 7,6 et 9,2 kg soit 470, 420 et 530 kg/m³.

¹¹⁹ Je remercie le professeur H.-R. Pfeifer, chef du Centre d'Analyse Minérale de l'Université de Lausanne et J.-C. Lavanchy, chimiste responsable pour toute l'aide qu'ils m'ont apportée dans le cadre de cette étude et de biens d'autres. Les déchets métallurgiques ont été analysés selon les méthodes et les procédures mises au point dans le cadre des recherches de la thèse de Serneels. Elles sont décrites en détail dans cet ouvrage (Pfeifer et al. 1991, Serneels 1993). Les analyses chimiques globales sont réalisées par la méthode de la fluorescence des rayons X avec un spectromètre Philips PW 1400 en utilisant une gamme de standards appropriée. Diverses mesures complémentaires sont effectuées (perte au feu, dosage du carbone et du fer ferreux).

mobilier archéologique: céramique et petits objets. La partie meuble du sédiment comportait une proportion notable de charbon de bois qui lui donnait une couleur sombre très prononcée.

La fragmentation du matériel est assez forte. Les morceaux n'ont en général que des arêtes de quelques centimètres de long, rarement plus de quinze. Elles pèsent en général moins de 200 g. Les pièces plus grosses sont rares. Dans le prélèvement en vrac, aucun fragment ne dépasse 500 g. Elles possèdent toujours certaines surfaces qui résultent de cassure. Ce sont donc des fragments qui appartenaient à des pièces initialement plus volumineuses.

B. Les fragments de paroi

Les matériaux argilo-sableux fondus sont relativement rares dans le prélèvement en vrac qui a été étudié, ils ne forment qu'un pour-cent de la masse totale (tab. 10). Cette rareté ne découle pas de la méthode de prélèvement mais reflète la situation réelle, ce qui a été contrôlé sur le site même.

Ces pièces sont assez similaires les unes aux autres et ressemblent en tous points aux éléments du revêtement interne de la cuve du bas fourneau qui ont été observés en place. Leur provenance et leur fonction ne laissent aucun doute.

Les pièces ont des formes de plaque de quelques centimètres d'épaisseur ou de bloc irrégulier (fig. 92 a et b). Elles présentent toutes une surface qui a subi un fort impact de chaleur et presque toujours une fusion superficielle. Cette surface fondue prend des teintes particulières: brunâtre, noirâtre ou lie de vin. On observe aussi assez fréquemment une belle vitrification vert sombre. Cette vitrification est nette sur la surface mais aussi le long de fractures qui s'insinuent dans le matériau.

Au contact de la surface se trouve une zone qui a subi une certaine fusion et qui prend un aspect compact et lisse caractéristique. Plus à l'intérieur, la texture devient plus poreuse et le matériau est plus friable. Dans ces parties qui ont moins chauffé, on reconnaît un sable composé de grains de quartz fins et réguliers. La teinte est très blanche, parfois légèrement jaune.

Neuf analyses chimiques ont été effectuées sur sept échantillons (annexe 3). Elles montrent toutes que le constituant essentiel est la silice, par contre les variations sont assez importantes (SiO_2 : 75 à 95%). En fait, si l'on considère les analyses qui ont porté sur des matériaux n'ayant pas subi de fusion (éch. RCC 7032, 7052 et 706), on constate des teneurs très élevées en silice et la quasi absence de tous les autres oxydes à l'exception de l'alumine (Al_2O_3 : 5%). La présence de ces substances, en particulier des oxydes de fer, dans les autres échantillons est le résultat d'une contamination du matériau de revêtement par la charge du fourneau. Il y a un apport du minerai qui provoque l'augmen-

tation des teneurs en fer mais influence sans doute la plupart des autres éléments (par exemple le vanadium V, un élément caractéristique du minerai). L'effet du combustible est aussi sensible. Les cendres contiennent de la chaux (CaO) et de la potasse (K_2O), deux oxydes dont les teneurs dans les parois ne peuvent pas être expliquées seulement par un apport du minerai.¹²⁰ Ces données démontrent clairement qu'il y a des échanges chimiques importants entre le revêtement de la paroi et la charge qui est dans la cuve (fig. 94).

Les caractères chimiques du matériau sain sont particulièrement simples. A côté de la silice le seul oxyde présent avec une teneur supérieure à un pour-cent, est l'alumine. Le rapport Al:Si peut être déterminé avec précision (17:1). Les éléments traces ne sont présents qu'à des teneurs très basses, sauf le zirconium (Zr: env. 120 ppm) et le cobalt, élevé mais variable (Co: 95, 144 et 495 ppm).

En tant que réfractaire, ce matériau est remarquable. Le point de fusion de la silice pure est de l'ordre de 1700°C.¹²¹ La présence d'un peu d'alumine ne l'abaisse que de quelques dizaines de degrés. En principe donc, ce sable ne devrait pas fondre aux températures atteintes lors de la réduction du minerai de fer. Or, on constate que dans le bas fourneau la fusion du revêtement se produit, comme les traces visibles le démontrent. Les analyses chimiques montrent clairement que la fusion se produit lorsqu'il y a une contamination. C'est ce mélange qui abaisse le point de fusion de manière notable. Le système chimique est malheureusement trop complexe pour que l'on puisse estimer le point de fusion du matériau contaminé sur la base de la composition chimique. D'après les teneurs en fer, silice et alumine, l'estimation des températures serait encore de l'ordre de 1500°C mais la présence de quelques pour-cents de chaux et de potasse abaisse encore ce point de fusion.

La comparaison avec le matériau argileux qui a été utilisé pour confectionner la sole du four 93 est parlante

120 Voir chapitre H ci-après: Approche quantitative de la production.

121 L'estimation de la température de fusion est basée sur le diagramme de phases du système $\text{FeO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Levin et al. 1964). Cette approche constitue une simplification (système à trois constituants seulement et conditions d'équilibre supposées) et les chiffres proposés sont donc indicatifs.

Légende fig. 92:

Roches - Combe Chopin 1996. a) Fragment de paroi, vue de la surface scorifiée; b) Fragment de paroi, vue de la coupe; c) Fragments de scorie noire vitreuse SVN; d) Détail d'un fragment de scorie noire vitreuse SVN; e) Fragments de scorie grise dense SGD; f) Détail d'un fragment de scorie grise dense SGD; g) Fragments de scorie ferreuse SFR; h) Coulée de scorie au cours de la reconstitution expérimentale d'une opération de réduction du minerai de fer sur le site des Martys (Aude, France) en 1992, sous la direction de Ph. Andrieux (Les Forges de Vulcain).

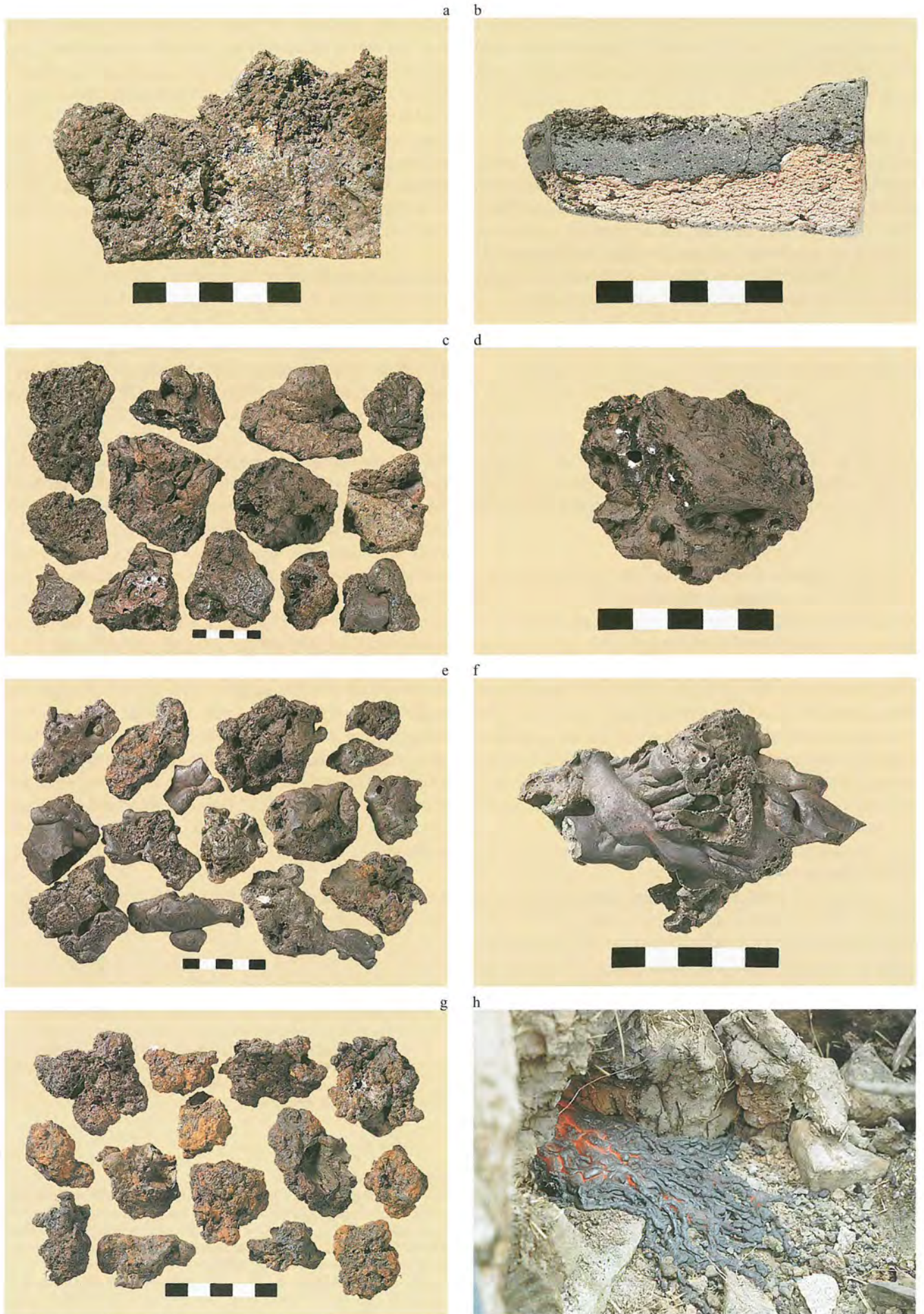


Fig. 92: Légende voir page 93.

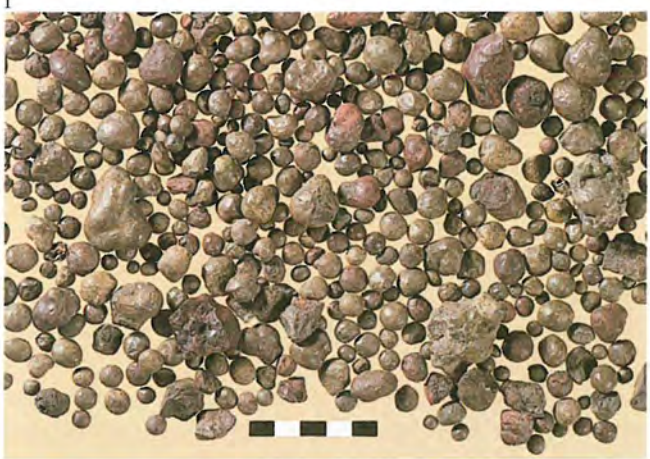


Fig. 93: Légende voir page 96.

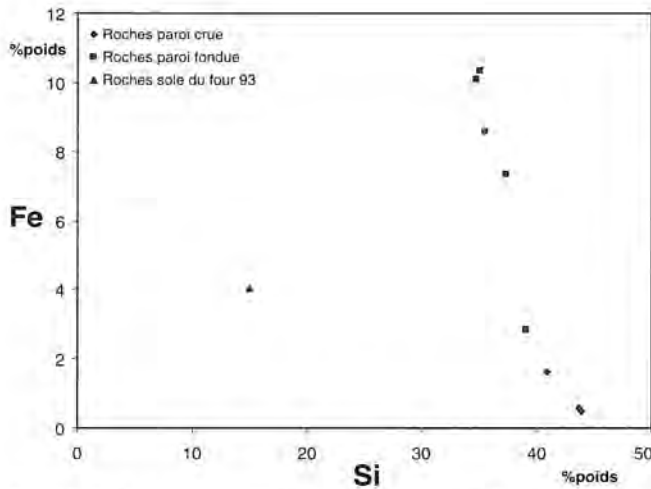


Fig. 94: Roches - Combe Chopin 1996. Rapports silicium: fer (Si: Fe) pour les fragments de parois. La partie scorifiée des échantillons est toujours nettement enrichie en fer par contamination.

(RCC 751). Ce dernier est une marne très riche en carbonate de calcium (CaCO_3). Elle ne résisterait pas à une température de plus de 1000°C . Manifestement, les artisans ont recherché un matériau adapté pour la construction et l'entretien de leur bas fourneau.

Un tel sable de quartz est difficile à trouver dans le Jura où les roches sont en grande majorité calcaires. Les formations superficielles ne peuvent pas en fournir. Par contre, dans la formation du Sidérolithique, associée aux minerais de fer, on trouve des poches de sable de quartz très pur. Ces faciès sableux sont bien connus dans la région de Moutier. Ils ont été largement exploités pour l'industrie du verre. L'abondance du zirconium dans le matériau de revêtement pourrait refléter l'utilisation de ce sable.

Le revêtement interne des bas fourneaux de Boécourt - Les Boulies a également été étudié et permettait d'arriver aux mêmes conclusions. Le sable utilisé à Boécourt est moins pur (SiO_2 env. 80%; rapport Si: Al = 7:1) et possède un spectre des éléments traces différent de celui de Roches, avec des teneurs élevées en baryum (Ba) et en rubidium (Rb).

Légende fig. 93:
 a) Bas fourneau reconstitué au château de Wildegg AG (Musée National Suisse) par le Groupe Suisse d'Archéologie du Fer en 1994; b) Eponge de fer produite au cours d'une reconstitution expérimentale de réduction du minerai de fer au château de Wildegg AG (Musée National Suisse) par le Groupe Suisse d'Archéologie du Fer en 1994; c) Affleurement de Sidérolithique argileux de Mervelier - Le Péca; d) Affleurement de Sidérolithique sableux de Court - Les Condemines (Combe de Chaluet); e) Rebeuvelier - La Verrerie. Argile rouge à pisolithes ferrugineux du Sidérolithique; f) Roches - Combe Chopin 1996. Pisolithes ferrugineux du Sidérolithique provenant de l'amas de scories; g) Court - Les Condemines (Combe de Chaluet). Argile sableuse à concrétions ferrugineuses du Sidérolithique; h) Court - Les Condemines (Combe de Chaluet). Concentré de lavage de l'argile sableuse du Sidérolithique. Les concrétions ferrugineuses ne peuvent pas facilement être séparées des autres débris.

C. Les scories noires vitreuses.

La catégorie des scories noires vitreuses ou SVN est, de très loin, la plus importante parmi les déchets métallurgiques de Roches. Dans le prélèvement en vrac, elle représente près de 90% de la masse. C'est le déchet typique de cette technologie.

Le matériau est d'aspect vitreux sans avoir l'éclat d'un véritable verre (fig. 92 c,d et fig. 95 a). Les spectres de diffraction des rayons X indiquent la présence de fayalite (Fe_2SiO_4), d'un spinelle de la famille de la hercynite (FeAl_2O_4) mais le bruit de fond très élevé indique une cristallisation désordonnée et la présence d'une importante proportion de verre. L'observation visuelle confirme ces données.

La porosité est toujours très importante, entre 30 et 80% du volume selon les endroits. Localement, la texture est celle d'une mousse avec seulement une fine pellicule séparant les bulles. Les bulles de taille très variable et souvent de forme irrégulière, indiquent une viscosité élevée du liquide au moment où les gaz sont exsolvés. La température de la scorie au moment de son écoulement n'était donc que légèrement supérieure à son point de fusion. Compte tenu de la forte proportion d'alumine dans les scories, les températures théoriques de fusion sont élevées, situées entre 1300 et 1400°C .

En raison de cette porosité abondante, la densité apparente de ces matériaux est très basse: ces scories paraissent légères.

Comme les pièces sont fortement fragmentées, il n'est pas possible de décrire les formes complètes. On constate que

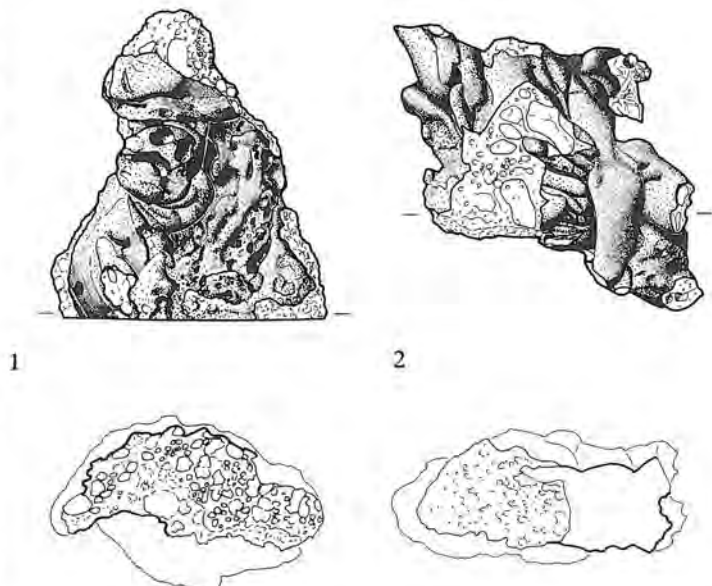


Fig. 95: Roches - Combe Chopin 1996. Fragments de scorie de réduction. Echelle 1:2.
 1 Scorie Noire Vitreuse SVN. Vue de la face supérieure et coupe.
 2 Scorie Grise Dense SGD. Vue de la face supérieure et coupe.

la majorité des fragments présentent des formes d'écoulement très irrégulières. Ces signes d'écoulement sont: les rides de flux marquées à la surface d'un matériau visqueux, la déformation des pores par élongation parallèle aux surfaces et les formes en gouttes ou en cordons.

Le contraste entre les surfaces inférieure (refroidissement en contact avec le substrat) et supérieure (refroidissement en contact avec l'air) est assez peu marqué. Les pièces les plus caractéristiques sont des tronçons de coulure d'un assez grand diamètre (5 à 10 cm) avec souvent une grande bulle tubulaire centrale.

Beaucoup de pièces possèdent des formes plus compliquées, tordues. Ces pièces ne se sont pas solidifiées après un écoulement normal à l'extérieur du fourneau, mais ont soit refroidi dans la cuve, soit été extraites alors que le matériau était encore mou mais plus réellement liquide. Lorsque l'on observe des empreintes de charbon de bois nombreuses, disposées sur plusieurs faces et avec des orientations variées, il ne fait aucun doute que les éléments se sont refroidis à l'intérieur de la cuve. De même, sur presque 10% des pièces, on observe des traces du revêtement sableux de la cuve adhérant à la scorie. Le contact s'est effectué à chaud et la pièce a dû ensuite être détachée à froid de la paroi. C'est aussi une preuve que ces éléments ont refroidi dans la cuve et non à l'extérieur.

Les différentes formes observées indiquent des situations de refroidissement diverses. Malheureusement, la fragmentation est trop importante pour que l'on puisse évaluer la proportion de chacune des situations, sauf pour les morceaux de scorie portant des traces du revêtement de la paroi.

Du point de vue chimique, les sept analyses réalisées montrent une bonne homogénéité (annexe 1). Ce sont des corps riches en fer à différents états d'oxydation (Fe_2O_3 , FeO et Fe ; Fe total: 25 à 35%). La silice est le second constituant (SiO_2 : 25 à 35%) et l'alumine est abondante (Al_2O_3 : 16 à 20%). Le rapport Si:Al est assez stable, autour de 1.5:1 (fig. 96). Parmi les éléments traces, on trouve des teneurs élevées en vanadium (V) et en chrome (Cr).

La quantité de fer ferreux (FeO) est en général supérieure à celle du fer ferrique (Fe_2O_3) et l'analyse fait ressortir la présence de fer métallique.¹²² Le milieu dans lequel ces scories se sont formées était donc fortement réducteur, comme cela est souhaitable.

D. Les scories grises denses

Les scories grises denses ou SGD sont nettement moins abondantes que les SVN dans le matériel de Roches, moins de 10%. C'est donc un type de déchet occasionnel. Le matériau est cristallisé, gris sombre à gris métallique (fig. 92 e,f et 95 b). Certaines surfaces sont lustrées et brillantes avec un éclat métallique mais en général elles sont ternes et sans éclat. Par la diffraction des rayons X, on

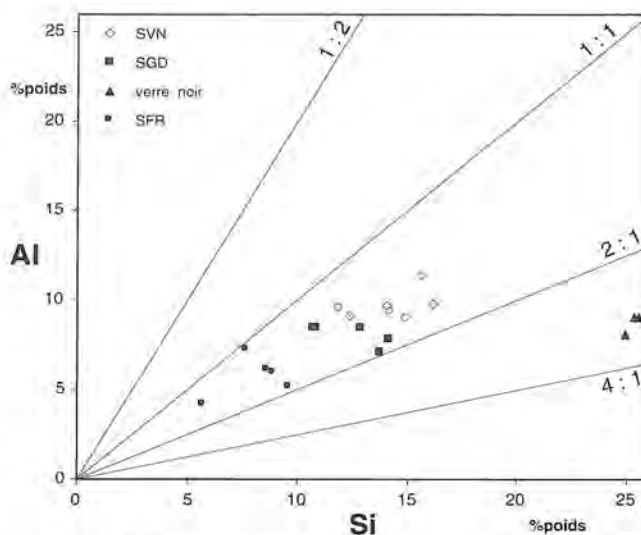


Fig. 96: Roches - Combe Chopin 1996. Rapports silicium:aluminium (Si:Al) pour les déchets métallurgiques.

identifie la fayalite (Fe_2SiO_4), un spinelle riche en fer de la famille de la hercynite (FeAl_2O_4) et la wüstite (FeO). Les spectres sont nets et la présence d'une éventuelle phase vitreuse est peu importante.

La porosité est faible (10–40%), en général sphérique et de petite taille (< 2 mm) mis à part quelques bulles centimétriques, souvent situées au centre de la pièce. Le dégazage de ces scories s'est effectué à une température à laquelle le matériau était complètement fluidifié, c'est-à-dire assez nettement au-dessus de son point de fusion. D'après les données théoriques, on peut estimer le point de fusion des SGD entre 1200 et 1300 °C, c'est-à-dire environ 100 °C en dessous des SVN. Ces scories paraissent beaucoup plus lourdes que les SVN.

La plupart des fragments observés sont très petits, quelques centimètres d'arête au maximum. Les plus grosses pièces, quoique fragmentaires, pèsent jusqu'à 250 g. Les formes témoignent clairement d'un écoulement, souvent en cordons de faible diamètre (1 à 3 cm) écoulés successivement les uns sur les autres. Les surfaces inférieures montrent des empreintes de charbon de bois. D'après les formes, on peut penser que ces scories se sont solidifiées après écoulement pratiquement horizontal vers l'extérieur du fourneau.

¹²² La teneur en fer métallique indiquée dans les tableaux d'analyses ne résulte pas directement d'une mesure mais est le résultat d'un calcul. On mesure la variation de poids de l'échantillon lors d'une calcination à 1000 °C. Au cours de ce traitement, l'eau, le gaz carbonique et les autres substances volatiles éventuelles sont perdues ce qui entraîne une diminution du poids. A l'opposé, le fer ferreux (FeO) et le fer métallique (Fe) s'associent à des atomes d'oxygène pour former du fer ferrique (Fe_2O_3) ce qui entraîne un gain de poids. On mesure séparément les quantités de FeO et de CO_2 présentes dans les échantillons. En tenant compte des teneurs de ces substances, on recalcule la perte de poids (perte d'eau) ou le gain (oxygène associé au fer métallique).

La composition chimique a été étudiée au moyen de cinq analyses (annexe 2) qui donnent des résultats assez similaires. Les teneurs en fer sont plus élevées que dans les SVN (Fe tot: 35 à 45%) alors que pour les autres éléments, les teneurs sont plus basses. Les rapports entre éléments chimiques des SGD sont similaires à ceux des SVN, mis à part une tendance à une plus faible proportion de chaux et de potasse dans les SGD. On retrouve les mêmes éléments traces dans les deux catégories, en proportions comparables.

E. Les verres noirs

Quelques petits fragments sont de véritables verres. Ils demeurent rares (1%) et forment une catégorie anecdotique.

Le matériau complètement vitreux, noir et brillant présente des cassures conchoïdales qui montrent bien son homogénéité. Aucun minéral cristallisé n'a été détecté par diffraction des rayons X dans les échantillons étudiés. Dans certains fragments, on observe nettement la présence de billes métalliques dispersées. Ces billes sont de faible diamètre (< 1 mm en général, rarement 2–3 mm) et très vraisemblablement constituées de fonte. La porosité est peu importante avec seulement quelques grandes bulles sphériques et régulières, dispersées dans le verre (moins de 5% sauf exception). En raison de leur compacité ses matériaux paraissent lourds.

Aucune observation concernant les formes n'a pu être effectuée en raison de la fragmentation. Une bonne fluidité semble avoir été atteinte. Par comparaison aux données du diagramme de phases de référence, la température de fusion se situerait vers 1300–1400 °C mais ce chiffre est sans doute surévalué en raison de la présence de quelques pourcents de chaux.

Du point de vue chimique, les trois analyses réalisées donnent des résultats très similaires entre eux (annexe 1). Par contre, ces verres sont nettement différents des SGD et SVN avec des teneurs en silice supérieures à 50% et peu de fer (Fe tot.: 15–18%). Pour les autres éléments chimiques majeurs, on trouve des teneurs qui sont du même ordre de grandeur que dans les autres scories mais les valeurs n'en sont pas identiques. Plus significatifs encore, les rapports entre les constituants sont complètement différents (Si:Al = 2,8:1, fig. 96). Le spectre des éléments traces a des points communs avec celui des SGD et SVN, en particulier pour les fortes teneurs en vanadium (V) et en chrome (Cr). Toutefois, les teneurs sont nettement différentes, de même que les rapports.

Le fer ferrique est quasiment absent ce qui démontre des conditions de réduction nettement plus fortes au moment de la formation que pour les SGD et SVN.

Ces verres noirs possèdent des caractères proches de ceux des déchets résultant de la réduction des minerais de fer

par la méthode indirecte, les laitiers. Normalement, les laitiers sont vitreux et peuvent contenir des billes de fonte. Les laitiers sont aussi enrichis en chaux, cette substance permettant d'abaisser notablement le point de fusion. Cette chaux est ajoutée à la charge sous forme de calcaire. Dans le cas de Roches, les teneurs ne paraissent pas assez élevées pour proposer qu'un fondant ait été ajouté à la charge.

On peut déduire des observations effectuées que ces verres noirs se sont formés dans des conditions fortement réductrices et permettant la formation d'une fonte.¹²³ De telles conditions vont influencer le comportement de certains éléments chimiques, en particulier ceux qui sont plus facilement réductibles que le fer (Cu, Ni, Co) ou qui en sont relativement proches (V, Cr, P, Mn). D'après les analyses, ces éléments semblent effectivement soustraits au système.

F. Les scories ferreuses

La dernière catégorie comporte quelques pièces riches en métal. Dans ce cas également, il s'agit d'une très faible quantité (moins de 1%).

Les surfaces externes de ces pièces sont recouvertes par une couche mélangée de rouille (hydroxydes de fer) et d'argile qui résulte de l'altération du matériau au cours de son enfouissement (fig. 92 g). Les surfaces sont assez irrégulières, on y observe des empreintes de charbon de bois. Ces nodules informes de quelques centimètres de longueur pèsent entre 10 et 80 gr. Sur quelques morceaux de scories ou de paroi, on remarque des nodules similaires.

Le matériau est un mélange en proportion variée de scorie grise dense à fayalite et de filaments ou de petites masses de métal. Le métal occupe entre 10 et 50% du volume. La texture est spongieuse avec une porosité assez abondante et irrégulière, souvent bouchée par les hydroxydes secondaires. Cette disposition du métal semble caractéristique de la formation à l'état solide (réduction directe).

Les cinq échantillons analysés correspondent à des prélèvements effectués dans des parties pauvres en fer. Les caractères chimiques sont relativement proches de ceux des SGD. La proportion de fer est supérieure (Fe tot 40 à 55%). Les autres éléments chimiques sont en plus faible quantité. La variabilité à l'intérieur du groupe est assez importante et les moyennes calculées ne peuvent pas être considérées comme représentatives.

Les rapports entre les éléments majeurs sont assez comparables aux chiffres que l'on trouve pour les SVN et les

¹²³ Cette affirmation se base sur la comparaison des rapports entre ces éléments réductibles et des éléments impossibles à réduire par le carbone comme Ti ou Al.

SGD. Par contre, pour les traces, on remarque les fortes teneurs des éléments facilement réductibles. Pour le nickel (Ni) et le cobalt (Co) la tendance est claire. Pour l'arsenic (As), elle l'est un peu moins. Le phosphore (P) semble aussi anormalement élevé. Ces trois éléments ont tendance, au cours de la réduction au bas fourneau, à se concentrer avec la phase métallique. Leur abondance dans ce groupe d'échantillons s'explique donc bien par l'abondance du fer métallique. Par contre, les éléments intermédiaires (V, Cr et Mn) ne sont pas particulièrement concentrés.

L'état d'oxydation du fer est très variable. L'altération secondaire (rouille) empêche de calculer dans de bonnes conditions les proportions entre les différents états d'oxydation du fer.

G. Les scories de Roches: comparaison avec les autres sites étudiés

Les déchets métallurgiques de la Combe Chopin sont largement dominés par les scories vitreuses noires qui forment l'écrasante majorité du matériel. Les scories grises denses et les scories ferreuses possèdent de nombreux points communs avec le groupe principal et il faut les considérer comme des cas extrêmes de ce groupe. Les rares fragments de verre noir dense sont nettement différents mais on manque d'informations pour les comprendre plus complètement. Les fragments de paroi sont anormalement peu nombreux.

Les SVN, du point de vue de leur nature, se rattachent à une famille de scories que l'on rencontre souvent sur les sites de réduction du Jura, tout au long de la chaîne (Salève, Mormont et Jura central). Les scories de Roches font penser à celles qui sont associées au fourneau d'Undervelier - Montepoirgeat 1.

Les SVN sont relativement pauvres en fer (plus pauvres que des scories purement fayalitiques) et riches en alumine. Ces compositions demandent des températures relativement élevées pour atteindre la fusion. L'abondante porosité déformée et les formes d'écoulement irrégulières qui caractérisent la morphologie de ces pièces, expriment cette mauvaise fusibilité.

Dans le cas du site de la Combe Chopin, une partie seulement des scories semblent écoulées en dehors du fourneau. De nombreux indices suggèrent qu'une part importante des déchets reste dans la cuve jusqu'à la fin de l'opération. Cette proportion est supérieure à ce que l'on observe à Boécourt ou sur les sites du Jura vaudois et du Salève (Serneels 1993, Pelet 1993, Abetel 1992).

Aux fourneaux médiévaux de «type Quiquerez» étudiés dans le Jura (Eschenlohr 2001), sont associées des scories d'un autre type. Il s'agit de pièces très riches en fer et dont les formes sont celles de blocs, plaques ou fonds de cuvette. C'est sans doute un argument supplémentaire pour ne pas considérer le fourneau de Roches comme un exem-

ple caractéristique de ce type de fourneau. En fait, les fourneaux de la période intermédiaire entre ceux du Haut Moyen Age et ceux du Bas Moyen Age restent très mal connus, faute de données archéologiques.

7. Le minerai et sa préparation

La découverte dans l'amas de scories et aux alentours de quelques kilos de pisolithes ferrugineux a permis d'identifier rapidement la nature du minerai utilisé dans le bas fourneau de la Combe Chopin (fig. 93 f). Ces concrétions ferrugineuses sont bien connues dans la région et leur emploi en sidérurgie, bien attesté. Il reste cependant à examiner plus en détail les possibilités d'approvisionnement du site.

A. Les minerais de fer dans la chaîne du Jura

La chaîne du Jura est constituée de roches sédimentaires, principalement des marnes et des calcaires, déposés au cours de l'ère Secondaire (Mésozoïque) dans une mer relativement peu profonde. Au Tertiaire (Cénozoïque), le Jura s'est trouvé émergé et les roches ont subi une forte érosion. Enfin, à la fin du Miocène, la mise en place des Alpes provoque le décollement et le plissement du Jura. Ces plis et les alternances de couches de roches dures et tendres qu'ils provoquent, déterminent en grande partie la topographie actuelle.

Les ressources en minerai de fer de la chaîne du Jura sont importantes et variées (Rosenthal 1989, fig. 97). Dans plusieurs niveaux différents des roches mésozoïques, se trouvent des accumulations de petites concrétions ferrugineuses sphériques de diamètre inférieur à 2 mm, des oolithes. Ces corps sont constitués de minéraux ferrugineux variés (oxydes, hydroxydes, carbonates et silicates) associés parfois à de la calcite et de l'opale. Ils sont en général déposés avec des particules détritiques relativement fines et constituent des marnes. Ces corps se forment en milieu marin lorsque l'eau est agitée et qu'un apport de fer important provient de l'érosion d'un continent. Dans différentes régions, cette situation s'est produite à plusieurs reprises au cours de l'ère Secondaire. En Suisse, le gisement le plus important de ce type de minerai se trouve dans le Fricktal (Herznach AG, Bühler 1986, Fehlmann et Rickenbach 1962).

Au cours de l'émersion tertiaire, les conditions climatiques étant comparables à celles des régions tropicales actuelles, l'altération des roches du Jura a donné naissance à un sol latéritique dans lequel le fer s'est concentré (fig. 93 c et d). Ce fer a formé des concrétions relativement grosses appelées pisolithes (diamètre supérieur à 2 mm et jusqu'à 20 cm). Les enveloppes externes, plus ou moins régulières, sont constituées d'oxydes et d'hydroxydes de fer qui entourent un cœur ferrugineux ou de nature différente. Dans certains cas, plusieurs pisolithes peuvent être réunis et recouverts par une même écorce d'hydroxydes de fer.

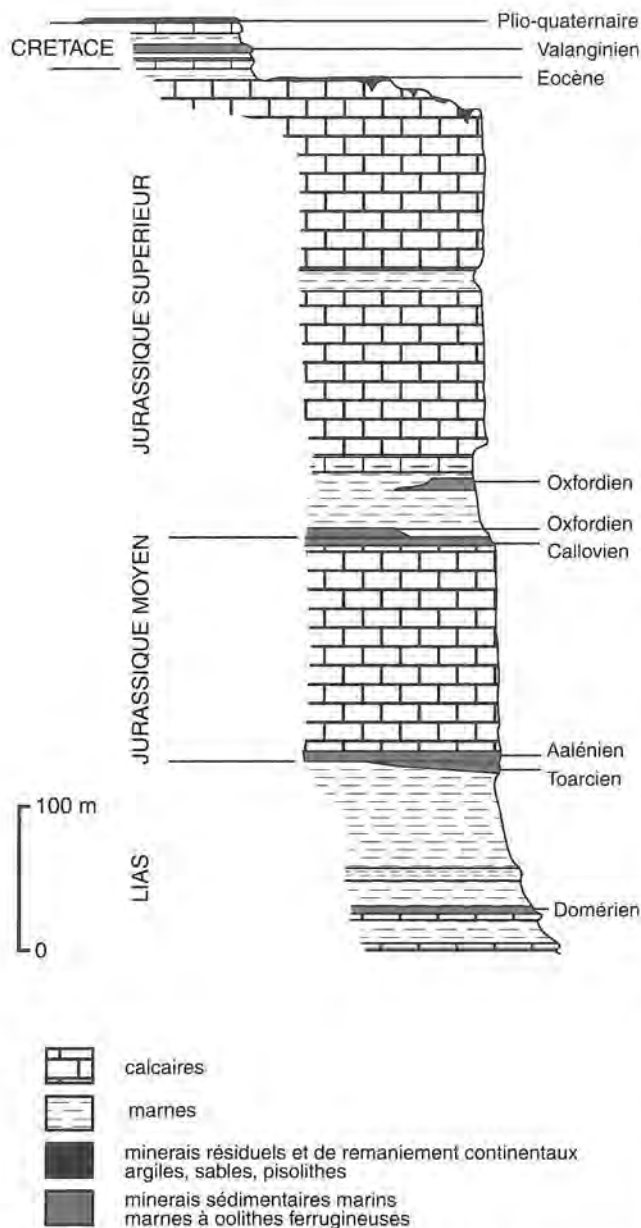


Fig. 97: Distribution stratigraphique des minerais de fer sédimentaires du Jura (d'après Rosenthal 1990, fig. 4).

Ces concrétions complexes sont appelées des agrégats. Ces sols ont été érodés et leurs constituants redéposés dans les dépressions topographiques et les poches karstiques creusées par les eaux de ruissellement dans les calcaires sous-jacents. Ce processus s'accompagne d'un tri et favorise la séparation des concrétions plus lourdes d'avec les sables et les argiles. L'ensemble de ces terrains constitue la formation géologique appelée «Sidérolithique» (Fleury 1909). Dans le cadre des études récentes sur l'ancienne sidérurgie du Jura, de nouvelles observations ont pu être faites sur la nature du Sidérolithique (Eschenlohr et Serneels 1991, Serneels 1993, Serneels 1993a, Hamel 1999, Eschenlohr 2001).

Les accumulations de concrétions ferrugineuses constituent des minerais de bonne qualité. Dans le fond de la vallée de Delémont qui formait déjà une dépression, c'est une véritable couche de pisolithes qui a été exploitée, située à

la surface des calcaires mésozoïques et sous les sédiments plio-quadernaires. Ailleurs dans le Jura central, ce sont les poches karstiques que l'on retrouve, principalement dans les roches du Jurassique supérieur (Kimméridgien). Le plus souvent, les concrétions ferrugineuses ne forment qu'une partie de la roche. Elles sont prises dans une gangue d'argile, souvent rouge ou bien d'un mélange de sable et d'argile. Cette gangue peut être très meuble ou au contraire assez fortement indurée.

Des formations similaires mais d'âge Plio-quadernaire, c'est-à-dire plus jeunes, sont également connues dans certaines parties du Jura.

B. Les minerais de fer dans les environs immédiats du site

La Combe Chopin est creusée dans les marnes de l'Oxfordien inférieur qui se trouvent dans la partie centrale de la structure anticlinale d'Envelier.¹²⁴ Dans ce secteur, cette couche est pauvre en oolithes ferrugineuses. De plus, les marnes sont recouvertes par plusieurs mètres d'éboulis. Le versant rocheux situé au nord de la combe est constitué par les calcaires massifs du Rauracien (Oxfordien moyen). Ce n'est que de l'autre côté de la crête, vers Rebeuvelier (lieux-dits Sur le Bie et Côte de Chaux) que l'on retrouve les calcaires du Kimméridgien et quelques poches contenant des matériaux sidérolithiques.

En direction du sud, le versant est constitué par les calcaires du Dogger supérieur, jusqu'à l'arête du Raimeux où l'on retrouve le Kimméridgien qui affleure ensuite pratiquement jusqu'à Moutier. Dans la pente qui domine Moutier, l'on retrouve des lambeaux de Sidérolithique. Le percement du tunnel autoroutier du Raimeux a permis d'observer ces terrains récemment.

Compte tenu de la structure géologique, il y a très peu de chance de trouver du Sidérolithique dans la Combe Chopin elle-même ni dans ses prolongements en direction de l'est comme de l'ouest (fig. 98). Par contre, vers le nord, il faut prendre en compte les poches de Rebeuvelier qui sont les plus proches mais aussi envisager un approvisionnement possible à partir des gisements importants de la vallée de Delémont et dont l'exploitation est bien attestée historiquement.

En direction du Sud, les affleurements de Sidérolithique les plus proches sont indiqués au Pâturage du Droit, sur l'autre rive de la Birse. Plus loin, on trouve du minerai de fer sur tout le pourtour du Val de Moutier, à la limite entre les roches mésozoïques et les sédiments quadernaires du fond de la vallée, ce qui correspond grossièrement à la limite de la forêt actuelle. Pour ce secteur également, l'exploitation ancienne du minerai de fer a été démontrée par l'archéologie.

124 Rapport de Ch. Bugnon, du Bureau MFR Géologie-Géotechnique SA à Bienne.

Comme le passage le long de la Birse est ouvert probablement dès l'époque romaine, le transport des quelques mètres cubes de minerai nécessaires au fonctionnement du bas fourneau de la Combe Chopin au début du Moyen Age, ne constitue pas une difficulté insurmontable, au contraire.

C. Les concrétions ferrugineuses provenant des couches archéologiques

Au cours de la fouille de la zone du bas fourneau et de l'amas de scories, environ 4800 g de concrétions ferrugineuses du Sidérolithique ont été récupérées (fig. 93 f). Aucun autre type de minerai n'a été identifié.

Cette quantité est relativement faible comparée aux huit tonnes de scories et autres déchets métallurgiques qu'a livré le site. Il semble donc que le minerai était soigneusement manipulé et que les artisans ont veillé à n'en perdre qu'un minimum. On rappellera que la fouille des bas fourneaux mérovingiens de Boécourt a permis de récupérer en tout une dizaine de kilos de concrétions sidérolithiques pour 400 kg de scories.

Environ 70% de ces concrétions sont des pisolithes de forme sphérique simple et régulière, relativement petits (de 1 mm à 2 cm de diamètre). Le reste, soit 30% environ, est constitué d'agrégats de forme irrégulière et de taille supérieure (jusqu'à 4 cm). On note l'absence de concrétions irrégulières scoriacées ou massives que l'on trouve plus fréquemment dans les faciès sableux du Sidérolithique. De même, on constate l'absence de fragment de roche du Sidérolithique (grès, argiles, calcaires lacustres, etc.) ou d'autres éléments, comme les silex, qui peuvent accompagner les concrétions ferrugineuses dans certains gisements.

Les concrétions ferrugineuses du Sidérolithique sont normalement de couleur brun clair avec une surface externe brillante, lisse et régulière. Environ la moitié des pièces retrouvées sur le site présentent cet aspect. Les autres ont manifestement subi l'action de la chaleur et possèdent une couleur rouge clair ou rouge brique. Les surfaces internes sont parfois noirâtres et les pièces sont fissurées et friables. Les analyses chimiques indiquent un déficit en eau dans la structure et une réduction partielle des oxydes de fer (présence de FeO). Une partie de ces concrétions chauffées sont magnétiques et réagissent à l'aimant (environ 30%).

D. La question de la préparation du minerai

La nature de la gangue des pisolithes peut être très variée (argile, sable et même calcaire) de même que son état d'induration (meuble, friable, dur). Dans les cas les plus favorables, la gangue, sableuse ou argileuse, est meuble et se délite facilement dans l'eau. Dans un tel cas, un simple la-

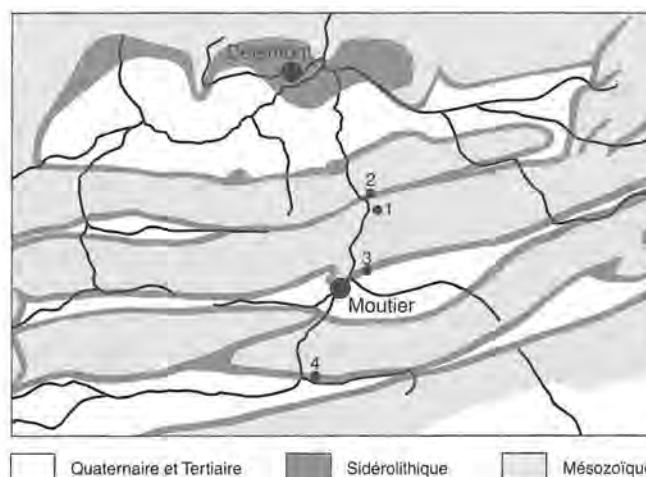


Fig. 98: Carte de distribution des zones potentiellement riches en minerai sidérolithique entre la vallée de Delémont et la Combe Chaluët d'après les divers levés géologiques et les informations historiques. Le Sidérolithique affleure très rarement.

Localisation des échantillons étudiés: 1. Roches - Combe Chopin: bas fourneau; 2. Rebeuvelier - La Verrerie: affleurement; 3. Galerie du Raimeux: affleurement; 4. Court - Les Condemines (Combe Chaluët): affleurement.

vage, dans un bac ou dans une eau courante, permet de séparer facilement les concrétions ferrugineuses. Les particules d'argile ou de sable, plus légères sont emportées par l'eau alors que les pisolithes, plus lourds se séparent. Dans d'autres cas, la gangue peut être fortement indurée. Il sera alors beaucoup plus difficile de séparer les concrétions. Il faudra au moins un concassage préliminaire du tout venant qui devra ensuite être lavé. Dans ce cas, la séparation entre gangue et concrétions sera moins complète et donc le concentré obtenu, beaucoup moins riche.

Enfin, dans de nombreux gisements, les pisolithes sont accompagnés par d'autres éléments, fragments de roches calcaires ou silex, qu'il sera également difficile de séparer par un simple lavage.

On ne trouve donc sur le site que des concrétions triées ce qui implique que la préparation du minerai a été menée à bien au préalable. L'absence d'élément de gangue sur le site indique que ce traitement préliminaire a été effectué à l'écart de la zone fouillée. On peut envisager une station de lavage à proximité immédiate, dans le fond de la vallée, utilisant l'eau de la Birse mais il est plus vraisemblable que c'est le concentré, c'est-à-dire les pisolithes lavés, qui a été apporté sur place.

Une partie au moins des concrétions ferrugineuses trouvées dans l'amas de scories n'ont pas subi de traitement thermique. C'est donc dans cet état que le minerai est arrivé sur le site du bas fourneau.

La fouille de Roches, contrairement à celle de Boécourt, n'a pas permis de relever des indices archéologiques démontrant que le minerai subissait un traitement thermique préliminaire, un grillage, au sens large. Le grand four 93

ne semble pas pouvoir être interprété comme un four de grillage. Il n'est pas certain qu'un tel traitement était indispensable mais les expérimentations mettent en évidence son effet positif.

La présence de pisolithes ayant subi un chauffage n'est pas un argument suffisant pour démontrer que ce minerai était systématiquement chauffé avant d'être enfourné. En effet, on observe que des pisolithes plus ou moins transformés par la chaleur sont parfois pris dans des blocs de scorie. C'est bien la preuve que, dans le fourneau pendant l'opération, certains grains de minerai descendent très rapidement dans le fond de la cuve à travers les interstices de la charge de charbon de bois. Le temps de réaction étant trop court, ils ne sont pas complètement transformés.

E. La nature et la qualité des minerais sidérolithiques du Jura

Les poches de Sidérolithique sont abondantes dans toute la région et nombre d'entre elles livrent des concrétions ferrugineuses. Pour autant, elles ne constituent pas toutes des gisements exploitables. Au contraire, dans la plupart des cas, soit les concrétions sont trop peu abondantes, soit les concentrés que l'on obtient par lavage contiennent trop d'impuretés pour être utilisables. La présence d'un affleurement de Sidérolithique est donc une indication intéressante sur la localisation d'un éventuel minerai mais la présence de quelques pisolithes n'est pas une preuve en soit qu'un minerai de fer a été exploité localement.

A Boécourt, des travaux de construction ont mis au jour un affleurement de Sidérolithique assez important derrière la ferme des Lavoisirs. Des poches riches, contenant parfois plus de 50% de pisolithes étaient visibles. Ce matériel a fait l'objet d'un essai de lavage qui s'est avéré très concluant. En brassant simplement le tout venant dans l'eau, l'argile se délite et libère les pisolithes. Un rapide tri manuel permet de rejeter les rares impuretés présentes. Le résultat de cette procédure simple est d'enrichir considérablement le minerai. Le tout venant ne contient que 54 à 50% d'oxydes de fer, le concentré atteint 60 à 65% (Eschenlohr et Serneels 1991). Il s'agit donc d'un gain appréciable.

Dans le cadre de cette étude, quelques autres gisements ont fait l'objet d'une approche similaire pour tenter d'évaluer la qualité de ces matériaux en temps que minerais de fer potentiels.

Des prélèvements provenant des poches de Rebeuvelier et de Moutier ont été collectés par Ch. Gerber dans des argiles rouges à pisolithes. D'autres échantillons ont été pris en deux points de la carrière des Condemines près de Court BE, à l'entrée de la Combe du Chaluet (fig. 98 et tab. 11; fig. 93 e, g, h).

Dans ces quatre échantillons, il a été possible de récolter des pisolithes ou d'autres concrétions ferrugineuses qui,

d'après les analyses chimiques, pourraient servir de minerai (annexes 4 et 5). Par contre, les essais de lavage qui ont été réalisés ont tous abouti à des résultats négatifs (tab. 12).

Dans l'un des prélèvements de Rebeuvelier (RCM 101), la proportion de pisolithes est infime (< 1%) et ils sont de taille très réduite. Le travail d'excavation, de transport et de lavage paraît disproportionné par rapport au résultat obtenu. Le second prélèvement (RCM 201) est plus riche (10% de concrétions) mais, dans le concentré de lavage, on retrouve une très forte proportion de petits fragments de calcaire et des nodules argileux qui ne se sont pas délités.

Le premier échantillon du Chaluet (RCH 101), contient aussi 10% de concrétions ferrugineuses mais le concentré est très impur avec des morceaux de roches de toutes sortes. Ce concentré (analyse RCH 1014) contient moins de 20% de fer. Le second échantillon (RCM 102) est à la fois pauvre en pisolithes et sa gangue se délite mal.

Enfin, des échantillons de Sidérolithique prélevés lors du percement de la galerie routière du Raimeux ont été fournis par le géologue Ch. Bugnon.¹²⁵

Ces derniers échantillons étaient trop petits pour des essais de lavage quantifiés. Ils sont globalement pauvres en fer et à tendance sableuse. De plus, à côté des habituels pisolithes constitués d'hydroxydes de fer (analyse RGR 912, Fe tot: 47%), on trouve des concrétions qui possèdent un noyau sableux (analyse RGR 952, Fe tot: 10%).

Les matériaux sidérolithiques rencontrés lors des travaux de creusement de la galerie du Raimeux ne paraissent donc pas utilisables comme minerai de fer en réduction directe.

F. L'origine du minerai utilisé dans le bas fourneau de Roches

Les pisolithes qui ont été trouvés dans l'amas de scories de Roches possèdent des caractères chimiques très proches les uns des autres. Les quatre analyses effectuées le montrent bien.

On observe l'absence presque totale de chaux, la faible teneur en phosphore et la forte présence d'alumine, vanadium et chrome. Ces particularités chimiques sont communes à toutes les concrétions sidérolithiques du Jura qui ont fait l'objet de nombreuses analyses chimiques (Eschenlohr et Serneels 1991, Eschenlohr 2001).

Dans les minerais de la vallée de Delémont, le rapport entre Si:Al est particulièrement bas. Dans les pisolithes lavés, il est presque toujours légèrement inférieur à 1:1.

¹²⁵ Bureau MFR Géologie-Géotechnique SA à Bienne a suivi les travaux de percement de la galerie du Raimeux. Il a bien voulu nous communiquer les informations en sa possession concernant le Sidérolithique dans ce secteur et nous l'en remercions.

Tab. 11: Localisation des prélèvements de Sidérolithique étudiés.

Commune	Lieu-dit	Coordonnées	Altitude	Echantillons
Rebeuvelier JU	Les Ordon	596 950/240 410	600	RCM 101
Rebeuvelier JU	La Verrerie	596 700/240 600	505	RCM 201
Court BE	Les Condemines	593 500/232 700	690	RCH
Moutier BE	Galerie du Raimeux			RGR

Tab. 12: Résultats des essais de lavage des prélèvements de Sidérolithique provenant des environs de la Combe Chopin.

N° échantillon	Essais de lavage	description du concentré											
		Description		granulométrie				concrétions ferrugineuses				gangue	
Localisation		gr	%	gr	total	pisolit.	agrég.	fragm.	total	argile	quartz	calc.	
RCM 101 argile rouge Rebeuvelier	tout venant	2 600		> 3 cm	0								
	lavé	2 584		> 3mm	8	8	1	6	1	0	-	-	
	concentré	16	< 1	< 3mm	8	8	6	0	2	0	-	-	
				total	16	16	7	6	3	0	-	-	
RCM 201 argile rouge Rebeuvelier	tout venant	2 000		> 3 cm	200	-	-	-	-	-	-	200	
	lavé	1 000		> 3mm	350	105	85	15	5	245	65	5	
	concentré	1 000	50	< 3mm	450	90	60	0	30	360	290	15	
				total	800	195	145	15	35	605	355	20	
RCH 101 sable argileux jaune Chaluet	tout venant	5 000		> 3 cm	200	-	-	-	-	-	-	200	
	lavé	2 030		> 3mm		430	100	225	105	-	-	-	
	concentré	2 970	60	< 3mm		180	125	0	55	-	-	-	
				total	2 970	610	225	225	160	2 160	-	-	
RCH 102 argile rouge Chaluet	tout venant	5 000		> 3 cm		-	-	-	-	-	-	-	
	lavé	4 175		> 3mm		20	20	0	0	-	-	-	
	concentré	825	17	< 3mm		5	1	0	4	-	-	-	
				total	825	25	21	0	4	800	795	5	

Tab. 13: Roches - Combe Chopin 1996. Calcul de production basé sur les analyses chimiques des minerais et scories.

	M gr minerai		+ P gr paroi		=	100 gr scorie		+ F gr fer métallique				
	M	100 gr minerai moy.	P	100 gr paroi moy.	=	apport M gr minerai	apport P gr paroi	=	apport M min +P paroi	100 gr scorie moy.	bilan	apport charbon
Si	1.32	5.36	0.16	43.05	=	7.07	6.89	=	13.96	14.16	0.20	
Ti	1.32	0.33	0.16	0.21	=	0.44	0.03	=	0.47	0.49	0.02	
Al	1.32	6.99	0.16	3.13	=	9.23	0.50	=	9.73	9.72	-0.01	
Fe	1.32	51.76	0.16	0.80	=	68.32	0.13	=	68.45	32.42	-36.03	
Mn	1.32	0.06	0.16	0.00	=	0.08	0.00	=	0.08	0.09	0.01	
Mg	1.32	0.10	0.16	0.05	=	0.13	0.01	=	0.14	0.31	0.17	charbon
Ca	1.32	0.24	0.16	0.29	=	0.32	0.05	=	0.37	4.04	3.67	charbon
Na	1.32	0.01	0.16	0.01	=	0.02	0.00	=	0.02	0.02	0.00	
K	1.32	0.02	0.16	0.09	=	0.02	0.01	=	0.04	0.81	0.78	charbon
P	1.32	0.08	0.16	0.02	=	0.11	0.00	=	0.11	0.12	0.01	
Zr	1.32	134	0.16	132	=	177	21	=	198	207	9	
Y	1.32	9	0.16	14	=	11	2	=	14	25	11	
Sr	1.32	23	0.16	15	=	30	2	=	33	80	47	charbon
Rb	1.32	0	0.16	7	=	0	1	=	1	5	4	
Ba	1.32	34	0.16	87	=	45	14	=	59	67	8	
V	1.32	2 178	0.16	37	=	2 875	6	=	2 881	1 936	-945	
Sn	1.32	0	0.16	3	=	0	0	=	0	1	1	
Sb	1.32	0	0.16	0	=	0	0	=	0	0	0	
Ag	1.32	3	0.16	3	=	4	1	=	5	5	1	
As	1.32	25	0.16	10	=	33	2	=	35	7	-28	
Pb	1.32	160	0.16	35	=	211	6	=	217	52	-165	
Zn	1.32	297	0.16	31	=	392	5	=	397	52	-345	
Cu	1.32	0	0.16	13	=	0	2	=	2	0	-2	
Ni	1.32	65	0.16	19	=	86	3	=	89	11	-78	
Cr	1.32	618	0.16	19	=	816	3	=	819	542	-277	
Co	1.32	210	0.16	206	=	277	33	=	310	60	-250	

Par contre, les échantillons de Sidérolithique qui proviennent du Grand-Val¹²⁶, à l'est de Moutier, se distinguent assez clairement avec des rapports Si:Al légèrement supérieurs à 1:1. Les analyses effectuées sur les concrétions ferrugineuses sidérolithiques de la galerie du Raimeux et du Chaluet confirment cette tendance à l'augmentation relative de la silice par rapport à l'alumine (fig. 99). Les rapports mesurés sont de 3:1. Cette tendance est logique au regard de la répartition générale des terrains sidérolithiques. Les faciès argileux sont beaucoup mieux représentés dans la vallée de Delémont alors que les sables sont typiques de la zone située au sud de Moutier.

Les pisolithes recueillis sur le site de Roches possèdent des rapports Si:Al entre 0.7 et 0.9:1. Ils s'apparentent donc nettement plus aux minerais de la vallée de Delémont qu'à ceux que l'on pourrait trouver plus au Sud.

Un autre argument chimique est lié aux teneurs en vanadium et chrome. Dans les pisolithes de la vallée de Delémont, les teneurs sont élevées (V: 600 à 2600 ppm, moyenne vers 1250 ppm; Cr: 200 et 900 ppm, moyenne vers 400 ppm). Les échantillons du Grand-Val et du Chaluet présentent des teneurs moins élevées en général. Les analyses de la Combe Chopin se rattachent plutôt au groupe de la vallée de Delémont.

H. Approche quantitative de la production

Une autre démarche peut être tentée en utilisant les analyses chimiques des déchets métallurgiques, celle du bilan des matières de l'opération de réduction. Le principe est simple: tout ce qui entre dans le four doit en sortir. En d'autres termes, le bilan chimique entre les réactifs (matières premières: minerai et charbon) et les produits (fer et scories) doit être équilibré. En connaissant la composition chimique des principaux matériaux, le minerai et les scories, on peut calculer ce bilan et la quantité de fer qui a été produite.

Les modalités du calcul ont été exposées dans d'autres publications (Eschenlohr et Serneels 1991, Serneels 1993, Serneels à paraître 1). On soulignera qu'un tel calcul doit s'appuyer sur un nombre suffisant d'analyses et une bonne cohérence de celles-ci, conditions qui sont difficiles à réunir dans bien des cas.

Dans le cas de Roches, les scories vitreuses noires sont le déchet typique de la technologie utilisée. La composition chimique de ces scories est connue grâce à sept analyses qui forment un groupe cohérent. La moyenne calculée est représentative. Pour le minerai, trois des quatre analyses sont presque identiques (RCC 1012 est légèrement plus siliceux). Il semble préférable d'utiliser ces trois analyses pour le calcul d'une moyenne.

En comparant les scories et les minerais, on s'aperçoit immédiatement que les rapports entre les éléments chi-

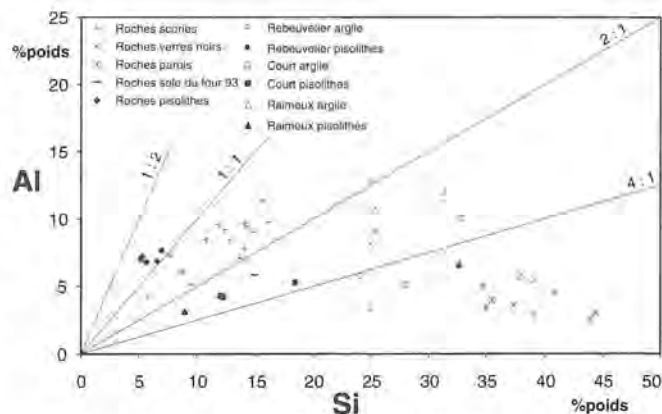


Fig. 99: Rapports silicium:aluminium (Si: Al) pour le Sidérolithique de la Combe Chopin (Raimeux) et des environs.

miques sont différents. On ne peut donc pas expliquer la formation des scories en soustrayant simplement du fer au minerai. D'autres facteurs perturbent le système.

Alors qu'il n'y a pas de calcium dans le minerai, on en trouve quelques pour-cents dans les scories de Roches. Or le calcium est toujours un des principaux constituants des cendres de charbon de bois (Serneels, à paraître 2). La cendre est également toujours riche en potasse (K₂O) et peut contenir de l'oxyde de magnésium (MgO). Pour ces deux substances, on trouve aussi de légers excès dans les scories qui peuvent être apportées par la cendre.

Par contre, la différence entre le rapport Si:Al dans le minerai et dans la scorie ne peut pas s'expliquer par un éventuel apport de la cendre. Il faut ajouter au minerai une forte quantité de silice. L'hypothèse la plus probable est que le revêtement interne de la cuve, un sable pratiquement pur, subit localement une fusion et fournit la silice au système. L'étude des fragments de revêtement a montré la réalité de ces échanges chimiques.

Pratiquement, on calcule d'abord la quantité de minerai, M, qui est nécessaire pour apporter l'aluminium qui est présent dans une unité de scorie (tab. 13). Cet élément est pratiquement absent des cendres de charbon et du revêtement sableux de la cuve, il n'y a donc pas de contamination importante possible.

On constate ensuite que ce minerai n'apporte pas assez de silice. On calcule donc la quantité de paroi, P, qu'il faut ajouter pour combler ce déficit de silice. En faisant le bilan pour les autres éléments, on confirme la validité du calcul. Pour certains éléments, le bilan est équilibré: Ti, Mn, P, Zr, Rb et Ba. Pour d'autres, l'écart peut être compensé par un apport lié à la cendre: Ca, K, Mg et Sr. Pour les autres éléments, on constate un déficit. Certains de ces éléments sont passés dans la masse métallique avec le fer; c'est le

126 Dans le secteur du Grand-Val, les analyses restent cependant encore peu nombreuses.

cas du nickel (Ni) et du cobalt (Co). Pour d'autres, le vanadium (V) et le chrome (Cr), il y a un fractionnement entre la scorie et le métal.

Enfin, on calcule l'excès de fer apporté par le minerai et qui n'est pas consommé par la scorie. Cette quantité F équivaut à la production de fer métallique.

Dans le cas de Roches, le calcul s'établit comme suit:

132 gr de minerai + 16 gr de paroi = 100 gr de scorie + 36 gr de fer.

La production est donc de 36 gr de fer pour 100 gr de scories. Le rendement calculé, c'est-à-dire le rapport entre la quantité de fer qui est produite et celle qui est présente dans le minerai utilisé, est de 52%.

Cette production et ce rendement sont assez nettement supérieurs à ce qui a été calculé à Boécourt (production de 20 gr de fer/100 gr de scorie et rendement de 30%). C'est logique puisque les minerais sont très similaires mais que les scories de Roches sont tout de même moins riches en fer que celles de Boécourt. Cette constatation irait donc dans le sens d'un perfectionnement de la technique au cours du temps.

Si l'on considère l'ensemble du site, on calcule que les 8'000 kg de scories retrouvés sur le site sont le témoignage de la production de 2'880 kg de fer. Il aura fallu utiliser 10'560 kg de pisolithes.

Ces chiffres que livrent les calculs doivent être pris comme des ordres de grandeur et il ne faut pas leur attribuer une précision qu'ils ne peuvent avoir. On notera aussi que le fer brut calculé correspond à la quantité de fer qui n'a pas été perdue lors de l'opération. Cela ne signifie pas que l'ensemble de ce fer soit utilisable par le forgeron. Il est impossible de préjuger de la qualité de la production sur la base de ces données. La perte en fer au cours du forgeage peut être importante mais il n'y a pratiquement pas de données archéologiques ou expérimentales permettant de l'estimer.

8. Le charbon

Dans le cas de l'implantation d'un bas fourneau, lorsque le minerai fait défaut, le facteur de localisation principal devient le combustible. Tout porte à croire donc que le charbon ait été préparé sur place, mais l'emplacement exact demeure inconnu.

A. Les essences charbonnées

La quantité de charbon retrouvée à l'intérieur de la cuve du bas fourneau ainsi qu'au sein de la halde de scories était si faible, que nous avons été obligés de recueillir la moindre parcelle de bois carbonisée. Vu la faible densité de charbon de bois, aucun prélèvement en vrac n'a été effectué.

Tab. 14: Roches - Combe Chopin 1996. Essences arboréennes rencontrées dans la halde de scories, couche 73b et 73c.

Couche 73b

Espèces	Nombre d'individus	Poids (g)	% du poids total
Sapin blanc	7	10	9.1
Genévrier	1	4	3.6
Erable	20	18	16.2
Hêtre	19	23	20.7
Orme	2	12	10.8
Aulne ou noisetier ?	7 ?	5	4.5
Frêne	2	4	3.6
Non identifiable	3	5	4.5
Indéterminé	?	30	27
Total	min. 61	111	100

Couche 73c

Espèces	Nombre d'individus	Poids (g)	% du poids total
Sapin blanc	1	18	38.3
Genévrier ?	1	2	4.2
Erable	5	9	19.2
Aulne ?	2	2	4.2
Noisetier ?	1	4	8.5
Indéterminé	?	12	25.6
Total	min. 10	47	100

En tout 71 échantillons ont été récoltés (tab. 14) pour un poids total sec de 158 g: 61 échantillons (lot 1, 111 g) proviennent de la couche de scories 73B et 10 seulement (lot 2, 47 g) de la couche de scories 73C. Les charbons de bois prélevés ont été transmis au Laboratoire de dendrochronologie du SAB à Sutz pour y être préparés et déterminés.¹²⁷ Du premier lot, il faut retrancher 30g de matériel (pulvéulent) et trois échantillons indéterminables contre 10 g pour le second. Au vu du faible échantillonnage, il nous paraît plus pertinent de grouper ces deux lots issus de deux couches de scories homogènes et contemporaines. En tenant compte des individus récoltés, on obtient une distribution des essences arboréennes utilisées dominée par l'érable (35,2%), le hêtre (26,7%) et l'aulne (12,6%). Par contre, en tenant compte du poids respectif des échantillons, la tendance se modifie quelque peu, puisque le sapin blanc apparaît soudainement (24,1%, à la faveur d'un très gros échantillon de 18 g!), suivi de l'érable (23,3%) et du hêtre (19,8%).

Il convient encore de signaler les autres essences, quoique minoritaires, déterminées par Francuz: l'orme, le frêne, le genévrier et le noisetier. Il ressort que les sidérurgistes de Roches ont utilisé une grande variété d'arbres, mais es-

¹²⁷ Nous tenons à remercier John Francuz pour sa disponibilité et son Rapport du 18 décembre 1996. Ce laboratoire dépend du Service archéologique du canton de Berne et analyse en priorité les bois prélevés dans les stations palafittiques du littoral, dans le cadre du Projet Lac de Bienne.

sentiellement des feuillus, qui composaient probablement la forêt environnante d'alors, certaines espèces étant d'ailleurs typiques des bords de cours d'eau (Birse et ruisseau de la combe étudiée). Comparés aux résultats obtenus par Eschenlohr sur le site des Boulies¹²⁸, nous obtenons à la Combe Chopin un spectre d'essences arboréennes assez proche, qui diffère toutefois par la discrétion du sapin qui représente seulement 11% des essences charbonnées, contre 30% aux Boulies. Toutefois, il convient de ne pas trop accorder d'importance à ces résultats, car notre échantillonnage demeure peu représentatif. Sa valeur tient essentiellement au fait qu'il confirme, comme dans le cas des Boulies, l'utilisation d'un large éventail d'arbres et d'arbustes dans la fabrication du charbon.

Dans l'ensemble du district sidérurgique du Jura central, le hêtre occupe, et de loin, la première place parmi les essences charbonnées avec 60% de l'ensemble des charbons étudiés (Eschenlohr 2001). Le sapin et l'érable sont les deux autres bois que l'on retrouve le plus fréquemment. Ensemble, ces trois essences comptent pour 80% de l'approvisionnement. Le spectre est cependant très large et on y trouve pas moins 19 essences différentes.

Dans les environs de Lajoux, la domination du hêtre est très affirmée. Il est accompagné par le sapin et très peu d'autres essences. Dans les secteurs proches, ceux de Saint-Brais, Saulcy, Rebévelier et du Petit-Val, la domination du hêtre reste très forte (60% et plus) mais le spectre des essences charbonnées s'enrichit nettement. Dans les vallées de Delémont et du Grand-Val, le hêtre devient moins abondant (moins de 60%). Localement, d'autres essences peuvent être très importantes et le spectre gagne encore en variété.

Le bas fourneau de Roches entre dans ce schéma, se rattachant aux régions de basse altitude où l'approvisionnement en bois est varié, incluant des essences de terrains humides.

La qualité du charbon de bois comme combustible sidérurgique est une question qui a fait couler beaucoup d'encre (Pelet 1983). Cette qualité ne dépend cependant pas seulement de l'essence charbonnée mais aussi des conditions de croissance de l'arbre et du mode de carbonisation. Les données de Roches n'apportent pas d'information supplémentaire sur cette question.

B. La consommation de charbon de bois du bas fourneau

L'utilisation du charbon de bois comme combustible pour la réduction du minerai de fer au bas fourneau est la règle générale. Dans la région jurassienne, cette règle ne semble souffrir aucune exception.

Il est difficile de fixer de manière précise la quantité de charbon qui est nécessaire pour la production du fer par la méthode directe. La documentation expérimentale, ethnographique et historique permet de proposer une fourchette

très large. Il n'y a que très peu de cas pour lesquels on puisse envisager un rapport entre minerai et charbon inférieur à 1:1. A l'autre extrémité du spectre, on trouvera la mention de quelques rapports très élevés 1:8 ou même 1:10. Il est probable qu'une moyenne autour de 1:2 soit assez «normale». Sur la base du bilan chimique entre les scories et le minerai qui permet de calculer la quantité de minerai utilisée sur un site, on peut estimer la consommation de charbon selon les différentes hypothèses (tab. 15). On obtient ainsi un ordre de grandeur.

Dans le cas de Roches où la quantité de minerai peut être évaluée à environ 10 t, on peut donc proposer les chiffres de 10, 20 et 100 t de charbon pour des rapports respectivement de 1:1, 2 et 10. Le bois perdant environ 80% de son poids lors de la carbonisation, ces chiffres correspondent à des quantités de 50, 100 et 500 t de bois, ce qui correspond à peu près à autant de m³. Dans les forêts de la région, on peut s'attendre à trouver entre 200 et 300 m³ à l'hectare, en exploitant les bois de plus de 10 cm de section.

Il est bien évident que le rapport entre minerai et combustible est variable d'un cas à l'autre, en fonction de nombreux facteurs dont les principaux sont la nature du charbon de bois, celle du minerai et la technologie mise en œuvre. Ces paramètres restent extrêmement difficiles à cerner.

C. Approvisionnement en charbon de bois

Les feuillus que les artisans de la Combe Chopin ont utilisés principalement, peuplaient probablement les forêts environnantes. L'aulne, un arbre qui apprécie les bords de cours d'eau, a pu trouver sur les rives de la Birse, c'est-à-dire à proximité immédiate, un milieu favorable à son développement. L'environnement du site a donc pu fournir les bois nécessaires au fonctionnement du bas fourneau.

Aucun indice ne permet d'affirmer que le charbon ait été préparé sur place. Les quatre grandes meules à charbon découvertes dans la Combe Chopin sont postérieures à l'activité sidérurgique; elles remontent à la fin du XVIIe siècle (datation ¹⁴C; voir p. 63) et au début du XIXe siècle. Ces dernières sont du reste à l'origine du nom de lieu La Charbonnière, qui s'il apparaît dans le titre de la gravure de P. Birmann (1802), ne figure pas dans l'Atlas Siegfried (1876). Aux périodes récentes encore, les forêts du secteur de la Combe Chopin ont alimenté une production de charbon de bois, ce qui laisse penser qu'au Moyen Age, il devait en être de même.

Alors que la Combe Chopin n'a pas pu fournir le minerai de fer, l'exploitation de son potentiel forestier est une explication satisfaisante pour le choix de l'emplacement du bas fourneau.

128 Eschenlohr 1991, 21-23.

Tab. 15: Estimation des quantités de charbon de bois nécessaires à la réduction de 10 tonnes de minerai de fer sidérolithique au bas fourneau.

rapport minerai charbon	charbon en tonnes	bois en tonnes	bois en m ³	forêt en hectares 200m ³ /ha
1 : 1	10	50	50	0.25
1 : 2	20	100	100	0.50
1 : 10	100	500	500	2.50

L'implantation de sites sidérurgiques à plusieurs kilomètres des lieux d'extraction du minerai et le transport pesant que cela implique peut indiquer un épuisement des réserves de bois aux environs des mines. D'autres raisons pourraient pousser les sidérurgistes à agir ainsi. En particulier, les propriétaires des bois ont pu chercher à valoriser leur bien en invitant les métallurgistes à venir exploiter sur place les forêts.

9. Apport de l'étude du bas fourneau

Le bas fourneau de Roches - Combe Chopin s'intègre relativement bien à l'ensemble des connaissances acquises, souvent assez récemment, sur la sidérurgie ancienne de la région jurassienne. Il apporte un nouveau jalon solide sur le plan chronologique et de nombreuses données sur les techniques et leur évolution.

Par certains traits, cette installation se rapproche des bas fourneaux médiévaux de «type Quiquerez», en particulier par l'usage du tirage naturel et non plus des soufflets. Le fourneau de Roches, avec sa porte large et ses murs en blocs de calcaire rappelle aussi ceux de Boécourt - Les Boulées qui datent de l'époque mérovingienne. On se trouve donc face à une situation intermédiaire qui montre bien la complexité de l'évolution de cette technologie au cours des siècles. L'examen des scories confirme cette idée. Les déchets produits à Roches sont sensiblement plus pauvres en fer que ceux de Boécourt alors que les minerais utilisés sont en tous points comparables. Il semble donc que les artisans du XII^e siècle obtenaient des rendements supérieurs à leurs prédécesseurs mérovingiens. La nature des scories plus récentes associées aux fourneaux «Quiquerez» montrent une technologie complètement différente mais qui n'est pas encore comprise faute d'étude suffisamment approfondie et surtout de fouille archéologique moderne.

L'implantation du fourneau, à l'écart des gisements de minerai de fer fournit aussi une information précieuse d'autant plus que les indications fournies par l'étude du minerai incitent à penser qu'il a été transporté depuis la vallée de Delémont. A cette période, la disponibilité du combustible devient probablement un facteur décisif dans le choix de l'emplacement de travail. Indirectement, ce fait reflète sans doute l'avance du défrichement des fonds de vallées et la lente conquête du territoire par ses habitants. Dans ce processus, nul doute que l'industrie sidérurgique a joué un rôle dans le Jura.

Il n'y a pas moyen d'évaluer précisément la durée de fonctionnement d'un tel site mais la faible quantité de déchets et la présence d'un unique fourneau sont des arguments qui indiquent plutôt sa brièveté: un an, une décennie, un siècle peut-être mais sans doute pas plus. Quel est le rôle économique d'une telle installation? L'atelier de Roches, avec ses 8'000 kg de scories en place semble pouvoir être rangé dans la catégorie des petits crassiers. La production, qui peut être évaluée à presque trois tonnes de fer, n'est en elle-même pas énorme, mais pour bien l'appréhender, il faudrait pouvoir estimer l'ensemble de la production jurassienne à cette même période. Là aussi, la recherche n'est pas encore assez aboutie pour pouvoir articuler des chiffres. La seule certitude est que le fourneau de la Combe Chopin n'était certainement pas le seul en activité. Cette production a-t-elle généré un surplus exportable? Pour répondre à cette question, il faudrait non seulement connaître la production mais aussi évaluer la consommation, c'est-à-dire le nombre d'hommes et la quantité de fer qu'ils utilisaient. On est malheureusement encore loin de pouvoir faire de telles estimations. Il faudrait aussi comprendre comment le fer était utilisé. Quelle part revenait à l'outillage agricole et forestier qui a tant contribué au défrichement des nouvelles terres et à l'augmentation de la production agricole en général? Quelle quantité fut consacrée à l'armement et à la guerre? A qui et en échange de quoi un éventuel surplus a-t-il été proposé? C'est sur ces questions socio-économiques passionnantes que débouche naturellement l'archéologie des sites de production comme le bas fourneau de Roches.

10. Synthèse générale sur l'industrie sidérurgique dans le Jura central

L'exploitation du minerai de fer dans l'arc jurassien a débuté à l'Age du fer, mais c'est surtout à partir du haut Moyen Age que l'on assiste à l'épanouissement de la sidérurgie, notamment dans le Jura Vaudois et la vallée de Delémont. A l'origine, ce sont de petites exploitations qui assurent la production du fer, mais petit à petit on assiste à la multiplication des bas fourneaux, en particulier dans les secteurs riches en minerai, comme la vallée de Delémont par exemple. Il semble aussi qu'un second pôle d'exploitation sidérurgique important ait débuté dès cette époque dans le Cornet, autour de villages actuels de Corcelles et Crémines. Ces sites de productions ont fonctionné durant tout le Moyen Age, s'étendant même jusqu'à Eschert et Grandval.

A partir du XIII^e siècle environ, un redéploiement ou mieux une extension de l'exploitation minière s'est petit à petit opérée vers les petits vallons latéraux autour de Moutier (Petit-Val, vallon de Chaluet), dans la vallée de Tavan-nes et sur le Plateau des Franches-Montagnes.¹²⁹ La petite

129 Eschenlohr 1994, 224 et communication orale du même.

exploitation de la Combe Chopin s'intègre donc pleinement au modèle d'extension et de diffusion d'une sidérurgie encore traditionnelle dans ses méthodes de mise en valeur, et qui s'étend petit à petit de la vallée de Delémont en direction des régions plus méridionales. Pour l'heure, l'évolution technologique, notamment le passage du bas fourneau à tuyères et ventilation mécanique au bas fourneau à ventilation naturelle (?) demeure difficile à saisir. L'essor de la sidérurgie médiévale et la transmission d'un savoir-faire ancestral jetteront les bases mêmes du développement industriel de l'Evêché, longtemps basé sur la production et la transformation du fer et de l'acier.

Par la variété des vestiges mis au jour, le site de Roches - Combe Chopin occupe une place assez singulière dans l'archéologie jurassienne moderne. Ce site témoigne de l'exploitation et de la mise en valeur des richesses locales, de manière discontinue durant près de sept siècles. Tout commence au XII^e siècle par la construction d'un bas fourneau servant à réduire le minerai de fer. D'après les analyses chimiques réalisées par V. Serneels, le minerai présente de sérieuses similitudes avec celui de la Vallée de Delémont. Quant au charbon de bois, il était tiré des forêts environnantes, sans que nous n'en ayons des traces tangibles. L'activité de fonte de minerai dura vraisemblablement plusieurs années, puis la production fut interrompue et le site abandonné.

Aux XVI^e-XVII^e siècles, des lieux de charbonnage sont implantés dans cette même combe. Le charbon produit est destiné au haut-fourneau de Courrendlin dans la vallée de Delémont, à quelques kilomètres de Roches seulement. Une fois les forêts de la Combe Chopin exploitées, les charbonniers du XVIII^e siècle déboisèrent des coteaux situés à deux kilomètres de là. Le bois fut transporté à la Combe Chopin pour y être charbonné. A Roches, on charbonnait encore au XIX^e siècle.

A cette même époque trois fours à chaux, eux aussi grands consommateurs de bois, sont installés au sud du site, au pied d'éboulis de roches calcaires. Ils fonctionnèrent vraisemblablement à plusieurs reprises. La forêt avait alors sans doute repris ses droits assurant du même coup le combustible nécessaire à la cuisson de la pierre.

Nous constatons donc avec intérêt que les trois activités mises en évidence sur ce site sont toutes trois liées de près au bois: en tant que combustible ou matière première à transformer. En outre, la localisation des fours à chaux dépend naturellement de la proximité de la matière première qui permet d'éviter une fastidieuse manutention.

VI. Bilan final

1. Activités artisanales et impacts sur l'environnement

En guise de bilan, il y a lieu à notre avis de nous pencher sur les différentes activités artisanales jurassiennes consommatrices de bois, sous quelque forme que ce soit, et de

les replacer dans un contexte plus large, celui de l'économie forestière.

Les activités artisanales consommatrices de bois sont nombreuses; elles l'utilisent soit comme combustible, généralement sous forme de charbon, soit comme matière première. Parmi les principales retenons: l'industrie du fer (combustible, bois pour les étais et traverses des mines), la verrerie, la fabrication de la chaux, les ateliers de potier, les tuileries, les salpêtriers, la production de poix, sans oublier la charpenterie, la menuiserie. Mais, les ménages constituent également un très gros – si ce n'est le principal – consommateur de bois (chauffage et construction).

Les besoins en bois de l'industrie sidérurgique sont très élevés et il n'est pas rare que cette activité économique soit accusée de tous les maux, notamment en raison des déboisements massifs qu'elle occasionne. Mais n'est-on pas surpris de voir que la consommation annuelle des ménages (tab. 16 et 17) est supérieure à celle de l'industrie du fer; elle comptabilise le bois d'affouage (chauffage) et le bois de construction. Bien sûr, les ménages peuvent se contenter de bois de moindre qualité issus de forêts, de pâturages boisés, de vergers, voire de bois de récupération, mais l'addition n'en reste pas moins impressionnante.

A. L'industrie du fer

Le minerai de fer mis à part, la forêt constitue à n'en pas douter la richesse la plus considérable du Jura. L'exploitation du bois pour l'alimentation en charbon des bas fourneaux médiévaux a dû avoir un impact assez limité sur le paysage forestier. Seules quelques zones situées en périphérie de vastes exploitations sidérurgiques, telles celles de Corcelles – Crémines dans le Grandval, de Boécourt – Saint-Brais – Soulce dans la vallée de Delémont ou encore de Lajoux – Fornet dans les Franches-Montagnes, ont pu avoir un impact sensible sur la forêt.¹³⁰ Il en ira autrement dès l'introduction du haut fourneau, généralement située dans nos régions au cours du XV^e siècle. Les rendements élevés de ces installations exigeront des volumes de charbon de bois nettement plus élevés.

La première mention de haut fourneau dans notre région semble remonter à 1484.¹³¹ Cette installation située à Bassecourt dans la vallée de Delémont fonctionne par intermittence jusque vers 1565. Le XVI^e siècle voit l'installation d'autres hauts fourneaux parfois couplés à une affinerie ou à une forge: à Charmoille (vers 1517, en fonction quelques années), à Bourrignon (vers 1517-1530 environ), puis à Bellefontaine (1565-1595, fermé en 1863) et Chérubez (vers 1580, en fonction jusque vers 1595) et enfin à Undervelier (1598-1881, haut fourneau

¹³⁰ Eschenlohr 1993, 68.

¹³¹ Indications tirées de Steiner 1985, 110 et de la Chronique du Jura Bernois 1947, 48.

Tab. 16: Tableau comparatif de la consommation de bois de sites sidérurgiques (Courrendlin et Undervelier) et des ménages.

	Charbon*		Bois frais estimé		Déboisement estimé	
	Cuveaux	t	m ³	t	km ²	ha/an
Courrendlin 1604-1699, ht fourneau	750 000	86 250	383 330	345 000	10.9	13.5
Courrendlin 1700-1764, idem.	480 000	55 200	245 330	220 800	7.0	22.5
Courrendlin 1765-1799, idem.	334 800	38 500	171 120	154 010	4.8	48
Undervelier 1745-1767, ht fourneau	149 100	17 150	76 210	68 590	2.1	9.5
Undervelier 1745-1767, forge	188 740	21 710	96 470	86 820	2.7	12.2
Evêché de Bâle 1770, population: 47 653 hab.*	–	–	95 310/ an	85 780/ an	2.4/ an	245
Evêché de Bâle 1818, population: 54 936 hab.**	–	–	109 870/ an	98 880/ an	2.8/ an	282
Evêché de Bâle 1850, population: 74 456 hab.**	–	–	166 770/ an	150 090/ an	4.2/ an	428

* Equivaut à la partie de l'Evêché réunie au canton de Berne, sans Bâle ni les bailliages orientaux du Laufonnais. D'après Quiquerez 1855, 166-180.

** D'après Hildebrand 1860, 56-67.

Les chiffres ont été arrondis à la dizaine inférieure ou supérieure. Le cuveau établi à 0.115 t ; la tonne de charbon produite à partir de quatre tonnes de bois vert ; le mètre cube de bois vert estimé à 0.75 t. On se base sur une consommation annuelle moyenne de bois de chauffage et de construction de 5 toises par ménage, soit 13.25 stères ou 10 m³ de bois frais. Un ménage compte en moyenne cinq personnes ; la consommation annuelle moyenne par individu s'établit ainsi à environ 2 m³ de bois frais.

Tab. 17: Tableau comparatif de la consommation moyenne de bois des ménages et de l'industrie du fer de l'Evêché de Bâle pour 1850-1860.

	Consommation de bois en toise	Consommation en m ³	Déboisement estimé ha/an
Ménages (15 100)	75 500	150 060	428
Hauts-fourneaux et forges*	33 000	65 590	187
Total	108 500	215 650	615

*en allemand dans le texte : Hüttenwerke

(Source: Auszug der Forststatistik des Kantons Bern 1867, 50-51)

dès 1626). En 1604, un haut fourneau est établi à Courrendlin; un autre à Reuchenette, près de Péry, en 1654. Ce dernier fonctionnera jusqu'en 1696 seulement. Une fonderie et une forge sont établies dès 1682 à Lucelle, elles fonctionneront jusque vers 1724/1865. Des forges sont encore établies sur la Suze à Frinvillier (XVIIe s.) et à Boujean (1634), près de Bienne.¹³²

Le milieu du XVIIIe siècle marque un nouveau cycle de construction avec la création d'une fonderie à Undervelier (1746), d'une fabrique d'acier, puis d'une fonderie à Bellefontaine (1753, 1768). En 1767, la fonderie d'Undervelier ferme en raison de difficultés d'approvisionnement en bois. Par contre, un haut fourneau doit y être construit en 1794, puisque le fer produit à Courrendlin ne peut plus être acheminé à Undervelier, Courrendlin n'étant alors pas encore dans le département français du Mont-Terrible fraîchement annexé (frontière d'Etat).

Au XIXe siècle, le développement des installations se poursuit: Lucelle (haut fourneau, 1801-1865), Choindex (haut fourneau, 1823), Delémont (fonderie de 1839-1863), enfin Delémont (fonderie de 1855-1889). Ces établissements successifs, quoique leur rendement soit nettement meilleur à celui des hauts-fourneaux des siècles pré-

cédents, constituent naturellement une nouvelle pression sur l'environnement forestier.

B. La verrerie

Dès le XVIe siècle, peut-être même avant déjà, une autre industrie gourmande en bois sollicite petit à petit des concessions de forêt: l'industrie verrière. Ces ateliers nécessitent de la potasse qui entre à raison de 15-20% dans la composition de certains verres à l'aspect cristallin; elle est obtenue grâce à la cendre de bois. Pour obtenir 100 kg de potasse il fallait brûler 180 m³ de bois.¹³³ Toutefois, il nous paraît utile de préciser que la cendre peut aussi être récupérée auprès des ménages par exemple.

Les ateliers de verriers¹³⁴ jurassiens se rattachent pour l'essentiel au type dit forestier, caractérisé par des bâtiments d'habitation et d'exploitation en bois, élevés au sein des forêts à exploiter. Ainsi, les verreries sont-elles abandonnées, puis rebâties rapidement, passant d'un flanc de montagne à un autre, au gré des concessions obtenues. A l'origine, la cohabitation avec les forges et fonderies semble bien se dérouler, car les verriers exploitent des forêts d'accès malaisé, donc peu intéressantes à charbonner pour les maîtres de forges. Toutefois, les communautés s'élèvent régulièrement contre ces artisans du feu qui déboisent à tour de bras, ouvrant de vastes brèches dans le manteau forestier qui occasionnent souvent éboulements et glissements de terrain.

Dès le XVIIIe siècle pourtant, les maîtres de forges qui exploitent les forêts des hautes-joux (le prince-évêque avait

132 Schwab 1934, 20-21 et 50-57; Steiner op. cit., 110-114.

133 Grossmann 1967, 161.

134 Glatz 1991.

la régale des mines et forêts) s'inquiètent de cette concurrence – craignant de manquer de bois et de voir les prix du charbon flamber! – et le font savoir au Prince.

Les premières verreries jurassiennes semblent naître au XVI^e siècle (peut-être avant?) à La Heutte dans le Bas-Vallon de Saint-Imier.¹³⁵ Puis, un groupe de verriers se déplace ensuite à Péry (1633–1657) avant d'entrer en concurrence avec les forges établies par le Prince à Reuchenette (dès 1654). Condamnées à partir les familles verrières se séparent et fondent alors la première verrerie de Court - Chaluet (1657–1672) et celle de Lobschez (1659–1696) au bord du Doubs. Le petit vallon de Chaluet a connu quatre verreries forestières successives¹³⁶; la dernière s'éteignit en 1727 ou 1738. Il faudra attendre une soixantaine d'années pour retrouver une verrerie dans la Prévôté de Moutier, près de Roches (1797–1853). De 1749 à 1798, une verrerie fonctionna encore au bord du Doubs, à Biaufond, mais sa production fut semble-t-il très irrégulière, en raison de fortes dissensions internes.¹³⁷ Enfin, le seul établissement verrier encore sur pied aujourd'hui, est celui de Moutier. Fondé en 1841, il produisit du verre (en particulier du verre plat) jusqu'en 1976.¹³⁸ On remarque toutefois, que les verreries qui ont pu entrer en concurrence avec les établissements sidérurgiques d'un strict point de vue de géographie forestière, sont rares: la verrerie de Péry, celles plus tardives de Roches et Moutier.

On sait par comparaison que la consommation en bois des verreries forestières, puis industrielles, dont c'était le combustible principal, est impressionnante. Si les chiffres pour les ateliers de Chaluet font défaut, il nous est possible de prendre pour exemple une installation similaire et à peine plus tardive de l'Entlebuch lucernois. Cette verrerie de la seconde moitié du XVIII^e siècle consommait près de 4860 stères de bois sec par an.¹³⁹ Cela représente un déboisement annuel de 8 ou 9 hectares!

Il demeure évidemment peu aisé de quantifier l'impact sur le domaine forestier de ces diverses activités, en particulier celui de la fabrication et du travail du fer. Une analyse serrée de la masse documentaire et statistique contenues dans les nombreuses liasses conservées aux Archives de l'ancien Evêché de Bâle serait du plus grand intérêt, mais reste à faire.

Nous n'avons pu résister à dresser une rapide évaluation sur la base des indications fournies par Quiquerez dans son ouvrage sur les Mines, forêts et forges.¹⁴⁰ Elles concernent essentiellement les établissements de Courrendlin et Undervelier, pour une période limitée. A partir des tonnages de charbon consommés, nous pouvons estimer le poids, et même le volume de bois vert abattu en forêt.¹⁴¹ La composition de la forêt jurassienne d'antan doit se rapprocher de celle d'aujourd'hui. Les essences les plus aptes à produire un charbon de bonne qualité, sont les feuillus, en particulier le hêtre et le chêne. Mais dans les montagnes jurassiennes le chêne demeure rare, de sorte que le hêtre a

eu les faveurs des charbonniers locaux, tout comme le sapin bien représenté dans nos forêts.

Selon les renseignements obtenus, on peut estimer un rendement maximal à l'hectare de 350 m³ sur pied¹⁴², ce qui correspond au rendement actuel des forêts jurassiennes. En connaissant les besoins en charbon des établissements sidérurgiques et en admettant le rendement maximal énoncé ci-dessus, nous pouvons tenter de quantifier les déboisements nécessaires.

C. La fabrication de la chaux

Nous avons vu (partie 1, chap. V) que la fabrication de la chaux nécessite un apport important en combustible, puisqu'en moyenne 1,5 à 3 stères de bois sont nécessaires pour la cuisson d'un mètre cube de roche calcaire. Cela représente pour un four de dimension moyenne d'une contenance de 20 m³ (environ 30 t de roche) entre 30 et 60 stères de bois, soit une coupe de bois de l'ordre de 600 à 1200 m². L'impact des fours à chaux considéré isolément demeure donc assez réduit, surtout si l'on considère leur localisation: en forêt ou pâturage, au pied de flancs rocheux ou d'éboulis, à proximité immédiate des matières premières que sont la pierre et le bois. C'est donc plutôt le cumul des différents exploitants (en particulier la sidérurgie et la verrerie) qui créent une situation de surexploitation de la forêt.

2. Modes d'exploitation de la forêt et impacts

Les modes d'exploitation des forêts demeurent mal connus, car les charbonniers mandatés par les directeurs de forges agissaient assez librement et parfois... sauvagement. On procède surtout par coupe blanc-étoc¹⁴³ jusque vers le premier tiers du XVIII^e siècle. On obtient ainsi un maximum de bois, en peu de temps, sur un espace restreint. Ce mode de faire met non seulement le sous-sol fo-

135 Entre la fin du XVI^e siècle et 1633, les verriers déplacèrent à maintes reprises leurs huttes: AAEB B 239/5 Erguel et B239/19 Erguel. Pour les verreries jurassiennes voir Glatz 1991, 74–80 et Michel 1989, 45–47.

136 Touchée par un site de dépôt de matériaux de l'autoroute A16, la troisième verrerie, active de 1699 à 1714, est en cours de fouille depuis 2000.

137 Pour l'histoire des verreries jurassiennes, on se référera au remarquable ouvrage de G.-J. Michel, Verriers et verreries en Franche-Comté au XVIII^e siècle.

138 Actuellement les Verres industriels SA de Moutier élabore des verres spéciaux.

139 Horat 1986, 53–54.

140 Quiquerez 1855, 166 et suiv., annexes 1 et 2.

141 Le bois vert perd 75% de son poids lors de la carbonisation; voir à ce sujet Partie 1, chap. III.

142 Dans ce cubage sont comprises des sections de bois forts d'un minimum de 7 cm. Données actuelles aimablement communiquées par G. Montandon, ingénieur-forestier à la Division forestière du Jura bernois, que nous remercions.

143 Coupe de bois où tous les arbres sont abattus.

restier à mal, mais ouvre la voie aux éboulis et autres glissements de terrain. En outre, il faut attendre 150 à 200 ans¹⁴⁴ pour retrouver une forêt de valeur équivalente au même endroit, pour autant qu'aucun troupeau ovin ou caprin n'y ait paissé.

Ce n'est, semble-t-il, qu'à partir du premier quart du XVIIIe siècle – le problème du déboisement devenant de plus en plus sensible – qu'on se soucie d'exploiter les bois de manière plus rationnelle, en clôturant strictement les espaces déboisés, afin de favoriser la repousse des jeunes arbres.¹⁴⁵

Au milieu du XIXe siècle, X. Marchand¹⁴⁶ met en garde l'Etat de Berne contre les méfaits des déboisements démesurés dans les montagnes du canton y compris dans le Jura (en particulier Bellelay, Petit-Val, Corcelles, Elay, Envelier et La Scheulte, où l'on ne compte plus les inondations et éboulements) et lance un vibrant appel au reboisement.

Il apparaît toutefois que les réglementations ont eu de la peine à être instaurées dans l'Etat de Berne, puisque selon J. A. Frey, le Règlement de 1836 relatif aux forêts privées encourageait encore le déboisement plutôt qu'il ne le freinait. Ce n'est qu'en 1860 que le canton se dote d'une Loi sur les défrichements définitifs des forêts.¹⁴⁷

Les chiffres publiés par Quiquerez, qui en tant qu'archéologue, historien et inspecteur des mines connaissait bien les archives relatives à la sidérurgie, permettent d'envisager les besoins en bois de l'industrie du fer pour les principales entreprises jurassiennes depuis le XVIIe siècle, mais surtout pour les XVIIIe–XIXe siècles. La confrontation des besoins en bois de deux établissements sidérurgiques et des ménages pour différentes périodes (tab. 16), met en évidence que la consommation des ménages¹⁴⁸ est au moins deux fois supérieure à celle de l'industrie du fer, et représente quelques 245 ha par année en 1770. On peut estimer les besoins de la sidérurgie pour cette même époque à une centaine d'hectare par année.¹⁴⁹ Le tableau 17 confirme ce rapport, puisqu'en 1860 les besoins de la population alors en forte croissance restent encore plus du double de ceux de l'industrie du fer, pour un total atteignant quelque 215'650 m³. Pour une couverture forestière estimée à 470 km² environ vers 1860/70, on peut estimer la croissance annuelle à 600 m³ par kilomètre carré¹⁵⁰, soit un total de 282'000 m³ pour l'ancien Evêché. D'un strict point de vue comptable, la production naturelle serait ainsi à même de faire face à la demande.

Toutefois, il nous faut relativiser un peu ces chiffres dans la mesure où la population est dispersée au fil de villages établis surtout dans les fonds de vallées. L'impact sur la forêt se répartit donc de manière assez uniforme et dispersée. L'industrie du fer quant à elle est concentrée dans quelques secteurs précis, ce qui occasionne des déboisements plus localisés, longtemps caractérisés par des coupes blancs-étocs. Les bassins d'alimentation en bois se développent tout d'abord assez naturellement autour du pôle industriel, pour ensuite s'étendre vers la périphérie.

L'approvisionnement en charbon de bois se fait généralement au sein d'un périmètre restreint qui ne s'étend guère au-delà d'un rayon de trois ou quatre lieues, soit 12 à 16 km, ceci dans le but évident de limiter au maximum les coûts de transport.

Ainsi, entre le XVIIIe et le XIXe siècle, ce sont plusieurs kilomètres carrés de forêt qui disparaissaient chaque année, sans que la repousse ne soit toujours assurée. L'inspecteur des forêts jurassiennes Frey¹⁵¹ signale qu'à son apogée l'industrie du fer consommait annuellement 60'000 toises de bois, soit quelques 120'000 m³. Les difficultés de gestion du patrimoine forestier et les techniques d'exploitation des bois en vigueur jusqu'au début du XVIIIe siècle permettaient d'assurer les besoins de l'ensemble des consommateurs, mais ont eu pour conséquence d'entamer sérieusement le capital forestier, la réserve, de certaines régions, notamment dans les vallées de Delémont et Tavannes, ainsi qu'autour de Moutier et du Petit-Val. Ces chiffres montrent à l'évidence que la situation était grave, plus particulièrement autour des industries, et qu'une gestion rigoureuse des domaines forestiers s'imposait: limitation des coupes, reboisement...

Les nombreux pâturages d'altitude que l'on trouve aujourd'hui sur le Moron, le Montoz, le Montgirod, le Petit-Val par exemple, sont les derniers témoignages de cette intense exploitation forestière. Ces espaces progressivement déboisés à partir du XVIe siècle ont été colonisés, parfois à l'insu du Prince¹⁵², par les agriculteurs, qui y ont vu des espaces d'estivage idéaux et ont parfois profité d'y installer, des loges à bétail qui au fil des ans se sont transformées en petites métairies. D'ailleurs, les photographies datant de la seconde moitié du XIXe et du début du XXe siècle ont fixé les cicatrices de cette exploitation intense: les sommets des montagnes apparaissent souvent pelés.

3. Voie de communication et transports

Les gros besoins en matières premières des industries jurassiennes (combustibles, minerai, sable vitrifiable...) nécessitaient un réseau de routes et chemins praticables

144 Information aimablement communiquée par Montandon de la Division forestière du Jura Bernois.

145 Rodriguez 1994, paragraphes relatifs à l'Enquête de 1709 et à l'Ordonnance forestale de 1755.

146 Marchand 1849.

147 Voir le Recueil de lois et ordonnances de 1874.

148 Marchand 1852 considère les besoins des ménages jurassiens nettement en-dessous des valeurs publiées par l'Auszug der Forststatistik de 1867: il considère que deux toises de bois (5,3 stères) suffisent à l'entretien d'un ménage, mais il ne semble pas compter le bois de chauffage.

149 L'absence de données statistiques détaillées pour tous les sites produisant ou transformant du fer n'autorise pas plus de précision.

150 Croissance naturelle annuelle actuelle de l'ordre de 6 m³/ha.

151 Frey 1891, 73.

152 Nouvelle Histoire du Jura, 128 et 129.

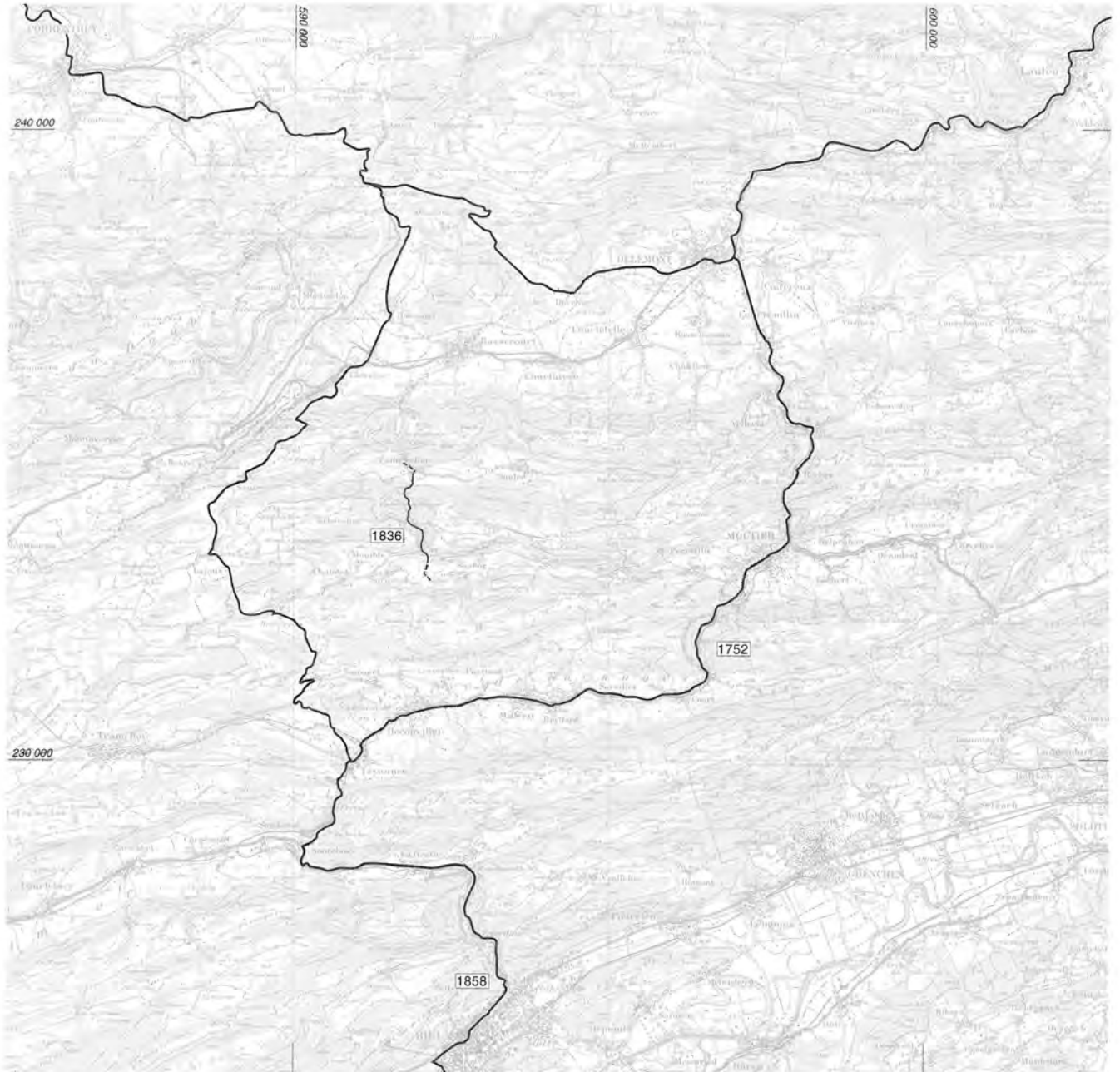


Fig. 100: Carte générale figurant les principaux axes routiers aux XVIIIe et XIXe siècles ainsi que le percement des cluses. Echelle 1:200 000. PK100, © 1996.

(fig. 100). Or jusqu'au début du XVIIIe siècle, le réseau routier de l'Evêché est difficilement carrossable. Quiquez remarque à juste titre que l'état des chemins ne permettait souvent pas le passage de grands chars. Les fouilles archéologiques ont confirmé ces dernières années le mauvais état de la route transjurane de Pierre-Pertuis, qui reliait le Plateau suisse à l'Ajoie par Bellelay – Glovelier – Les Mallettes – Porrentruy. Cette voie antique fut réaménagée au milieu du XVIIIe siècle et promue au rang de «grand chemin». Un embranchement d'importance plutôt régionale partait de Tavannes (Pierre-Pertuis) pour redescendre la vallée du même nom avant de rejoindre Moutier par Champoz, puis Bâle via les gorges. Une jonction importante se situait plus au nord à la hauteur du col des Ran-

giers/Les Mallettes avec la route venant de Bâle par Lau-fon et Delémont. Enfin une multitude de chemins, qu'il demeure difficile d'appréhender, venaient se greffer sur ces deux axes régionaux.

Si nous prenons l'exemple du site d'Undervelier qui connut un développement rapide dès le XVIIe siècle, on demeure étonné de voir qu'il n'était relié à la vallée de Delémont que par un petit chemin.¹⁵³ La cluse du Pichoux de-

¹⁵³ Consultation de la Carte de la Prévôté de Moutier-Grandval 1741/1767 (STAB AA IV 1780) et de la Carte de l'ancien Evêché de Bâle par A.J. Buchwalder 1815/19 (STAB I 71b).

meurait inaccessible aux chars¹⁵⁴, seule une sente remontait le flanc de la cluse en direction de Sornetan, elle ne permettait certainement pas le transport du combustible nécessaire. La seule voie de communication carrossable qui reliait la vallée de Tavannes à celle de Delémont passait par Champoz¹⁵⁵ – Moutier – Roches et Courrendlin par la cluse de Moutier, carrossable dès le Moyen Âge.¹⁵⁶ Depuis Moutier un chemin d'une catégorie inférieure sans doute remontait le Petit-Val par Perrefitte – Les Ecorcheresses – Undervelier/Souboz – Sornetan pour rejoindre Bellelay (fig. 100).

L'ouverture des voies ferrées à travers la chaîne jurassienne dans le dernier quart du XIXe siècle aura trois conséquences majeures: l'importation à moindre coût de combustible étranger (charbon de bois, coke etc.), la disparition de l'activité traditionnelle des charbonniers qui ne peuvent faire face à une telle concurrence, mais surtout un répit salvateur dans l'exploitation des forêts qui permettra à la couverture forestière de s'accroître à nouveau que ce soit de manière naturelle ou par des plantations. Dans les trois districts francophones du canton de Berne, la forêt, actuellement sous-exploitée, couvre une superficie supérieure de 50% à celle de 1860.¹⁵⁷ Dans le même temps, la couverture forestière de l'ancien Evêché s'est accrue de 34%.

4. Impacts socio-économiques

Dans ce bilan final, il importe encore d'approcher les impacts socio-économiques des différentes activités traitées ci-dessus. Quelles étaient leur place dans l'économie locale ou régionale. Le statut des ouvriers du fer était-il identique à celui du chauffournier? A qui appartiennent les moyens de production? Autant de questions difficiles à aborder, mais qui suscitent tout de même quelques éléments de réflexion.

La valorisation de ressources naturelles non renouvelables tels le fer, le sable et dans une moindre mesure le bois et le calcaire, nécessitent des connaissances techniques, fussent-elles empiriques, et un savoir-faire indéniables. Ces savoirs se transmettent probablement le plus souvent par filiation directe, de père en fils.

On peut admettre que la fabrication de fer dans un bas fourneau puisse être une activité temporaire, mais pas forcément accessoire. Trois éléments paraissent importants: la construction du fourneau qui nécessite des connaissances précises quant aux choix des matériaux et à la manière de les apprêter; la préparation du minerai (lavage, grillage...) et du combustible (charbon); la conduite du feu lors de l'opération de réduction dans le fourneau. L'absence de document écrit ne permet pas d'identifier un partage des tâches selon des corps de métiers différenciés: il est probable que le «fondeur» s'occupait avec un certain nombre d'ouvriers tant de la construction du four que du charbonnage et de la réduction à proprement parlé. L'arti-

san du fer qui sait tirer une éponge de métal d'un minéral ferreux tirait-il de son activité un certain prestige, voire quelque aisance matérielle? Nul ne le sait, mais les artisans-forgerons qui épuraient et travaillaient le matériau par la suite devaient, eux, en tirer de bons bénéfices.

Le cas de la verrerie forestière est mieux documenté; l'organisation y apparaît plus clairement. Le verrier jurassien construit son établissement en association avec d'autres verriers, parfois étrangers, au sein des forêts pour lesquelles il a obtenu une autorisation d'exploiter. Il a donc avantage à produire en continu, afin de rentabiliser son affaire. Peu de temps avant l'échéance du contrat, il tente de renouveler la concession. En cas de refus il doit quitter les lieux et créer une nouvelle entreprise ailleurs; le cas échéant, il louera ses services dans une autre verrerie. Ainsi dans le Chaluët, les verriers arrivés en 1657 disparurent vers 1727 après avoir créé successivement quatre verreries forestières et déboisé quasi l'ensemble du petit vallon. Quoiqu'itinérants, les verriers ont un statut social plutôt favorisé; ils acquièrent en général une partie des parcelles boisées qu'ils occupent et exploitent avec leur famille et associés. A leur départ, ces terres servent de garantie, sont mises en fermage ou revendues avec une notable plus-value, puisque champs et pâturages ont fait place à la forêt.

Quant au charbonnier, il s'agit souvent d'un professionnel qui met quotidiennement son savoir-faire en pratique. Il n'est pas rare de découvrir des familles où l'on charbonne de père en fils, notamment dans le cas de contrats avec d'importantes entreprises sidérurgiques. Le charbonnier s'installe en général avec sa famille dans une hutte établie au sein de la forêt à charbonner qu'il a acquise ou qui lui a été concédée par le Prince, qui tient la Régale des hautes-joux. A charge du charbonnier de livrer un charbon de bonne qualité aux fourneaux et forges de son Altesse. Son activité est saisonnière et s'étend du printemps à l'automne, puisqu'en hiver, l'accès aux forêts n'est pas garanti. Mais, il existe de nombreux charbonniers amateurs ou épisodiques, qui provoquent la colère des charbonniers de métier. On retrouve leur trace dans les nombreuses plaintes adressées aux autorités et conservées dans les archives. Pelet¹⁵⁸ l'avait déjà fait remarquer pour le Pays de Vaud, où de nombreux charbonniers non professionnels pratiquent temporairement pour compléter leur revenu: agriculteurs, bûcherons, forestiers, artisans du fer...

154 Ouverte à la circulation vers 1836; trajet Court – Saicourt – Bellelay – Undervelier faisait 27 km.

155 On évite ainsi la cluse de Court ouverte aux véhicules dès 1752; Gerber 1997, 108–110 et Pierrehumbert 1942, 93–108.

156 Ce qui représente environ 40 km pour un trajet Court – Undervelier par Moutier et Courrendlin, contre seulement 22 km en passant par Les Ecorcheresses, mais il s'agissait d'un chemin de montagne.

157 Auszug der Forststatistik des Kantons Bern 1867 (tab. XIV); Forêt bernoise en chiffres 1992; Farron 1987, 96.

158 Pelet 1983, 297 et chapitres 15 et 16.

Toutefois, la production de masse semble rester le fait de charbonniers professionnels.

La situation semble encore différente pour le chauxfournier, pour lequel nous n'avons que peu d'information. Il possède un savoir-faire qu'il valorise de manière épisodique. Il n'est pas rare de voir des tuiliers et potiers s'improviser chauxfournier.¹⁵⁹ D'après les rares documents d'archives consultés, il apparaît que le chauxfournier s'occupe essentiellement de la récolte des pierres à chaux, de l'édification du four et de la cuisson. Il n'est pas exclu par ailleurs qu'il assume dans certains cas des tâches d'abatage, de voiturage ou d'extraction. Payé à la tâche, le chauxfournier Dupuis, engagé à Moutier, obtient en 1851 une somme de 221 francs comptant, pour une opération nécessitant plusieurs mois de travail cumulé; charge à lui d'embaucher les servants nécessaires à l'opération. A cette époque, le salaire journalier d'un ouvrier du bâtiment atteignait 2 francs environ.¹⁶⁰

La Table générale des arts et métiers (...) par villes et bailliages¹⁶¹ datée de 1770, fournit de précieuses indications sur les professions exercées dans l'ancien Evêché de Bâle. Toutefois, il reste difficile de faire une évaluation pour la sidérurgie industrielle – il n'est plus alors question de produire dans des bas fourneaux! – car les différentes

opérations exigent des degrés de qualifications variés allant du manoeuvre au fondeur.

Par contre, on apprend que 15 charbonniers sont établis dans le Bailliage de Delémont, un en Prévôté de St-Ursanne et un autre en Prévôté de Moutier-Grandval; on trouve encore 14 verriers, dont 13 dans le Bailliage des Franches-Montagnes et un en Prévôté de St-Ursanne.¹⁶²

Fait étrange, la profession de chauxfournier n'apparaît pas dans cet inventaire. Faut-il en déduire qu'elle n'existait pas dans les montagnes jurassiennes pourtant riches en calcaire. Nous pensons au contraire que d'autres corps de métiers, voire même les agriculteurs, ont dû se charger de la produire. On remarquera que cette Table mentionne 21 tuiliers et 60 potiers de terre, qui nous le savons par d'autres sources étaient parfois à même de fabriquer de la chaux. En revanche, on sait peu de choses du statut social de ces artisans et ouvriers; une étude serrée des archives et actes notariés apporterait sans conteste quelque lumière, mais elle reste à faire.

159 Dans les Archives de la Commune bourgeoise de Moutier, Section IV, casier 4, dossier 28: une lettre du 13 août 1823 nous informe que le tuilier Chodat fabrique de la chaux.

160 Ritzmann-Blickenstorfer 1996, 446.

161 Panorama jurassien. Tome II: Des travaux et des hommes, annexe 1, 195.

162 Toutes les verreries jurassiennes sont alors au fil du Doubs.

Annexes

Analyses chimiques des déchets métallurgiques de Roches - Combe Chopin et du Sidérolithique de la région.

Vincent Serneels

Les analyses ont été réalisées au Centre d'Analyse Minérale de l'Université de Lausanne (Prof. H.-R. Pfeifer et J.-C. Lavanchy) selon les méthodes et les procédures mises au point dans le cadre des recherches de V. Serneels sur la sidérurgie ancienne. Elles sont décrites en détail dans d'autres publications (Pfeifer et al. 1991, Serneels 1993). Les analyses chimiques globales sont réalisées par la méthode de la fluorescence des rayons X avec un spectromètre Philips PW 1400 en utilisant une gamme de standards appropriée. Diverses mesures complémentaires ont été effectuées (perte au feu, dosage du carbone et du fer ferreux).

Echant.	RCC 001	RCC 002	RCC 003	RCC 004	RCC 005	RCC 006	RCC 007	RCC 021	RCC 022	RCC 023
	scorie noire vitreuse	scorie noire vitreuse	scorie noire vitreuse	scorie noire vitreuse	scorie noire vitreuse	scorie noire vitreuse	scorie noire vitreuse	verre noir dense	verre noir dense	verre noir dense
	%									
SiO ₂	29.63	32.76	30.92	24.78	29.22	26.11	34.09	53.60	53.14	52.23
TiO ₂	0.79	0.91	0.74	0.78	0.80	0.76	0.80	0.91	0.89	0.82
Al ₂ O ₃	17.43	21.11	16.62	17.73	17.84	17.03	18.13	16.74	16.81	15.00
Fe ₂ O ₃	21.53	13.55	22.46	13.97	23.15	11.49	16.76	0.00	0.00	0.75
Fe m.	16.62	21.66	18.70	33.17	15.72	33.65	18.58	17.06	14.90	16.80
MnO	4.99	0.34	0.74	1.75	2.79	2.61	0.00	2.06	4.12	5.17
MgO	0.08	0.11	0.09	0.09	0.09	0.15	0.14	0.07	0.08	0.07
CaO	0.47	0.58	0.47	0.40	0.52	0.46	0.58	0.46	0.47	0.42
Na ₂ O	5.09	5.65	5.36	4.36	5.73	4.94	7.59	6.01	6.27	5.40
K ₂ O	0.04	0.04	0.02	0.02	0.05	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03
P ₂ O ₅	0.87	1.19	0.86	0.62	1.02	0.86	1.31	1.19	1.28	1.06
H ₂ O	0.26	0.16	0.28	0.27	0.29	0.35	0.33	0.09	0.10	0.12
CO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00
C. org.	1.28	1.10	1.64	0.93	1.95	0.62	0.97	0.80	0.65	0.81
	0.11	0.16	0.18	0.13	0.38	0.00	0.00	0.06	0.24	0.42
somme	99.20	99.32	99.08	98.99	99.55	99.06	99.38	99.08	98.89	99.10
Fe tot	32.97	26.65	30.98	37.29	31.21	36.80	26.17	15.32	15.70	18.75
	ppm									
Zr	188	246	189	192	202	184	216	261	258	237
Y	2	47	18	<1<	16	5	82	59	59	50
Sr	80	79	81	60	86	72	90	89	93	86
Rb	5	13	8	<1<	9	2	<1<	22	24	21
Ba	63	68	75	61	79	57	56	89	78	89
V	1808	2425	1600	2228	1796	1651	1754	989	1039	936
Sn	<4<	<4<	<4<	<4<	<4<	<4<	8	<4<	<4<	<4<
Sb	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<
Ag	5	6	6	4	4	7	4	7	7	7
As	7	6	7	4	11	7	6	9	12	11
Pb	66	39	53	55	51	55	37	28	37	42
Zn	80	40	63	46	38	60	31	11	23	16
Cu	<2<	<2<	<2<	<2<	<2<	<2<	<2<	<2<	<2<	<2<
Ni	7	10	16	8	16	5	10	7	8	6
Cr	596	666	386	633	502	457	472	315	284	261
Co	73	45	57	68	54	66	45	33	36	37

1.b	Localisation	Description	Dimensions (cm)	Poids (gr)	Remarque
RCC 001	m ² 118 / 70	SVN, frgt. de coulure	10 x 6 x 3	105	
RCC 002	m ² 118 / 70	SVN, frgt. de coulure	7 x 3 x 5	65	pisolithes collés
RCC 003	m ² 118 / 70	SVN, frgt. de coulure inclinée	7 x 6 x 4	60	
RCC 004	m ² 118 / 70	SVN, frgt. de coulure	6 x 4 x 3	70	
RCC 005	m ² 118 / 70	SVN, frgt. de coulure	10 x 5 x 4	95	
RCC 006	m ² 118 / 70	SVN, frgt. de coulure	15 x 10 x 7	450	
RCC 007	surface	SVN, frgt. de coulure	15 x 12 x 6	523	
RCC 021	m ² 118 / 70	Verre noir, bloc cassé	5 x 5 x 5	80	bille métal
RCC 022	m ² 118 / 70	Verre noir, bloc cassé	4 x 4 x 4	60	bille métal
RCC 023	m ² 118 / 70	Verre noir, bloc cassé	10 x 10 x 7	350	bille métal

1 Roches - Combe Chopin 1996. Scories noires vitreuses (SVN) et verres noirs. a) Analyses chimiques b) Description des échantillons.

<i>Echant.</i>	<i>RCC 011</i> scorie grise dense	<i>RCC 012</i> scorie grise dense	<i>RCC 013</i> scorie grise dense	<i>RCC 014</i> scorie grise dense	<i>RCC 015</i> scorie grise dense	<i>RCC 801</i> scorie ferreuse	<i>RCC 811</i> fragment éponge	<i>RCC 812</i> scorie ferreuse	<i>RCC 813</i> scorie ferreuse	<i>RCC 821</i> scorie rouillée
	%									
<i>SiO₂</i>	29.04	22.53	27.21	29.85	22.91	17.16	16.07	11.96	16.75	19.56
<i>TiO₂</i>	0.62	0.73	0.73	0.66	0.71	0.45	0.49	0.31	0.43	0.42
<i>Al₂O₃</i>	13.23	15.74	15.85	14.67	15.93	10.80	13.42	7.76	9.99	9.37
<i>Fe₂O₃</i>	14.80	27.55	19.90	17.55	23.86	36.73	23.32	48.60	43.96	43.60
<i>FeO</i>	28.64	18.64	20.61	24.18	24.84	22.55	34.42	20.69	10.66	18.46
<i>Fe m.</i>	2.31	6.99	9.33	5.72	6.04	0.00	6.11	5.62	0.00	0.00
<i>MnO</i>	0.07	0.09	0.08	0.14	0.15	0.06	0.07	0.05	0.08	0.05
<i>MgO</i>	0.59	0.35	0.37	0.42	0.38	0.43	0.35	0.32	0.34	0.32
<i>CaO</i>	8.13	4.79	3.55	4.61	3.49	3.77	2.17	1.55	5.64	2.65
<i>Na₂O</i>	0.05	0.02	0.05	0.00	0.03	0.04	0.07	0.00	0.00	0.00
<i>K₂O</i>	0.74	0.54	0.67	0.73	0.47	0.58	1.37	0.87	0.43	0.60
<i>P₂O₅</i>	0.38	0.28	0.25	0.32	0.32	0.38	0.29	0.39	0.27	0.34
<i>H₂O</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.29	0.00	0.00	3.41	1.80
<i>CO₂</i>	0.43	0.83	0.42	0.50	0.28	3.42	0.90	1.68	6.58	1.88
<i>C. org.</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17	0.00	0.00	0.53	0.00
<i>somme</i>	99.04	99.08	99.03	99.35	99.42	98.81	99.05	99.80	99.08	99.06
<i>Fe tot</i>	34.92	40.75	39.27	36.79	42.03	43.21	49.18	55.70	39.03	44.84
	ppm									
<i>Zr</i>	160	173	176	174	169	118	119	84	130	120
<i>Y</i>	6	<1<	<1<	77	81	<1<	70	48	48	52
<i>Sr</i>	88	62	48	59	46	70	38	30	50	42
<i>Rb</i>	4	<1<	<1<	<1<	<1<	<1<	<1<	<1<	<1<	<1<
<i>Ba</i>	102	39	59	59	45	97	29	31	22	50
<i>V</i>	1401	1710	1737	1476	1729	1238	1978	1198	1209	1156
<i>Sn</i>	<4<	<4<	<4<	<4<	<4<	<4<	<4<	<4<	<4<	<4<
<i>Sb</i>	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<
<i>Ag</i>	3	2	4	2	5	7	2	4	<1	2
<i>As</i>	5	4	6	3	5	15	33	41	37	46
<i>Pb</i>	64	60	62	53	63	66	71	75	57	64
<i>Zn</i>	71	84	100	16	<2<	95	<2<	<2<	6	3
<i>Cu</i>	<2<	<2<	<2<	<2<	<2<	<2<	<2<	<2<	<2<	<2<
<i>Ni</i>	17	7	4	4	4	39	50	58	58	59
<i>Cr</i>	464	400	420	326	361	400	426	264	374	265
<i>Co</i>	66	69	82	71	77	121	130	209	161	131

2.b	Localisation	Description	Dimensions (cm)	Poids (gr)	Remarque
<i>RCC 011</i>	m ² 118 / 70	SGD, frgt. de coulure en cordons	5 x 5 x 1.5	75	
<i>RCC 012</i>	m ² 118 / 70	SGD, frgt. de coulure en cordons	7 x 5 x 2.5	85	
<i>RCC 013</i>	m ² 118 / 70	SGD, frgt. de coulure en cordons	7 x 5 x 2.5	55	
<i>RCC 014</i>	surface	SGD, frgt. de coulure en cordons	15 x 9 x 2	248	
<i>RCC 015</i>	surface	SGD, frgt. de coulure en cordons	13 x 8 x 3.5	259	
<i>RCC 801</i>	m ² 118 / 70	Scorie ferreuse, informe	4 x 4 x 4	40	
<i>RCC 811</i>	couche 73	Scorie ferreuse, décheté	10 x 8 x 5	200	frgt. éponge
<i>RCC 812</i>	couche 73	Scorie ferreuse, informe	5 x 5 x 3	50	
<i>RCC 813</i>	couche 73	Scorie ferreuse, informe	3 x 4 x 3	40	
<i>RCC 821</i>	surface	Scorie ferreuse, informe	5 x 2 x 2	100	magnétisme faible

2 Roches - Combe Chopin 1996. Scories grises denses (SGD) et scories ferreuses (SFR). a) Analyses chimiques b) Description des échantillons.

Echant.	RCC 701 paroi fondue	RCC 702 paroi fondue	RCC 7031 paroi fondue	RCC 7032 paroi non fondue	RCC 704 paroi fondue	RCC 7051 paroi fondue	RCC 7052 paroi non fondue	RCC 706 paroi non fondue	RCC 751 argile sole four 93	RCC 771 argile cuite fourneau
	%									
SiO ₂	74.99	73.85	79.00	91.54	81.50	74.36	93.02	93.49	22.36	83.74
TiO ₂	0.38	0.49	0.38	0.32	0.32	0.34	0.28	0.29	0.43	0.45
Al ₂ O ₃	7.37	9.36	6.84	5.23	5.30	6.54	4.86	4.93	7.62	8.13
Fe ₂ O ₃	2.01	0.00	4.55	0.00	2.11	4.05	0.00	0.00	3.51	2.01
Fe o	9.11	12.92	4.85	0.00	1.65	9.58	0.24	0.00	0.47	0.18
Fe m	0.00	0.00	0.30	0.58	0.00	0.00	0.31	0.49	0.00	0.00
MnO	0.03	0.10	0.02	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00
MgO	0.23	0.20	0.23	0.07	0.19	0.22	0.08	0.06	0.94	0.14
CaO	3.92	1.86	1.74	0.25	6.07	2.93	0.21	0.22	32.86	0.89
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.07
K ₂ O	0.71	0.62	0.93	0.14	0.33	1.16	0.03	0.04	1.38	0.22
P ₂ O ₅	0.16	0.15	0.12	0.02	0.09	0.21	0.02	0.02	0.09	0.14
H ₂ O	0.20	0.13	0.00	0.00	1.83	0.01	0.00	0.00	3.69	3.09
CO ₂	0.45	0.39	0.46	0.60	0.47	0.35	0.49	0.44	25.18	0.54
C. org.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00
somme	99.58	100.07	99.42	98.75	99.88	99.76	99.54	99.98	99.01	99.60
Fe tot	8.49	10.04	7.25	0.58	2.76	10.28	0.50	0.49	2.82	1.54
	ppm									
Zr	140	159	147	123	139	131	117	113	213	163
Y	26	26	26	10	16	22	8	11	8	27
Sr	37	29	26	7	40	32	8	8	214	36
Rb	20	17	4	1	16	25	12	2	67	14
Ba	33	73	20	134	35	42	34	95	218	78
V	332	454	225	15	85	351	20	30	105	79
Sn	<4<	<4<	<4<	5	<4<	<4<	<4<	5	6	<4<
Sb	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	4	<3<
Ag	9	8	7	2	2	3	6	3	<1<	2
As	4	7	6	10	7	7	21	7	11	<3<
Pb	56	46	33	26	50	51	53	23	7	37
Zn	75	12	32	21	46	13	15	28	32	56
Cu	5	<2<	8	11	12	<2<	14	12	11	15
Ni	18	9	8	6	21	10	17	8	24	41
Cr	86	127	<2<	7	35	72	20	11	130	36
Co	41	36	50	495	28	41	144	95	20	77

3.b	Localisation	Description	Dimensions (cm)	Poids (gr)	Remarque
RCC 701	m ² 118 / 70	Paroi, déformé, noir / blanc	6 x 5 x 3	85	zone fondue
RCC 702	couche 73	Paroi, déformé, blanc	30 x 10 x 5	850	zone fondue
RCC 7031	couche 73	Paroi, déformé, vert / blanc	10 x 10 x 10	500	zone fondue
RCC 7032	zone non fondue				
RCC 704	couche 73	Paroi, déformé, vert / blanc	5 x 7 x 5	150	zone fondue
RCC 7051	surface	Paroi, déformé, vert / blanc	15 x 7 x 4	470	zone fondue
RCC 7052	zone non fondue				
RCC 706	surface	Paroi, plaque, vert / blanc	10 x 7 x 4	200	zone non fondue
RCC 771	surface	Argile, plaque, rouge	7 x 7 x 1.5	38	cuite
RCC 751	sole foyer	Argile, plaque, rose	4 x 4 x 1	25	peu cuite

3 Roches - Combe Chopin 1996. Fragments de parois et autres matériaux argilo-sableux. a) Analyses chimiques, b) Description des échantillons.

4.a SIDEROLITHIQUE (MINÉRAI) ROCHES COMBE CHOPIN					Centre d'Analyse Minérale, Université Lausanne COMBE CHALUET					
Echant.	RCC 1011 pisolithes chauffés	RCC 1012 agrégats chauffés	RCC 1013 pisolithes	RCC 1014 agrégats	RCH 1011 argile sableuse tt venant	RCH 1012 pisolithes lavés	RCH 1013 agrégat cœur jaune lavé	RCH 1014 concentré mixte lavé	RCH 1021 argile rouge tt venant	RCH 1022 pisolithes lavés
	%									
SiO ₂	10.32	14.00	9.62	10.43	46.95	23.51	36.07	54.90	64.81	23.11
TiO ₂	0.52	0.59	0.47	0.48	0.54	0.35	0.48	0.52	1.00	0.37
Al ₂ O ₃	12.35	13.65	11.58	11.08	9.90	7.04	8.97	8.83	17.50	7.23
Fe ₂ O ₃	67.78	58.77	63.40	63.92	32.78	57.79	44.90	26.49	7.85	58.66
FeO	0.94	6.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16	0.00	0.00
Fe m.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO	0.07	0.10	0.06	0.07	0.06	0.12	0.05	0.05	0.01	0.07
MgO	0.11	0.12	0.16	0.16	0.21	0.17	0.18	0.20	0.29	0.14
CaO	0.55	0.47	0.19	0.17	0.40	0.30	0.34	0.32	0.31	0.21
Na ₂ O	0.01	0.02	0.03	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
K ₂ O	0.03	0.03	0.01	0.02	0.12	0.06	0.04	0.11	0.48	0.05
P ₂ O ₅	0.20	0.19	0.16	0.15	0.19	0.23	0.18	0.16	0.07	0.25
H ₂ O	4.99	4.08	12.11	11.67	7.79	9.09	8.62	6.98	6.85	8.89
CO ₂	1.20	0.96	1.20	1.15	0.20	0.53	0.45	0.16	0.00	0.51
C. org.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
somme	99.06	99.10	98.99	99.30	99.14	99.19	100.31	98.88	99.17	99.49
Fe tot	48.14	45.86	44.34	44.71	22.93	40.42	31.40	18.65	5.49	41.03
	ppm									
Zr	131	100	104	120	190	139	164	200	321	134
Y	<1<	21	22	<1<	13	<1<	4	29	15	<1<
Sr	28	26	13	20	46	28	25	42	51	26
Rb	<1<	<1<	<1<	<1<	<1<	<1<	<1<	<1<	51	<1<
Ba	58	30	13	22	70	26	49	59	86	36
V	1812	1951	2315	1627	923	1302	565	901	261	1074
Sn	<4<	<4<	<4<	<4<	<4<	<4<	<4<	<4<	<4<	<4<
Sb	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<
Ag	<1<	3	3	5	5	4	5	5	4	4
As	22	24	23	22	23	29	22	19	23	35
Pb	177	128	106	143	62	98	69	57	28	111
Zn	284	315	264	240	155	232	233	39	76	207
Cu	<2<	<2<	<2<	<2<	<2<	<2<	<2<	<2<	11	<2<
Ni	60	66	62	50	122	192	162	46	63	165
Cr	447	568	847	333	284	312	161	400	115	267
Co	150	254	252	150	101	142	107	69	38	125

4.b	Localisation	Description	Dimensions (cm)	Poids (gr)	Remarque
RCC 1011	Roches c 73	Sidérolithique, pisolithes	chauffés		
RCC 1012	Roches c 73	Sidérolithique, agrégats	chauffés		
RCC 1013	Roches c 73	Sidérolithique, pisolithes			
RCC 1014	Roches c 73	Sidérolithique, agrégats			
RCH 1011	Court - Chaluet	Sidérolithique, argile sableuse	tout venant	50% concrétions	
RCH 1012	Court - Chaluet	Sidérolithique, pisolithes	lavé		
RCH 1013	Court - Chaluet	Sidérolithique, agrégat	lavé	cœur jaune	
RCH 1014	Court - Chaluet	Sidérolithique, concentré mixte	lavé		
RCH 1021	Court - Chaluet	Sidérolithique, argile rouge	tout venant	5% concrétions	
RCH 1022	Court - Chaluet	Sidérolithique, pisolithes	lavé		

4 Roches - Combe Chopin 1996. Concrétions ferrugineuses. Court - Combe Chaluet. Concrétions ferrugineuses et autres matériaux sidérolithiques.
a) Analyses chimiques, b) Description des échantillons.

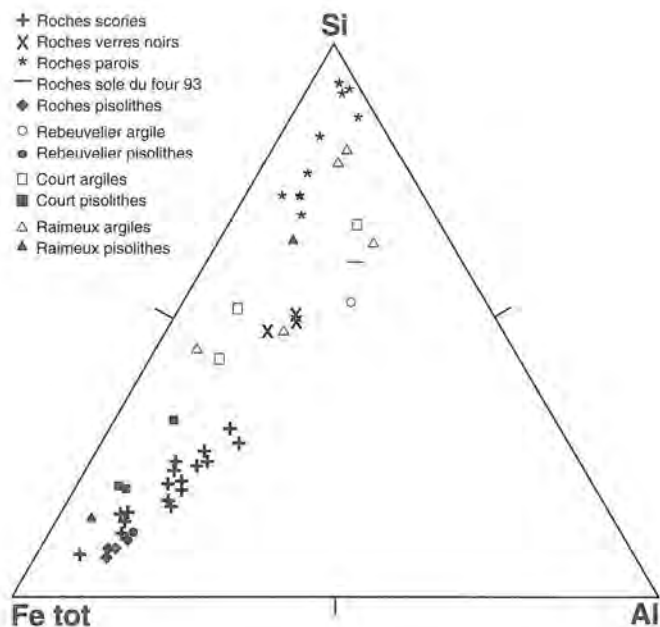
REBEUVELIER LA VERRERIE			GALERIE DU RAIMEUX						
Echant.	RCM 2011 argile rouge tt venant	RCM 2012 pisolithes lavés	RGR 861 argile rouge tt venant	RGR 911 argile sableuse tt venant	RGR 912 concrétion ferreuse lavée	RGR 931 argile sableuse tt venant	RGR 951 argile sableuse tt venant	RGR 952 concrétion ferreuse lavée	RGR 971 argile rouge tt venant
	%								
SiO ₂	46.34	12.27	61.21	49.40	17.31	75.36	76.85	64.64	49.17
TiO ₂	1.26	0.52	1.43	0.34	0.29	0.66	0.78	0.92	1.22
Al ₂ O ₃	20.76	11.03	20.73	5.98	5.37	9.57	10.27	11.64	18.25
Fe ₂ O ₃	12.06	60.07	6.90	35.44	67.19	4.53	6.33	14.83	21.09
FeO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe m.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MnO	0.03	0.05	0.01	0.04	0.13	0.01	0.09	0.23	0.04
MgO	0.25	0.26	0.23	0.20	0.16	0.12	0.14	0.17	0.26
CuO	5.16	1.43	0.71	0.47	0.18	0.16	0.17	0.21	0.34
Na ₂ O	0.00	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00
K ₂ O	0.24	0.06	0.11	0.20	0.07	0.07	0.06	0.05	0.17
P ₂ O ₅	0.12	0.25	0.09	0.24	0.21	0.03	0.03	0.06	0.17
H ₂ O	9.02	11.18	7.94	6.33	8.09	3.96	4.55	6.26	9.13
CO ₂	3.68	1.82	0.67	0.77	0.66	0.00	0.00	0.00	0.18
C. org.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
somme	98.92	99.13	100.03	99.41	99.66	94.47	99.40	99.01	100.02
Fe tot	8.43	42.01	4.83	24.79	46.99	3.17	4.43	10.37	14.75
	ppm								
Zr	474	181	482	155	109	243	327	376	419
Y	21	<1<	28	19	<1<	22	25	27	21
Sr	59	47	71	39	45	38	36	40	77
Rb	31	<1<	22	<1<	<1<	12	9	2	15
Ba	33	<9<	37	63	44	80	77	85	52
V	352	1949	187	233	939	140	164	395	513
Sn	6	<4<	<4<	<4<	<4<	<4<	<4<	<4<	<4<
Sb	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<	<3<
Ag	5	4	1	6	3	4	2	2	4
As	22	25	39	29	40	19	46	70	32
Pb	21	124	20	54	156	24	24	41	36
Zn	122	425	100	167	350	45	82	180	156
Cu	9	<2<	18	<2<	<2<	10	16	9	<2<
Ni	95	213	84	89	210	30	43	82	157
Cr	158	296	138	58	154	62	68	99	135
Co	36	115	49	99	157	100	61	80	62

5.b	Localisation	Description	Dimensions (cm)	Poids (gr)	Remarque
RCM 2011	Rebeuvelier	Sidérolithique, argile rouge	tout venant	< 1% concrétions	
RCM 2012	Rebeuvelier	Sidérolithique, pisolithes	lavé		
RGR 861	Raimeux, m 86	Sidérolithique, argile rouge	tout venant	15% concrétions	
RGR 911	Raimeux, m 91	Sidérolithique, argile sableuse	tout venant		
RGR 912	Raimeux, m 91	Sidérolithique, concrétion Fe	lavé		
RGR 931	Raimeux, m 93	Sidérolithique, sable	tout venant	20% concrétions	
RGR 951	Raimeux, m 95	Sidérolithique, argile sableuse	tout venant		
RGR 952	Raimeux, m 95	Sidérolithique, concrétion Fe	lavé		
RGR 971	Raimeux, m 97	Sidérolithique, argile rouge	tout venant	5% concrétions	

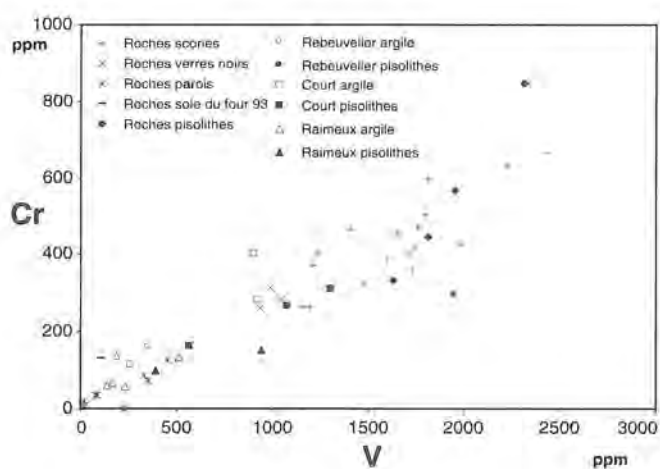
5 Rebeuvelier - La Verrerie: Concrétions ferrugineuses et autres matériaux sidérolithiques.

Galerie du tunnel du Raimeux: Concrétions ferrugineuses et autres matériaux sidérolithiques.

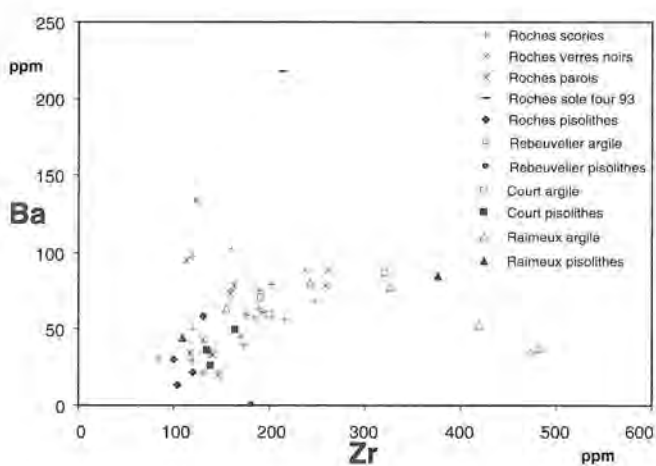
a) Analyses chimiques, b) Description des échantillons.



6 Diagramme Fe - Si - Al et projections des différents minerais et déchets métallurgiques de Roches - Combe Chopin 1996.



7 Diagramme Cr - V et projections des différents minerais et déchets métallurgiques de Roches - Combe Chopin 1996.



8 Diagramme Ba - Zr et projections des différents minerais et déchets métallurgiques de Roches - Combe Chopin 1996.

Bibliographie

- Abetel, E. 1992*
Le site industriel de Montcherrand. Cahiers d'archéologie romande 54. Lausanne.
- Adam, J.-P. 1995*
La construction romaine. Matériaux et techniques. Troisième édition. Paris. (En particulier le chapitre 2.3: La chaux, les mortiers, p. 69–79).
- Adam, J.-P. et Varène, P. 1982*
Fours à chaux artisanaux dans le Bassin méditerranéen. Actes du colloque d'Aix-en-Provence, octobre 1982: Histoire des techniques et sources documentaires. Cahier 7, Université de Provence.
- Affolter, G. 1984*
A la découverte d'une ... meule à charbon. L'Hôtâ 7, 3–17.
- Agricola, G. 1556*
De Re Metallica libri XII. Traduction critique d'A. France-Lanord. Gérard Klopp éditeur, 1992. Thionville.
- Amwäg, G. 1929*
Tableaux des anciennes mesures du ci-devant Mont-Terrible comparées aux mesures républicaines. Tiré à part des Actes de la société jurassienne d'émulation 33, 255–265. St-Imier.
- Andrieux, P. 1990*
Prologomènes à une étude tracéologique sur les structures d'élaboration thermique et les parois argilo-sableuses. Application à la paléo-métallurgie du fer. Thèse Université de Besançon.
- Atlas géologique de la Suisse 1:25'000. Carte 1106 Moutier. Notice explicative par U. Pfirter. Berné, 1996 et 1997.
- Auszug der Forststatistik des Kantons Bern 1867, Berné.
- Berthelot, A. (dir.) vers 1885*
La Grande Encyclopédie. Inventaire raisonné des sciences, des lettres et des arts. Paris.
- Bielenin, K. 1992*
Starożytne Gornictwo i Hutnictwo Zelaza w Gorach Swietokrzyskich (Ancient Mining and Iron Metallurgy in the Gory Swietokrzyskie - Holy Cross Mountains). Kielce.
- Birmann, P. et Bridel Ph.-S. 1802*
Voyage pittoresque de Basle à Bienne par les vallons de Mottiers-Grandval. Bâle.
- Bitterli, Th. 1990*
Vom Kalkbrennen im Urnerland. Geschichtsfreund 90, 145–165.
- Bitterli, Th. 1995*
Der Kalkofen – Ein interessanter Wegbegleiter für die Wegforschung. Bulletin IVS 95/2, 33–36.
- Bitterli, Th. 1998*
Kalkofen Valchava. Notizen zum Kalkbrand 5.–12. September 1998. Typoscript.
- Breuer, J. et Fraipont, Ch. 1927*
Four à chaux de l'époque romaine à Clermont-lez-Nandrin (Province de Liège). Chronique archéologique du Pays de Liège 20, 84–92.
- Bühler, R., 1986*
Bergwerk Herznach. Erinnerungen an den Fricktaler Erzbergbau. Aarau.
- Caton*
De agricultura. Ed. Belles lettres. Paris, 1975.
- Celis, G. 1991*
Les fonderies africaines du fer: un grand métier disparu. Frankfurt am Main.
- Chronique 1947*
Chronique du Jura bernois. Zurich.
- Claude, J. 1990*
La chaux, ses utilisations. Paris.
- Cop, R. 1993*
Avant le ciment: la chaux. Quotidien L'Impartial, 25 janvier, 32.
- Crenn, B. 1992*
Des fourneaux à chaux aux usines chauxfournières, l'évolution architecturale d'une industrie rurale au XIXe siècle. Arts de l'ouest, architecture du travail, 208–223.
- Crew, P. 1991*
The Experimental Production of Prehistoric Bar Iron. Historical Metallurgy, 25/1, 21–34.
- Curdy, Ph. et al. 1993*
Brig-Glis/Waldmatte, un habitat alpin de l'Age du Fer. Fouilles archéologiques N9 en Valais. Archéologie suisse 16, 4, 138–151 (en particulier four à chaux p. 140).
- Domergue, C., Jarrier, C. et Tollon, F. 1999*
La métallurgie extractive du fer dans la Montagne Noire (France) à l'époque romaine. Nouveaux documents. Revue Archéologique de Narbonnaise 32, 147–156.
- Dubler, A.-M. 1988*
Masse und Gewichte im Staat Luzern und in der alten Eidgenossenschaft. Luzern.
- Dubois, Cl., Izard, V. et Métaillé, J.-P. 1994*
Forêts charbonnées et archéologie métallurgique en Ariège (Pyrénées françaises). Actes du colloque de Besançon en novembre 1993: La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen. Annales littéraires de l'Université de Besançon 536. Paris.
- Duhamel du Monceau, H. 1761*
Art du charbonnier ou manière de faire le charbon de bois. Description des Arts et métiers, tome 19: Les arts des mines. Paris 1761; reprint Slatkine, Genève 1984.
- Duss, P. 1982*
Köhlerei, ein altes Gewerbe. In: Duss, P.: Romoos.
- Eschbach, F. 1997*
Rail 2000. Un ensemble de fours à chaux médiévaux et modernes à Concise VD - Les Favarges. Rapport photocopié du bureau Archéodunum S.A.

- Eschenlohr, L. et Serneels, V. 1991*
Les bas fourneaux mérovingiens de Boécourt, Les Boulies (JU/ Suisse). Cahier d'archéologie jurassienne 3. Porrentruy.
- Eschenlohr, L. 1993*
Recherches récentes sur la sidérurgie ancienne dans le Jura (partie francophone de l'ancien Evêché de Bâle). *Minaria Helvetica* 13b, 66–69.
- Eschenlohr, L. 1994*
Le Groupe de travail pour l'archéologie du fer dans le Jura. Actes de la société jurassienne d'émulation 97, 185–193.
- Eschenlohr, L. 1997*
Traité d'Union Alsace-Jura. Bas fourneaux et meules: production artisanale de fer et de charbon de bois. Programme d'expérimentation archéologique en 1996 et 1997. Polycopié couleur.
- Eschenlohr, L. 2001*
Recherches archéologiques sur le district sidérurgique du Jura central suisse. Cahier d'Archéologie Romande 88, Lausanne.
- Espelund, A. 1991 (éd.)*
Ole Evenstad: Praktische Abhandlung von den Eisensteinen, welche sind in Norwegen in Sümpfen und Morästen Finden, und über die Methode solche in Eisen und Stahl zu Verwandeln (Kobenhavn 1790-Göttingen 1881), Arketype, Trondheim.
- Ex-pots... 1995*
Ex-pots... céramiques médiévales et modernes en Franche-Comté. Catalogue d'exposition. Belfort.
- Farron, J.-P. 1987*
La forêt. In: La République et canton du Jura, 96–98. Delémont.
- Fehlmann, H., Rickenbach, E. 1962*
Die Eisenhaltigen Doggererze der Schweiz. Matériaux pour la Géologie de la Suisse, Série Géotechnique, Eisen- und Manganerze der Schweiz 13/7, Berne.
- Fleury, E. 1909*
Le Sidérolithique suisse, contribution à la connaissance des phénomènes d'altération superficielle des sédiments. Mémoires de la Société fribourgeoise des Sciences Naturelles 6, Fribourg.
- Fourcroy de Ramecourt, 1766*
L'art du chaudière. Description des arts et métiers, tome 19: Les arts des mines. Paris. Reprint Slatkine, Genève 1984.
- Frascoli, L. 1997*
Handwerker- und Kaufmannshaushalte im frühneuzeitlichen Winterthur. Monographien der Kantonsarchäologie 29. Zürich.
- Frey, J.-A. 1893*
Le reboisement du Chasseral et des Franches-Montagnes, Actes de la Société jurassienne d'émulation 1891, 69–77.
- Göll, J. 1998*
Fö e flamma – Öfen hinter dem Ofenpass. Programme d'activité.
- Glatz, R. 1991*
Hohlglasfunde der Region Biel. Zur Glasproduktion im Jura. Bern.
- Grossmann, H. 1967*
Influence des métiers et des activités industrielles sur la forêt suisse de 1600 à 1860. Actes du colloque sur la forêt, Besançon 21–22 octobre 1966. Cahiers d'études comtoises 12. Annales littéraires de l'Université de Besançon. Paris.
- Gschwend, M. 1980*
Das Kohlenbrennen. Schriften des schweizerischen Freilichtmuseum Ballenberg 5. Brienz.
- Guex, F. 1986*
Bruchstein, Kalk und Subventionen. Das zürcher Baumeisterbuch als Quelle zum Bauwesen des 16. Jahrhunderts. Mitteilungen der Antiquarischen Gesellschaft in Zürich, Band 53. Zürich.
- Guyan, W.U. 1946*
Bild und Wesen einer mittelalterlichen Eisenindustriellandschaft in Kanton Schaffhausen. Schriften des Institutes für Ur- und Frühgeschichte der Schweiz 4, Basel.
- Guyan, W. U. 1957*
Die Eisenöfen im Hofal bei Bergen (Kanton Schaffhausen) Neuere Untersuchungen zur Geschichte der Eisenverhüttung in der Schweiz. *Revue suisse d'Histoire de l'Art et d'Archéologie* 17, fasc. 3/4, 159–174.
- Hassenfratz, J.-H. 1825*
Traité théorique et pratique de l'art de calciner la pierre calcaire et de fabriquer toutes sortes de mortiers, ciments, bétons, etc. Paris.
- Hildebrand, B. 1860*
Beiträge zur Statistik des Kantons Bern. Volume I. Bern, Zürich.
- Joos, M. 1994*
Ein spätmittelalterlicher Rennofen von Lajoux/JU. *Minaria Helvetica* 14a, 53–72.
- Juleff, G. 1996*
An ancient wind-powered iron smelting technology in Sri Lanka. *Nature* 379, 60–63.
- Keller, Ch. 1999*
Gefässkeramik aus Basel. Untersuchungen zur Spätmittelalterlichen und frühneuzeitlichen Gefässkeramik aus Basel. Materialhefte zur Archäologie in Basel 15 A et B. Basel.
- Klausener, M. 1995*
Champagne, Grand-Bois – Four à chaux XVe siècle. *Chronique archéologique* 1994. *Revue historique vaudoise* 1995, 406–408.
- Knau, L., Horstmann, D. et Sönnecken, M. 1998*
La production de fonte dans la haute vallée de la Volme: Contribution à l'histoire de la sidérurgie en Westphalie occidentale. In: Beck, P. (dir.): L'innovation technique au Moyen Age, Actes du VIe congrès international d'archéologie médiévale à Dijon 1996, Paris, 152–159.
- Krähenbühl, H. 1985*
Die Gewinnung von Holzkohle zum Schmelzprozess vom Mittelalter bis in die Neuzeit. *Bergknappe* 9, 31, 13–16.
- Lejeune, E. (ca. 1900)*
Guide du chaudière, du fabricant de ciments, bétons et mortiers hydrauliques. Bibliothèque des actualités industrielles n° 9. Paris.
- Levin, E.M., Robbins, C.R., McMurdie, H.F. 1964*
Phase Diagrams for Ceramists. The American Ceramic Society.
- Magnusson, G. 1988*
Lapphyttan. In: Sperl, G. (éd.): The First Iron in the Mediterranean. Proceedings of the Populonia/Piombino Symposium 1983, PACT 21, Strasbourg, 177–198.
- Mangold, F. 1931*
Die Zement-, Kalk- und Gips-Industrie in der Schweiz. Denkschrift zum fünfzigjährigen Bestehen des Vereins Schweizerischen Zement-, Kalk- und Gips-Fabrikanten 1881–1931. Basel.
- Marchand, X. 1849*
Mémoire sur le déboisement des montagnes. 2e édition. Porrentruy.
- Marchand, X. 1852*
Mémoire sur la production et la consommation des bois dans le canton de Berne. Porrentruy.
- Mordeffroid, J.-L. 1990*
Moines et chanoines métallurgistes en Franche-Comté du Ve au XVe siècle. In: Jacob, J.-P. et Mangin, M. (dir.) De la mine à la forge en Franche-Comté, des origines au XIXe siècle. Annales littéraires de l'Université de Besançon, Série Archéologie 37, 85–151.

Motyková, M. et Pleiner, R. 1987

Die Römerzeitliche Siedlung mit Eisenhütten in Orech bei Prag, *Palmy Archeologické* 78, Praha, 371–448.

Miserez, J.-P. 1983

Le lancer du vouge. In: *Panorama du pays jurassien*. Tome III, La mémoire du peuple. Porrentruy.

Minerai, scories, fer 1997

Minerai, scories, fer. Cours d'initiation à l'étude de la métallurgie du fer ancienne et à l'identification des déchets de cette industrie. Réalisé par le Groupe de travail suisse d'archéologie du fer. Edité par l'Association suisse des techniciens de fouilles archéologiques. Collection: Techniques de fouille. Bâle.

Müller, W. 1997

Le paysage toponymique. In: Paravicini, A. et al. (dir.): *Les pays romands au Moyen Age*. Lausanne.

Nouvelle Histoire du Jura 1984

Nouvelle Histoire du Jura. Cercle d'études historiques. Porrentruy.

Paccolat, O. et Taillard, P. 2001

Une industrie plâtrière du Haut Moyen Age près de Gamsen VS. *Annuaire suisse de préhistoire et d'archéologie* 84, 2001, 87–108.

Panorama du Pays jurassien 1981

Panorama du Pays jurassien. Tome II: Des travaux et des hommes. Porrentruy.

Panorama du Pays jurassien 1983

Panorama du Pays jurassien. Tome III: La mémoire du peuple. Porrentruy.

Pelet, P.-L. 1978

Fer charbon acier dans le pays de Vaud. Volume 2: la lente victoire du haut-fourneau. *Bibliothèque historique vaudoise* 59. Lausanne.

Pelet, P.-L. 1983

Fer charbon acier dans le pays de Vaud. Volume 3: du mineur à l'horloger. *Bibliothèque historique vaudoise* 74. Lausanne.

Pelet, P.-L. 1993

Une industrie reconnue: fer charbon acier dans le Pays de Vaud. *Cahiers d'archéologie romande* 60. Lausanne.

Pfeifer, H.R., Lavanchy, J.C. et Serneels, V. 1991

Bulk Chemical Analysis of Geological and Industrial Materials by X-ray Fluorescence, Recent Developments and Application to Materials Rich in Iron Oxide. *Journal of Trace and Microprobe Techniques* 9/2-3, 127–148.

Pierrehumbert, Ph. 1942

Les gorges de Moutier et de Court. *Actes de la société jurassienne d'émulation* 46, 93–128.

Pleiner, R. 1958

Zaklady Slovanskeho Zelezarskeho Hutnictvi V Ceskych Zemich (Die Grundlagen der Slavischen Eisenindustrie in den Böhmischen Ländern), *Monumenta Archaeologica*, Praha.

Quiquerez, A. 1855

Notice historique et statistique sur les mines, les forêts et les forges de l'ancien évêché de Bâle. *Berne*.

Quiquerez, A. 1863

Voie celtique près de Moutier-Grandval. *Indicateur d'Histoire et d'Antiquités suisses* 9/2, 13–14.

Quiquerez, A. 1866

Monuments de l'ancien évêché de Bâle. De l'Age du fer. *Recherches sur les anciennes forges du Jura bernois*. Porrentruy. Reprint 1992.

Quiquerez, A. 1871

Notice sur les forges primitives dans le Jura. *Mitteilungen der Antiquarischen Gesellschaft in Zürich* 17, 4, 71–88.

Recueil de lois et ordonnances 1874

Recueil de lois et ordonnances forestières pour le Jura bernois. Porrentruy.

Reusche, E. 1977

Kalköfen für periodischen Betrieb in Südosteuropa. Restbestände einer alten Baustoffproduktion. 12. Veröffentlichung der Abteilung Architektur des Kunsthistorischen Instituts der Universität Köln. Köln.

Rieben, Ch. et Bugnon, Ch. 1998

Fouilles archéologiques à la Combe Chopin. Notice géologique. Rapport du Bureau MFR Géologie-Géotechnique, non publié.

Ritzmann-Blickenstorfer, Heiner (éd.) 1996

Historische Statistik der Schweiz – Statistique historique de la Suisse – Historical Statistics of Switzerland, Zurich.

Röber, R. 1995

Blauer Dunst aus weissen Pfeifen – Tönerne Tabakspfeifen aus Konstanz. *Archäologische Nachrichten aus Baden* 53, 28–36. Freiburg im Breisgau.

Rosenthal, P. 1990

Les ressources minières de la Franche Comté: minerais métalliques. In: *Jacob, J. P. et Mangin, M. (dir.) 1990: De la mine à la forge en Franche Comté des origines au XIXe siècle*. *Annales littéraires de l'Université de Besançon* 410, 13–48. Paris.

Schmaedecke, M. (éd.) 1999

Tonpfeifen in der Schweiz. Beiträge zum Kolloquium über Tabakspfeifen aus Ton in Liestal am 26. März 1998. *Archäologie und Museum Heft* 40. Liestal.

Schwab, F. 1934

300 Jahre Drahtindustrie. Festschrift zum dreihundertjährigen Bestehen des Werkes Bözingen der Vereinigten Drahtwerke A.G. Biel 1634–1934. Solothurn.

Serneels, V. 1992

La sidérurgie ancienne en Suisse, histoire d'une recherche. *Minaria Helvetica* 12a, 3–10.

Serneels, V. 1993

Archéométrie des scories de fer. *Recherches sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale*. *Cahier d'Archéologie Romande* 61. Lausanne.

Serneels, V. 1993a

Le Sidérolithique suisse, *Minaria Helvetica* 13b, 74–83.

Serneels, V. 1999

La chaîne opératoire de la sidérurgie ancienne. In: *Feugère, M. et Serneels, V. (dir.): Recherches sur l'économie du fer en Méditerranée nord-occidentale*. *Monographie Instrumentum* 4. Montagnac.

Serneels, V. à paraître 1

Apport des analyses chimiques à l'étude des vestiges sidérurgiques. In: *6è curs d'arqueologia, L'obtencio del ferro pel procediment directe*, Andorra 2000.

Serneels, V. à paraître 2 (2002)

Analyses chimiques des matières premières et des produits de l'opération de réduction dans le four basque de Agorregi. In: *La ferreria y los molinos de Agoreggi, Aia, Gipuskoa*. *Arqueologia experimental*, coll. *Arkeologia* 3, Diputacion Floral de Gipuskoa, Donostia - San Sebastian.

Serneels, V. et Mangin, M. 1996

Sidérurgie ancienne (Age du Fer – Moyen Age): les zones productives principales entre le Rhin, les Alpes et les Pyrénées. *Revue Archéologique de l'Est* 47, 193–198.

Sidérurgie (La) ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen 1994

Sidérurgie (La) ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen. *Archéologie et archéométrie*. Actes du Colloque de Besançon, 10–13 novembre 1993. Publiés par M. Mangin. *Annales littéraires de l'Université de Besançon* 536. Paris.

Siegwart, L. 1925

Über die Kohlenbrennerei im Napfgebiet. Ein Beitrag zur Heimatkunde. Tiré à part des Archives suisses des traditions populaires XXVI/ 2.

Soom, M. 1985

Kalkbrennöfen in Aussenberg und ein Harz-Schmelzofen bei Finnu (Lötschberg - Südrampe VS). *Minaria Helvetica* 5, 48–59.

Steiner, M. 1979

Découverte d'une industrie sidérurgique de type archaïque à Lajoux (Suisse, canton du Jura). *Comptes rendus du 104e Congrès national des sociétés savantes, Fascicule V*, 179–186. Bordeaux.

Steiner, M. 1985

La sidérurgie jurassienne aux XVIe et XVIIe siècle: une volonté politique et une réalité économique. *Actes de la société jurassienne d'émulation* 88, 107–123.

Suméra, Fr. 1997

Les fours à chaux gallo-romains de «Brétinoust», commune de Sivry-Courtry (Seine-et-Marne). *Revue archéologique du Centre de la France* 36, 99–130.

Tauber, J. 1998: Langenbruck BL, Dürstel. Fundbericht 1997, Annuaire de la Société Suisse de Préhistoire et Archéologie 81, 316–317.

Trésors archéologiques au fil de la Transjurane. Moutier, 2000.

Vital, A. 1984

Die Gewinnung von Kalk für Bauzwecke und alte Kalköfen in Graubünden. *Bergknappe* 28, 2, 16–20.

Vital, A. 1984

Die Gewinnung von Kalk für Bauzwecke und alte Kalköfen in Graubünden. *Schluss. Bergknappe* 29, 3, 11–12.

Williams, R. 1989

Limekilns and limeburning. *Shire Album* 236. Aylesbury UK.

Résumé

La fabrication de la chaux et du charbon de bois, la réduction du minerai de fer et le travail du fer comptent parmi les activités traditionnelles du Pays jurassien jusqu'à une période relativement récente. Grâce aux prospections archéologiques l'inventaire de ces sites de production s'est bien améliorée, mais rares sont les sites qui ont fait l'objet de fouille ou d'étude historique. Toutefois, les travaux de Ludwig Eschenlohr permettent aujourd'hui de mieux appréhender la progression de l'activité sidérurgique au cours du Moyen Âge.

Depuis 1995, de nombreux vestiges de fours à chaux, des charbonnières et un bas fourneau ont été mis au jour le long du tracé autoroutier de l'A16, au gré des campagnes de prospection pédestre et de sondages mécaniques. Même si parfois les interventions restaient limitées ou très ciblées, l'opportunité devait être saisie de redécouvrir ce patrimoine enfoui.

Ainsi, un important ensemble de neuf fours à chaux datés du XVII^e au XIX^e siècle a été repéré et en grande partie fouillé à Moutier en 1997. D'autres chauffours ont été dégagés au nord de Roches et à Court entre 1995 et 1998; le site de Roches a en outre livré les restes d'un bas fourneau à fer médiéval et de trois charbonnières des XVII^e et XIX^e siècles.

La multiplication des relevés et des études des fours à chaux permet aujourd'hui d'appréhender un peu mieux l'architecture et le fonctionnement de ces installations rudimentaires qui servaient à la cuisson du calcaire. Ainsi deux variantes peuvent être provisoirement définies pour la région jurassienne:

1. les fours intermittents de surface: caractérisés par une chambre de chauffe circulaire à fond concave faiblement excavé, une voûte reposant sur une sorte de banquettes et une chambre de calcination très développée au-dessus du sol, maintenue par un boisage. Ces fours sont en général complétés par une aire de chauffe creusée dans le terrain encaissant.
2. les fours intermittents semi-enterrés: constitués d'une chambre de chauffe à fond plat, délimitée par une maçonnerie à sec et surmontée d'une voûte prenant appui sur le fond du four. La chambre de calcination est assez développée, mais partiellement enterrée. Ces fours ne possèdent pas de fosse de travail.

Les utilisations de la chaux sont variées: hydratée et mêlée à un agrégat (sable, gravier, paille), elle sert de liant dans

la confection de mortiers, crépis et enduits. Sa causticité en fait un produit apprécié dans la désinfection des étables et écuries. En tannerie, elle sert également à débarrasser les peaux des restes de chairs et de poils.

Cette étude est principalement consacrée aux sites de Moutier et Roches. Au sud de Moutier, dans une petite combe à la topographie mouvementée marquée par de nombreux éboulis, un vaste ensemble de neuf chauffours a été découvert. L'abondance de la pierre calcaire et du bois expliquent à eux seuls l'implantation de fours à chaux dans ce secteur. Six fours ont fait l'objet d'une fouille, alors que trois ont pu être préservés. Leur diamètre varie entre 260 et 460 cm environ, pour une hauteur conservée de 50 à 220 cm. Un four, datant probablement du XVIII^e siècle, offre un exemple remarquable de maçonnerie circulaire montée à sec, conservée sur plus de 200 cm. Outre quelques fosses de travail, les fouilles ont permis de mettre en évidence dans trois cas l'emplacement et la forme du manteau argileux isolant recouvrant la charge calcaire. Certains fours ont servi à plusieurs reprises. Le volume de chaux vive produit dépend de la taille de l'installation et oscille entre 10 et 25 m³. La chaux produite était extraite du four, puis transportée dans un local de stockage sec, situé peut-être au village. Elle y était certainement hydratée et stockée dans de grandes fosses étanches.

Le site de Roches est localisé dans la Combe Chopin qui se développe entre deux ondulations de l'anticlinal du Raimieux. Par sa situation topographique et sa morphologie, le site rappelle celui de Moutier. Toutefois, du strict point de vue archéologique, la fouille a révélé une variété de structures chronologiquement distinctes: bas fourneau à fer, charbonnières, fours à chaux et tronçon de route. Daté vers 1200 (céramique et ¹⁴C), le bas fourneau mis au jour appartient probablement à la catégorie des fourneaux dits à ventilation naturelle (absence d'éléments de soufflerie) déjà décrite au XIX^e siècle par Auguste Quiquerez.

Le four de Roches est constitué d'un épais manteau maçonné circulaire de 220 cm de diamètre extérieur; l'élévation résiduelle atteint 50 cm environ. La base de la cuve ainsi que la porte apparaissent conservées. Sa construction massive rappelle les fours mérovingiens du Jura. Les scories de Roches, d'aspect vitreux et de couleur noire, sont nettement moins riches en fer que celles produites dans les fours plus anciens. Les projections quantitatives montrent donc un meilleur rendement de l'installation. Un amas de scories de 20 m³ dispersé sur une centaine de mètres carrés s'étend en aval du fourneau. A proximité immédiate du

four, un grand foyer circulaire aménagé avec soin dans l'amas de scories reste d'une interprétation difficile. Sa relation avec l'activité sidérurgique n'est pas assurée. Les analyses minéralogiques et chimiques des scories entreprises par Vincent Serneels indiquent que ce sont les pisolithes ferrugineux du Sidérolithique qui ont été utilisés comme minerai de fer. L'absence d'affleurement de minerai de fer dans la Combe Chopin implique son transport sur le lieu de production, probablement depuis les gisements de la vallée de Delémont. Malgré une production de fer réduite le bas fourneau de Roches constitue un jalon important et bien daté dans l'évolution technique de la sidérurgie jurassienne.

Des quatre charbonnières repérées, deux datent probablement du XVII^e siècle, alors que deux autres remonteraient au XIX^e siècle seulement. Des documents d'archives révèlent que la Combe Chopin comptait parmi les sites de charbonnage actifs dès le XVII^e siècle; le charbon était livré aux haut fourneau et forges de Courrendlin.

Les trois fours à chaux fouillés à Roches mesurent entre 230 et 380 cm de diamètre; les deux variantes décrites à Moutier sont représentées. Dans un cas, on a pu mettre en évidence les restes carbonisés de poteaux (échafaudage nécessaire à la construction de la voûte ou cheminée de ventilation?). Les datations radiocarbone situent les trois fours au XIX^e siècle.

Enfin, un tronçon de l'ancienne route des gorges de Moutier a fait l'objet d'une fouille systématique. Ce chemin dont la largeur maximale atteint 340 cm révèle plusieurs recharges qui signalent un entretien régulier, particulièrement dans les ultimes phases. Le premier état, le plus an-

cieu, présente un revêtement graveleux sur lequel apparaissent des ornières plus ou moins marquées distantes de 110 et 135 cm environ. Ces deux écartements interaxiaux se rapportent sans doute à deux types de chars: modèles à un et deux essieux. Les maigres indices à disposition indiquent que ce chemin devait pour le moins exister au Moyen Age, et fut abandonné vers 1825 au profit d'une chaussée rapide et confortable.

Fours à chaux, bas fourneaux, charbonnières ont en commun l'utilisation du bois comme combustible, que ce soit sous forme de bois sec, de charbon ou de matériau à transformer. Ces installations s'établissent de préférence à proximité du combustible, donc de la forêt. Dans le cas des fours à chaux, la proximité combinée des pierres calcaires et du bois constitue un facteur économique décisif. Quant à la production du fer des bas fourneaux, l'élément déterminant demeure le facteur combustible; il n'est pas rare de mener le minerai sur le site de production: Roches en est une illustration probante. L'introduction du haut fourneau provoquera une demande accrue de charbon de bois local, qui sera alors véhiculé vers le site de production. La verrerie artisanale, puis industrielle, se développe peu à peu dans la région de Court dès 1657, puis Roches 1797 et Moutier 1841. Toutes ces activités de transformation requièrent une seule et même source d'énergie: le bois. La forêt souffre de cette pression croissante qui mène à un déboisement grave des montagnes et vallées jurassiennes, au point que de nombreuses mesures de protection environnementale et de gestion forestière seront édictées à partir du XVIII^e siècle avec plus ou moins de réussite.

Zusammenfassung

Kalkbrennen, Köhlerei, Eisenverhüttung und Eisenbearbeitung gehörten bis vor kurzem noch zu den traditionellen Tätigkeiten in der Juralandschaft. Dank archäologischer Prospektion hat sich die Zahl der bekannten Produktionsstellen stark vermehrt, auch wenn die Fundstellen, die archäologisch und historisch erforscht werden können, selten bleiben. Trotzdem ermöglichen die Arbeiten von Ludwig Eschenlohr über die Eisenverhüttung heute ein besseres Verständnis der Entwicklung der jurasischen Eisenproduktion im Mittelalter.

Seit 1995 wurden im Zuge von Feldbegehungen und mechanischen Sondagen entlang des Trasses der A16 mehrere Kalkbrennöfen, Köhlermeiler und ein Eisenverhüttungssofen entdeckt. Auch wenn die Untersuchungen sich manchmal auf kleine Flächen beschränken mussten, wurde jede Gelegenheit ergriffen, die Relikte dieser einstigen Aktivitäten, auch wenn sie relativ jung scheinen, zu dokumentieren.

Ein besonders wichtiges Ensemble von neun Kalkbrennöfen aus dem 17. bis 19. Jahrhundert wurde 1997 in Moutier entdeckt und ausgegraben. Weitere Anlagen wurden in Roches und Court 1995 und 1998 untersucht. Die Fundstelle Roches lieferte noch weitere Befunde, so ein mittelalterlicher Rennofen und drei Köhlerplätze, die bis ins 19. Jahrhundert betrieben wurden.

Diese Untersuchungen und Analysen erlauben heute ein besseres Bild des Aufbaus und Betriebs dieser einfachen Kalkbrennanlagen. Beim heutigen Forschungsstand können für die Juraregion zwei Ofenvarianten unterschieden werden:

1. Die ebenerdigen periodischen Öfen. Charakteristisch sind eine runde, wenig engetiefte Feuerkammer mit konkaver Sohle und massivem Gewölbe, das auf einer Art Bank ruht, und eine hoch über dem Boden gelegene Kalkkammer, die meist durch ein Holzgerüst stabilisiert ist. Diese Öfen besitzen an ihrer Aussenseite meistens eine in den Boden eingetiefte Arbeitsgrube.
2. Die halb eingetieften periodischen Öfen. Charakteristisch für diese sind eine flache, durch Trockenmauerwerk eingegrenzte Feuerkammer und ein auf dem Ofengrund abgestütztes Gewölbe. Die Kalkkammer lag relativ hoch, war aber teilweise eingegraben. Diese Öfen besitzen anscheinend keine Arbeitsgrube.

Kalk wurde für die unterschiedlichsten Zwecke gebraucht: Gelöschter Kalk wirkt als Bindemittel; gemischt mit Sand, Kies oder Stroh dient er der Aufbereitung von Mörtel, Verputzen und Aufstrichen. Wegen seiner ätzenden Wirkung wird er auch beim Desinfizieren von Ställen gebraucht und in der Gerberei dient er zum Entfernen der Haare und Fleischreste auf den Lederhäuten.

Die vorliegende Studie ist vorwiegend den beiden Fundstellen Moutier und Roches gewidmet.

Südlich von Moutier wurde in einem von Hangrutschungen modellierten Seitentälchen ein bedeutender Komplex von neun Kalkbrennöfen entdeckt. Bereits die grossen Kalksteinschutthalde und die ausgedehnten Hangwälder erklären, warum hier Kalk gebrannt wurde. Sechs Öfen wurden ausgegraben, drei konnten ausserdem erhalten werden. Ihre Durchmesser betragen zwischen 260 und 460 cm, ihre erhaltenen Höhen zwischen 50 und 220 cm. Ein wahrscheinlich ins 18. Jahrhundert reichender Ofen weist ein aussergewöhnliches Beispiel von rundem Trockenmauerwerk auf, das über 200 cm hoch erhalten blieb. Ausser einzelnen Bedienungsrinnen konnten die archäologischen Untersuchungen in drei Fällen die genaue Lage und Form des Isoliermantels dokumentieren.

Einige der Öfen wurden wahrscheinlich mehrmals gebraucht. Jeder Brennvorgang ergab je nach Ofengrösse zwischen 10 und 25 m³ gebrannten Kalk. Nach dem Kalzinieren musste der Ofen zuerst abkühlen, bevor man den gebrannten Kalk bergen konnte. Dann wurde er in ein trockenes Lager gebracht, vermutlich ins Dorf, und anschliessend in grossen, dichten Gruben eingesumpft und gelagert.

Die Fundstelle Roches liegt ebenfalls in einem Seitentälchen – die Combe Chopin – zwischen zwei wulstförmigen Kreten des Antiklinalen Raimeux. Seine topographische Lage erinnert stark an die der Fundstelle Moutier. Im Gegensatz zu dieser hat die Grabung Roches aber verschiedene Strukturen unterschiedlicher Epochen zu Tage gebracht: einen mittelalterlichen Eisenverhüttungssofen (Rennofen), frühneuzeitliche Köhlerplätze, neuzeitliche Kalkbrennöfen und einen schwierig zu datierenden Abschnitt einer Strasse.

Der in die Zeit um 1200 datierte Rennofen gehört höchstwahrscheinlich zu den Anlagen mit natürlichem Luftdurchzug, wie sie bereits im 19. Jahrhundert vom jurasischen Forscher Auguste Quiquerez beschrieben wurden.

Der Ofen besteht aus einem runden massiven Kalksteinmantel von 220 cm Durchmesser; die erhaltene Höhe beträgt ca. 50 cm. Der untere Bereich des Schachtes und die Öffnung sind erhalten. Eine 20 m³ grosse Schlackenhalde dehnt sich hangabwärts des Ofens auf einer Fläche von rund 100m². Unmittelbar neben dem Rennofen wurde in der Schlackenhalde eine grosse, runde sorgfältig gebaute Feuerstelle freigelegt; ihre Funktion bleibt unklar und die Beziehung zum Eisenverhüttungsplatz ist nicht gesichert. Die durch Vincent Serneels durchgeführten mineralogischen und chemischen Schlackenanalysen zeigen, dass Bohnerz verhüttet wurde. Interessanterweise gibt es aber keinen Nachweis für dieses Erz in der Combe Chopin. Es stellt sich die Frage, ob es zum Holzrohstoff herbeigeführt wurde. Trotz einer reduzierten Eisenproduktion ist der Rennofen von Roches ein neuer, gut datierter Fixpunkt in der Entwicklung der jurassischen mittelalterlichen Eisenverhüttungstechnologie.

Weiter wurden vier Köhlerplätze lokalisiert: zwei datieren aus dem 17. Jahrhundert, die beiden anderen sind noch jünger. Archivalien belegen, dass die Combe Chopin ab dem 17. Jahrhundert zu den aktiven Köhlerplätzen zählte; die Holzkohle wurde zum Hochofen und Schmieden von Courrendlin geführt.

Die drei ausgegrabenen Kalköfen von Roches haben Durchmesser zwischen 230 bis 380 cm; beide beschriebenen Ofenvarianten sind vertreten. In einem Fall hat man sogar fünf verkohlte Pfostenreste freigelegt, die entweder zum Aufbau des Gewölbe dienten oder wahrscheinlicher als Zugkammine zu interpretieren sind. Die ¹⁴C-Datierungen erbrachten eine Situierung der drei Öfen ins 19. Jahrhundert.

In der Combe Chopin wurde auch ein Abschnitt der alten Strasse durch die Moutierschlucht archäologisch untersucht. Der Weg hat eine maximale Breite von 340 cm und wurde regelmässig mit feinem Kies aufplaniert, insbesondere während den letzten Phasen.

Die älteste Phase zeigt eine sehr feste kiesige Strassenoberfläche mit diversen Fahrillen, die durch Abnutzung entstanden sind. Die Rillen sind unregelmässig, es konnten aber Zwischenradabstände von ca. 110 und 135 cm gemessen werden. Diese Radabstände können zwei unterschiedlichen Karrentypen zugewiesen werden: das kleine Mass für einachsige Fuhrwagen, das andere für zweiachsige Gespanne. Die wenigen verfügbaren chronologischen Indizes weisen darauf hin, dass diese Strasse zumindest bis ins Mittelalter reicht und um 1825 zugunsten einer schnelleren und komfortableren Chaussée aufgegeben wurde.

Kalk- und Eisenverhüttungsöfen wie Köhlermeiler benötigen den gleichem Rohstoff: Holz in trockener oder verkohlter Form. Diese Anlagen wurden deshalb vorzugsweise nahe dem Brennstoff, d.h. im Walde errichtet. Im Fall der Kalkbrennöfen ist die kombinierte Nähe von Holz und Gesteinmaterial ein entscheidender wirtschaftlicher Faktor.

Bei der Eisenproduktion in Rennöfen war offensichtlich Holzkohle der entscheidende Faktor, der wahrscheinlich am Ort produziert wurde. Wie der Fall Roches zeigt, konnte das eisenhaltige Erzmaterial hingegen von relativ weit zugeführt werden. Später änderte das: Mit der Einführung des Hochofens wurde die Nachfrage nach Holzkohle so gross, dass der Brennstoff aus weiterer entfernten Gegenden zur Produktionsstelle transportiert wurde.

Zuletzt ist noch die handwerkliche und später industrielle Glasherstellung zu nennen: Sie entwickelte sich seit 1657 in der Region Court, 1797 in Roches und zuletzt noch 1841 in Moutier. All diese handwerklichen und industriellen Tätigkeiten hingen vom selben Kraftstoff ab, vom Holz. Der Wald litt unter diesem konstantem Druck, der zu einer schwerwiegenden Waldrodung der jurassischen Bergflanken und Täler führte. Das führte seit dem 18. Jahrhundert zu ersten, mehr oder weniger erfolgreichen Waldschutzmassnahmen.

Christophe Gerber und Armand Baeriswyl ADB

Summary

Lime burning, charcoal burning, iron smelting and iron working were among the most important traditional industries of the Jura region until relatively recent times. Although archaeological prospecting has considerably increased our knowledge of these production sites, very few of them have been excavated and very little historical research has been carried out into their operation. However, the works of Ludwig Eschenlohr have now given a broader insight into the development of iron working activities in this area during the Middle Ages.

Since 1995 archaeological reconnaissance along the route of the future A16 highway, has unearthed numerous remains of limekilns and a bloomery furnace. Although the investigations were at times constrained or specifically targeted, the opportunity to rediscover this buried heritage was not to be missed.

A significant grouping of nine limekilns, dating from the 17th to 19th centuries, was discovered at Moutier and these were largely excavated in 1997. Other limekilns were unearthed between 1995 and 1998 to the north of Roches and at Court; the Roches site also revealed the remains of a mediaeval low shaft furnace, as well as three charcoal kilns from the 17th and 19th centuries.

The increasing number of studies on limekilns, and associated research on the subject, now provide a somewhat clearer understanding of the architecture and functioning of these primitive installations, which were used for calcining limestone. Two types have provisionally been identified in the Jura region:

1. Intermittent or periodic kilns, constructed at ground level, which were characterised by a circular fire cavity with a shallowly excavated, concave floor, arched vault built on a bench-like structure and calcination chamber extending well above the ground, supported by a timber frame. In general, these kilns also have a work area dug in the surrounding ground.
2. Intermittent or periodic kilns, set into the ground, which consisted of a flat-bottomed fire cavity lined with dry stones and surmounted by an arched vault rising from the floor of the kiln. The calcination chamber extends well above the ground, but is partly buried. These kilns do not have a working pit.

Lime has a variety of uses – slaked and mixed with a binding agent (sand, gravel or straw), it serves as a bonding ma-

terial in the production of mortars, roughcast, and coatings. Its causticity makes it ideal for disinfecting stables and cowsheds, and it has long been used in tanning to eliminate the remains of flesh and fur from the skins.

This study is primarily concerned with the sites at Moutier and Roches. To the south of Moutier lies a small valley or coomb whose undulating terrain is dotted with numerous screes. Here, a large grouping of nine limekilns was discovered, built, no doubt, because of the proximity of an abundant source of limestone and wood in the area. Six of the kilns were excavated, while three of them were conserved. Their diameter varies between around 260 cm and 460 cm, with conserved elements standing to height of between 50 cm and 220 cm. One kiln, probably dating from the 18th century, is a remarkable example of circular dry masonry, and stands to a height of over 200 cm. In three cases, in addition to the discovery of several working pits, the excavations revealed the location and form of the insulating clay encasing the lime charge. Some of the kilns were used several times. The amount of quicklime produced depended on the size of the installation, and varied between 10 and 25 cubic meters per batch. Once calcinated, the lime was extracted from the kiln and transported to a dry storage centre, possibly located in the village. It was certainly slaked or hydrated there, and stocked in large waterproof pits.

The Roches site is located at «Combe Chopin», a coomb which developed between two folds of the Raimeux anticline. The topographical situation and morphology of the site resemble that of Moutier. However, from a strictly archaeological point of view, the excavations revealed a variety of structures that were chronologically distinct: an iron bloomery furnace, charcoal kilns, limekilns, and a stretch of road. The bloomery furnace that was discovered obtained a ceramic and Carbon-14 dating of circa 1200. It probably belonged to the category of so-called natural draught kilns (absence of blower elements), described back in the 19th century by Auguste Quiquerez. The kiln of Roches has a thick circular stonework wall with an external diameter of 220 cm. The residual elevation is about 50 cm. The base of the shaft and front opening appear to have been conserved. Its solid construction resembles the Merovingian furnaces of the Jura.

The slags from Roches have a vitreous aspect and a black color. They are far less iron-rich than that produced by older furnaces. The quantitative projections indicate a quite better yield of the process. A 20 cubic meter

slagheap, scattered on a surface of some 100 square metres, extends down from the furnace. A large circular hearth, carefully constructed in the slagheap immediately next to the furnace, is difficult to interpret. It has no direct connection with metallurgical activities. The mineralogical and chemical analyses of the slag, carried out by Vincent Serneels, indicate that the iron-rich pisoliths of the Siderolithic formation were used as iron ore. The absence of any outcrop of iron ore in the Combe Chopin suggests that it was transported to the production site, probably from the deposits of the Delémont Valley. Despite its poor iron output, the bloomery furnace at Roches stands as an important and well-dated technical reference in the development of Jura iron working.

Of the four charcoal kilns discovered, two are estimated to date back to the 17th century, while the other two are of more recent origin, probably from the 19th century. Archived documentary sources reveal that the Combe Chopin was an active charcoal producing site in the 17th century and that its charcoal output was delivered to the blast furnace and forges of Courrendlin.

The three limekilns excavated at Roches measure between 230 cm and 380 cm in diameter. They included the two types of kiln described above for Moutier. In one case, we were able to unearth the burned remains of poles (possibly from scaffolding needed for the construction of the arch or draught stack). The radiocarbon datings situate the three furnaces in the 19th century.

Finally, a stretch of the old road through the Moutier gorges was intensively excavated. This road, which was 340 cm at its widest point, revealed several surfacings, which would suggest that it was maintained regularly, especially towards the end of its active life. The initial and

oldest surfacing was gravelly and contained two rows of ruts, one about 110 cm and the other about 135 cm apart, which were distinguishable to a greater or lesser degree. The presence of two inter-axial distances suggests the use of two types of carts, one with a single and the other with a double set of wheels. The meagre evidence available would suggest that this road had to have existed in the Middle Ages at least, and that around 1825 it was abandoned for a faster and more comfortable road.

Limekilns, bloomery furnaces, and charcoal kilns all have one thing in common - the use of wood as fuel, whether in the form of dry wood, charcoal, or some convertible material. These installations would preferably be situated close to their fuel source, i.e. the forest. In the case of limekilns, the proximity of both limestone and wood would have been a decisive economic factor. As for the production of iron in bloomery furnaces, the fuel factor was definitely the determining element. It was not unusual for the iron ore to be transported to the production site, Roches being a good example of this. The introduction of the blast furnace was to greatly stimulate the demand for local charcoal, which would then have been transported to the production site. The craft and then industrial glass industry developed gradually in the Court region from 1657 onward, then at Roches from 1797 and at Moutier from 1841. All these conversion activities required one and the same source of energy - wood. As the stripping of timber grew, the forest suffered irreparable damage and there was serious deforestation in the mountains and valleys of the Jura. It reached the point where, from the 18th century onward, several measures aimed at environmental protection and forest husbandry were decreed, with varying degrees of success.

Clare Keller

Crédit iconographique

- Fig. 1: Service archéologique du canton de Berne (SAB); ajouts SAB.
Fig. 2, 3: Données cartographiques PK100, © Office fédéral de la topographie, Wabern. Ajouts: SAB.
Fig. 4, 10, 42, 56, 68: Bibliothèque nationale suisse, Berne.
Fig. 5: Berthelot 1885, t. 10, 588.
Fig. 6: Office du patrimoine historique, section archéologie, François Schifferdecker.
Fig. 7, 93 a–d, 94, 96, 99: Vincent Serneels, Institut de Minéralogie, Université de Fribourg.
Fig. 8: Minerai, scories, fer 1997, pl. 21.
Fig. 9, 16, 17, 20–36, 39 c–e, 40, 43, 55, 60, 62–64, 66, 69, 72–75, 77, 78, 80, 84, 86, 87–91, 95: Christian Kündig, SAB.
Fig. 11, 44: Données cartographiques PK25, © Office fédéral de la topographie, Wabern. Ajouts: SAB
Fig. 12, 14, 92 a–g, 93 e–h: Badri Redha, SAB.
Fig. 13, 46: Bureau technique J.-D. Waelti, Moutier. Ajouts: Christian Kündig, SAB.
Fig. 15, 18, 19, 45, 70, 71, 76, 83, 85: Martin Portmann, SAB.
Fig. 37, 39 a,b,f, 61: Christophe Gerber, SAB.
Fig. 38: Urs Liechti, SAB.
Fig. 41: Eliane Schranz, SAB, d'après Hassenfratz 1825, pl. 1.
Fig. 47–54, 57–59: Daniel Kissling, SAB
Fig. 65, 67: Archives de l'Etat de Berne, Berne.
Fig. 79: Pierre Eichenberger, SAB
Fig. 81: Pelet 1993, fig. 98 et 99.
Fig. 82: Quiquerez 1866, pl. III.
Fig. 92 h: Ph. Andrieux, Laboratoire Départemental d'Archéologie du Val de Marne.
Fig. 97: S. Wolf d'après Rosenthal 1990, fig. 4.
Fig. 98: S. Wolf.
Fig. 100: Eliane Schranz, SAB.



