Zeitschrift: Actes de la Société jurassienne d'émulation

Herausgeber: Société jurassienne d'émulation

Band: 115 (2012)

Artikel: L'ancienne industrie du fer dans le Jura : des ateliers du Haut Moyen Age : approche complémentaire aux études de Boécourt-Les Bouilles, Develier-Courtételle, Chevenez-Lai Coiratte et Courtedoux-Creugenat

Autor: Eschenlohr, Ludwig / Senn, Marianne

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-550027

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 25.11.2025

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

Approche complémentaire aux études de
Boécourt-Les Boulies, Develier-Courtételle,
Chevenez-Lai Coiratte et Courtedoux-Creugenat

L'ancienne industrie du fer dans le Jura : des ateliers du Haut Moyen Age

Ludwig Eschenlohr et Marianne Senn

In memoriam Paul-Louis Pelet
(1920 – 2009)

Cet article synthétique publie des données encore inédites au sujet de quatre sites jurassiens majeurs, tous datés du Haut Moyen Age et qui ont livré des vestiges sidérurgiques remarquables. Il s'agit d'un atelier de réduction du minerai de fer (Boécourt-Les Boulies), de deux hameaux avec forges (Develier-Courtételle et Courtedoux-Creugenat), ainsi que d'un atelier où la réduction de minerai et le forgeage sont attestés (Chevenez-Lai Coiratte). Ces nouveaux résultats sont issus de l'étude métallographique et chimique complémentaire de déchets et de produits, ainsi que du calcul systématique de la densité des scories. Ils ont permis de mieux définir les principaux types d'acier ou de fer employés dans le district sidérurgique altomédiéval et d'identifier les techniques de forgeage et les produits caractéristiques fabriqués sur place.

1. Introduction

1.1 Contexte archéologique

Cet article synthétique a pour objectif de publier des données encore inédites au sujet de quatre sites jurassiens majeurs, tous datés du Haut Moyen Age et qui ont livré des vestiges d'activités sidérurgiques[1]. Il complète par là même les études déjà parues ou menées à bien. Il s'agit de l'atelier de réduction de Boécourt-Les Boulies (fouilles 1989; Eschenlohr, L./Serneels, V. 1991, ci-après CAJ 3), des hameaux de Develier-Courtételle (1993-1996; Eschenlohr, L. et al. 2007; CAJ 14) et de Courtedoux-Creugenat (2000-2002; Deslex, C. et al. sous presse; CAJ 33) où des forges ont fonctionné, et de l'atelier sidérurgique de Chevenez-Lai Coiratte (2001-2002; Evéquoz, E. et al. 2012; CAJ 27[2]), où la réduction et le forgeage sont attestés. Ces sites ont été fouillés depuis 1989 dans le cadre de la construction de l'autoroute A16 Transjurane (fig. 1).

La situation géographique des quatre sites (deux dans la vallée de Delémont, deux en Ajoie), leur fonction similaire dans la chaîne opératoire de la sidérurgie (atelier productif et lieux de transformation dans les deux régions) ainsi que leur relative contemporanéité (fig. 2) permettent des comparaisons sur plusieurs plans.

Pour mieux comprendre les techniques de travail et leur portée économique, nous avons analysé de manière systématique la qualité du fer produit et des objets qui en découlent. Cette étude décrit aussi de façon succincte certains types de déchets scorifiés et fournit des données morphotypologiques et métriques complémentaires (poids et densités) pour les scories en forme de calotte (appelées par la suite calottes) et, dans une moindre mesure, pour les scories coulées de réduction.

L'étude se fonde sur des connaissances acquises au cours des vingt dernières années grâce à l'enregistrement complet des déchets de production et de transformation du fer. Ces connaissances ont permis de mettre en évidence l'importance européenne du district sidérurgique médiéval du Jura en ce qui concerne la méthode directe de la réduction du minerai de fer et la phase transitoire de la méthode directe vers celle appelée indirecte (Eschenlohr, L. 2001, ci-après CAR 88).

Les nouveaux aspects présentés ici concernent les quatre ateliers. Ils englobent la caractérisation de l'acier produit à Boécourt; la comparaison du type de métal d'origine locale défini à Develier-Courtételle (nommé dorénavant «type DEV-CTT») avec les types des trois autres sites, à l'aide de la composition chimique de la scorie incluse dans le métal; la

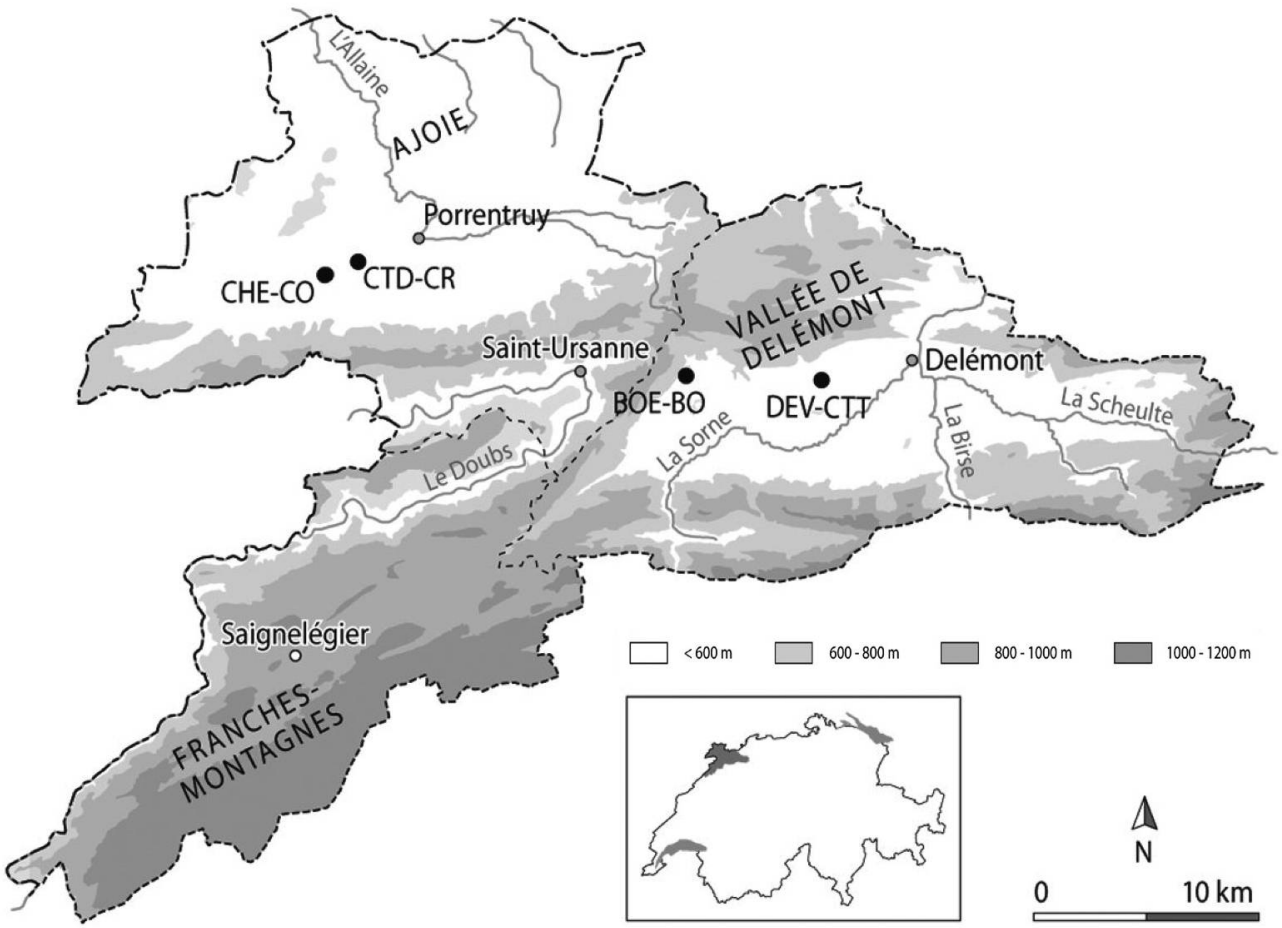

Fig. 1: Situation géographique des quatre sites majeurs liés à la sidérurgie: BOE-BO: Boécourt-Les Boulies; DEV-CTT: Develier-Courtételle; CHE-CO: Chevenez-Lai Coiratte; CTD-CR: Courtedoux-Creugenat.

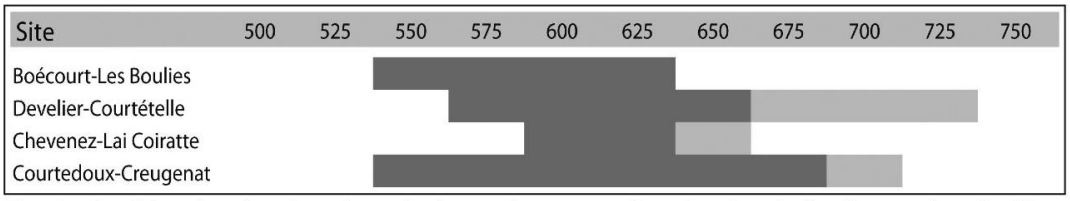

Fig. 2: Synthèse des données chronologiques des quatre sites. La date indiquée constitue le début d'une tranche de vingt-cinq années. Trame foncée: période d'activité métallurgique; trame claire: période d'activité du site.

comparaison avec quelques objets métalliques choisis découverts à Courtedoux et à Chevenez, ainsi que les bilans de masse calculés de manière identique pour les deux sites productifs, Boécourt et Chevenez. Notre approche a nécessité des analyses dont les procédés ont été exposés dans la publication du site de Develier-Courtételle (CAJ 14, annexe 1). Le lecteur trouvera également dans cet ouvrage les notions de base nécessaires à l'étude de la sidérurgie ancienne (CAJ 14, 20-28).

2. L'atelier de réduction de Boécourt-Les Boulies

2.1 Faits connus

Les recherches archéologiques de l'atelier de Boécourt-Les Boulies ont été menées en 1989 (CAJ 3). Dans le secteur minier de Boécourt, Montavon et Séprais, le minerai de fer sidérolithique a été mis à nu par l'érosion le long des versants des principaux ravins. Ce minerai est constitué de concrétions d'hydroxydes de fer (pisolithes), prises dans une matrice argileuse rouge *(bolus)*. Il est déposé à la surface karstifiée des calcaires jurassiques (Malm). Comme il est recouvert par des graviers du pliocène, il est normalement invisible en surface.

Dans le petit vallon des Boulies, un atelier sidérurgique artisanal a été découvert[3]. Il comporte deux bas fourneaux, plusieurs foyers de grillage du minerai et une zone de rejet de scories. La construction des deux fourneaux a des similitudes techniques. Ils fonctionnent à l'aide d'une ventilation artificielle, à savoir d'une double soufflerie (tuyères latérale et frontale). La tuyère frontale est encastrée dans la porte du four. Pendant la phase principale d'activité de l'atelier, les deux installations ont fonctionné, soit en alternance, soit en parallèle. Grâce aux dates obtenues par C14 et par archéomagnétisme, il est possible de dater la phase d'activité de l'atelier entre 550 et 650 ap. J.-C.

Les scories coulées résultant de la dernière opération de réduction dans le bas fourneau 2 ont été retrouvées en place dans la cuvette de travail. Cette dernière coulée se compose d'une soixantaine de pièces distinctes. L'évacuation de la scorie s'est faite au fur et à mesure de l'avancement du travail. L'aspect des coulures varie en fonction de la viscosité du liquide et de la pente de l'écoulement : celui-ci, dans certains cas, s'est effectué verticalement, attestant par là l'existence d'un seuil amovible sous la porte. Les remontages démontrent qu'une même pièce peut comporter des morphologies très différentes.

Des analyses chimiques ont eu lieu : elles permettent d'établir un bilan de masse de tous les matériaux qui participent au processus de réduction du minerai de fer, que ce soient les matériaux initiaux (minerai et paroi de four) ou les produits (fer et scorie), selon cette équation :

$$x \text{ minerai} + y \text{ paroi} = \text{scorie} + \text{métal}$$

C'est à partir de cette équation que le volume de la production de fer a été calculé, en s'appuyant sur les données provenant du dernier fonction-

nement du fourneau 2. Avec environ 5'500 kg de scories pour l'ensemble de l'atelier et quelque 40 kg pour chaque opération, le nombre d'opérations dans les deux bas fourneaux a pu être estimé entre cent vingt-cinq et cent cinquante. La production totale d'éponges de fer qui en découle est de l'ordre d'une tonne, ce qui correspond après raffinage à environ 800 à 900 kg de fer.

Plusieurs calottes ont été réutilisées comme matériaux de construction dans le bas fourneau 2. Ces scories se forment dans la cuvette d'un bas foyer; elles résultent du raffinage de l'éponge de fer ou du forgeage du fer épuré. Grâce aux analyses chimiques, on sait que les calottes de Boécourt se sont formées lors du raffinage d'éponges. Il existe également un bilan de masse pour cette étape. Ce bilan nous a servi à déterminer si la scorie de réduction a participé à la formation de la scorie en forme de calotte et dans quelle proportion[4]:

_a_ éponge de fer (dont _b_ scorie de réduction)
+ _c_ paroi de bas foyer (sablo-argileux) + _d_ charbon de bois
= scorie en forme de calotte

Comme l'éponge de fer contient des restes de scories de réduction, on retrouve des caractéristiques atténuées de la scorie de réduction dans la scorie en forme de calotte. Les analyses chimiques ont montré que les calottes de Boécourt présentent ces traits. Aucune structure du site ne peut être mise en relation avec ce travail; toutefois, la présence de ces objets laisse supposer qu'un atelier spécialisé se trouvait à proximité ou que le raffinage a eu lieu dans la cuvette encore chaude du bas fourneau.

2.2 Données nouvelles

2.2.1 Le métal produit

Jusqu'à présent, le métal produit à Boécourt était peu connu. Notre connaissance de ses caractéristiques découlait du bilan de masse de la réduction (CAJ 3, 104; voir ci-dessus). Or, si la composition chimique du minerai, de la paroi et de la scorie est identifiée, il est possible de résoudre l'équation en se basant sur la composition chimique moyenne des trois matériaux. Cette équation est résolue pour les éléments majeurs silice, alumine et fer, les autres étant inclus afin de contrôler le calcul: à noter que seuls les éléments qui peuvent se retrouver dans le métal sont retenus (fig. 3). Parmi eux, on trouve ceux qui sont fortement sidérophiles, comme le cobalt, le nickel et le cuivre, et ceux qui le sont modérément, comme le phosphore et l'arsenic (Kronz, A. 2007, 23). Kronz part du principe que les éléments chrome (Cr) et vanadium (V), qui sont

également énumérés ici, ne se déposent guère dans le métal à cause de la température relativement basse atteinte lors du processus dans le bas fourneau (entre 1050 et 1150°C). Serneels a déjà fait remarquer que le chrome et le vanadium ne peuvent être réduits dans le métal qu'à partir de températures moyennes de 1250°C, respectivement 1400°C (Serneels, V. 1993, 49). Dans le bas fourneau, ils devraient de ce fait s'enrichir dans la scorie. Par comparaison avec les teneurs de vanadium et de chrome dans le minerai et dans la paroi de fourneau, la scorie de réduction de Boécourt en contient trop peu (fig. 3). Il en résulte qu'on doit supposer, dans ce bilan de masse (colonne métal calculé sur 100 %), l'existence d'un métal riche en phosphore (P 0,3 % masse) avec des teneurs considérables en vanadium et en chrome (V 0,3 et Cr 0,2 % masse). Se pose alors la question des teneurs effectives de ces éléments dans le métal.

Elément	Minerai + Paroi de fourneau	Scorie	Métal	Métal calculé sur 100%	Analyse Eschenlohr, 2001	Type Boécourt
Fe	58.43	37.31	21.12	100	Solde	Solde
P	0.17	0.11	0.06	0.284	0.3	0.3-0.5
V	0.1815	0.1119	0.0696	0.330	0.003	0.003-0.012
As	0.0159	0.0015	0.0144	0.068	0.04	0.04-0.08
Pb	0.0132	0.0007	0.0125	0.059	n. m.	n. m.
Zn	0.0179	0.0048	0.0131	0.062	n. m.	n. m.
Cu	0.0061	0.0026	0.0035	0.017	0.03	0.014-0.03
Ni	0.0190	0.0021	0.0169	0.080	0.0.8	0.03-0.08
Cr	0.0630	0.0293	0.0337	0.160	<0.006	< LDD -0.004
Co	0.0141	84	0.0057	0.027	0.03	0.01-0.031

Fig. 3: Composition chimique théorique du métal de Boécourt (voir colonne «calculé sur 100 %»), calculée à partir du bilan de masse (CAJ 3, 104) et de la composition effective d'une éponge de fer (CAR 88, 121); n. m.: non mesuré.

L'éponge de fer de Boécourt publiée en 2001 est une pièce de référence pour appréhender les produits de la réduction du minerai de Boécourt (CAR 88, 118-122). Il s'agit d'un grand morceau d'acier (poids 780 g) qui ne montre pas de traces de traitement et contient beaucoup de porosité, d'inclusions de scorie et de charbon de bois, dont la teneur en carbone varie entre 0,2 et 0,7 % masse. La composition chimique de cette éponge de fer, basée sur la médiane de vingt analyses, affiche des correspondances remarquables avec celle calculée lors du bilan de masse, notamment pour phosphore, nickel et cobalt, alors qu'arsenic est un peu en dessous et cuivre un peu au-dessus. Seules les valeurs de vanadium et de chrome sont très différentes: dans le métal, il y a cent fois moins de vanadium qu'il serait possible théoriquement d'en trouver à partir de l'équation.

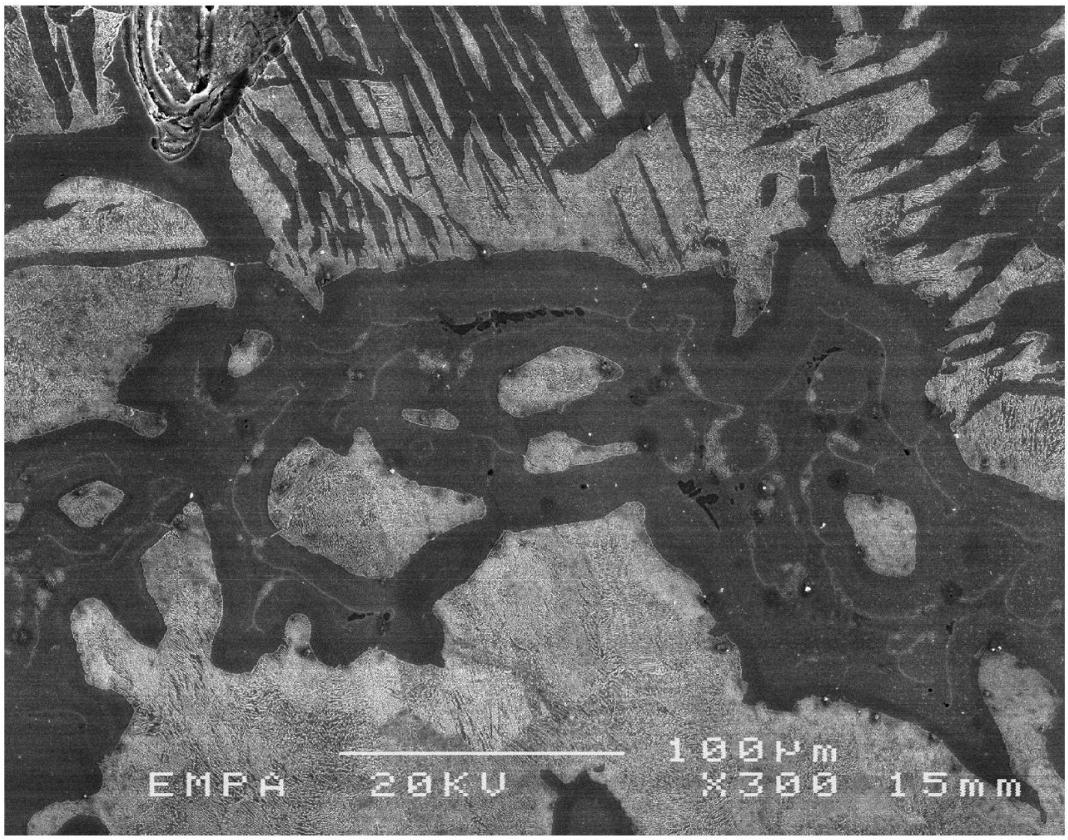

Fig. 4: Phosphures de fer (Fe_3P) dans l'éponge de fer de Boécourt (images MEB, mode SE). A gauche: concentration de Fe_3P (sombre, localement jusqu'à 15% de P), entourées de perlite lamellaire (clair) et ferrite sous forme d'aiguilles (sombre). A droite: Fe_3P (au centre, P 12-13%), entourées de perlite lamellaire.

L'étude de 2001 ne précise pas sous quelle forme le phosphore est lié au métal. Nos nouvelles analyses montrent qu'il n'est pas du tout réparti de manière régulière, mais constitue, dans l'acier hypoeutectoïde et eutectoïde, des inclusions sous forme de phosphures de fer (Fe_3P), qui se répartissent comme une toile dans le métal (fig. 4). Quelques rares zones ne sont pas touchées par ce phénomène. Ceci implique de grandes différences de dureté dans le métal, car les réseaux de phosphures de fer sont beaucoup plus durs que la ferrite et perlite ou que la perlite seule. Lors de l'analyse, ces différences dans la structure sont englobées (fig. 5). La teneur en phosphore dans l'acier hypoeutectoïde, pauvre en carbone, est de 0,4%; dans l'acier eutectoïde, elle diminue à 0,1%. Si, dans ces deux aciers, des phosphures sont présentes à certains endroits (fig. 4, à gauche et à droite), la teneur en phosphore passe au-dessus de 1%. La valeur basse de phosphore s'explique parce que la surface mesurée est au minimum de 200 µm[5]. L'hétérogénéité de cette éponge de fer est occasionnée par ces phosphures de fer, ce qui rend la pièce inappropriée à toute transformation.

Valeurs en mg/kg	C	V	Cr	Mn	P	Co	Ni	Cu	As
Médiane 1, acier C 0.2%		40	<	10	4200	300	800	300	470
Médiane 2, acier à phosphures		40	<	10	11000	300	900	300	800
Médiane 3, perlite		30	<	10	1000	300	800	200	300
MDR (%) 1		53	12	166	9	7	10	22	8
MDR (%) 2		130	5	54	32	18	23	355	23
MDR (%) 3		28	30	33	58	16	14	64	20
LDD		5	56	2	49	1	5	3	8

Fig. 5: Composition détaillée du métal dans l'éponge de fer de Boécourt. <: en dessous de la limite de détection (LDD). MDR: mesure de la dispersion relative (rapport entre l'écart-type et la moyenne). Mg/kg = 1/1 000 000 (une partie par million, en abrégé: ppm).

Afin de pouvoir définir de manière plus fiable la composition chimique du métal de Boécourt, quatre petites pièces informes, issues de la catégorie des scories riches en fer, ont été soumises à des analyses métallographiques et chimiques (LA-ICP-MS, MEB/EDS). Dans la publication du site, elles ont été appelées «scories internes rouillées» (CAJ 3, 83-84). Sur la base des investigations effectuées à l'époque, elles ont été interprétées comme des morceaux partiellement réduits, renfermant du minerai, du métal et de la scorie incluant des minéraux de fayalite et d'hercynite, ce qui est habituel dans cet atelier. Il était évident qu'il s'agissait de la seule catégorie de scorie susceptible de fournir la quantité de métal nécessaire à l'analyse.

La description morphologique montre que ces scories ont une part variable de métal. Trois pièces sont presque entièrement constituées de métal (2, 3 et 4), tandis que dans les deux autres (1 et 5), la scorie domine et le métal traverse la scorie sous forme de fils et de gouttes. L'accumulation arrondie de métal autour des grands trous de la pièce 5 est peut-être en lien avec des grandes billes de pisolithes. Le métal massif affiche des trous sans déformation et des inclusions de scories, situation typique du métal brut non travaillé. Seule la pièce 3 a la structure caractéristique des scories de Boécourt, car elle est composée d'hercynite et de fayalite dans une matrice vitreuse (fig. 6). Dans les autres pièces, la scorie contient une part vitreuse élevée avec peu de spinelles (hercynite), des lamelles inconnues, ainsi que de minuscules gouttelettes de métal.

Les analyses par MEB/EDS renseignent sur les spécificités des scories et leurs phases minérales (fig. 7). La composition chimique de la scorie vitreuse se distingue fondamentalement de celle de la scorie de réduction connue de Boécourt. La première, pauvre en fer, contient beaucoup de vanadium (teneur convertie jusqu'à 0,6% masse; en moyenne, elle est toutefois inférieure à la limite de détection de 0,5% masse) mais aucun phosphore. Les phases minérales de la scorie vitreuse ne correspondent pas à la fayalite et à l'hercynite connues dans la scorie de réduction. Même si l'on y trouve aussi de petits spinelles d'hercynite, les lamelles sont toutefois un pur oxyde d'aluminium ou un silicate d'alumine. Deux

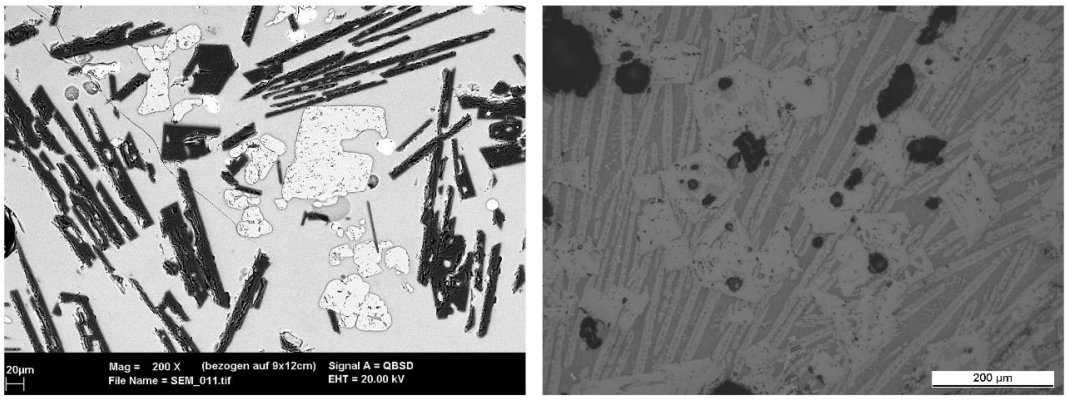

Fig. 6: A gauche: scorie agglutinée aux éponges de fer 2 et 3 dont la texture renferme une part élevée de verre, quelques rares lamelles (gris foncé) et des spinelles (en clair) (image MEB, mode SE: les éléments lourds (par ex. fer) apparaissent en clair, les légers (par ex. alumine) en foncé). A droite: texture de la scorie 4, avec lamelles de fayalite et spinelles d'hercynite dans une matrice vitreuse.

lamelles analysées comportent également des silicates et ont une composition proche de la mullite ($Al_{4-6}SiO_{8-13}$). Celle-ci a été observée dans une paroi de fourneau fondue (Kronz, A. 1997, 109-110). D'autres lamelles ne comportent presque que Al_2O_3; d'après le diagramme des phases FeO-SiO_2-Al_2O_3 il devrait s'agir de corindon (Slag Atlas 1995, 111). Le point de croisement le plus bas des phases hercynite-mullite-corindon dans ce diagramme se situe vers 1380°C. La mullite peut apparaître à des températures plus basses, tandis que la formation du corindon débute à cette température. Ceci constitue donc une indication de la température de formation de ces scories.

% masse	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	TiO_2	P_2O_5	V	Cr	MnO	FeO	SiO_2/Al_2O_3	CaO/K_2O
Minerai	<	16	12	0.02	0.04	1.2	0.3	0.14	0.04	0.08	58	0.8	2
Paroi de four	0.6	10	84	2.8	0.3	0.4	0.07	0.01	0.01	0.05	4.5	8.4	0.1
Scorie coulée	0.4	20	25	0.7	1.8	1.0	0.3	0.11	0.03	0.2	49	1.3	2.6
Scorie interne	0.3	20	27	0.8	1.8	1.2	0.3	0.09	0.02	0.2	46	1.4	2.3
BOE n° 2	1.0	31	39	2.4	5.3	2.1	<	<	<	0.5	17	1.3	2.2
BOE n° 3	0.8	40	39	3.4	3.0	2.6	<	<	<	0.6	11	1.0	1.0

Fig. 7: Composition chimique de tous les matériaux connus à Boécourt comparée aux nouvelles analyses (BOE N° 2 et 3).

En conclusion, on retiendra que le métal de ces scories riches en fer est très semblable à celui de la grande éponge N° 2. Ce métal, qui est un acier hypoeutectoïde (C ±0,2%), est souvent cémenté localement. Des inclusions de phosphures de fer se trouvent dans les pièces 2 et 5.

Un aspect complémentaire à cette étude a trait à la composition chimique du métal produit: les quatre nouvelles mesures effectuées donnent la plage de variation de certains éléments (fig. 5).

L'absence complète de vanadium dans le métal des scories riches en métal avec structure fayalitique-hercynique est à relever. Le chrome n'est présent que dans les parties hypereutectoïdes de la pièce N° 2. Cela indique des conditions variables de réduction de ces objets: le N° 4 s'est formé à des températures plus basses que le N° 3. Les teneurs élevées en phosphore dans les secteurs contenant beaucoup de phosphures n'ont pas été retenues, parce qu'elles ne devraient pas être présentes dans une éponge appropriée à la transformation: cela est aussi confirmé par le fait qu'à ce jour de telles structures n'ont été observées que dans des déchets, et jamais dans des objets finis (CAJ 14, 249-296). Les pièces nouvellement analysées ne recèlent que rarement des traces d'étain; quand il est présent, sa teneur est faible, ce qui semble plutôt aléatoire. Mais ce sont surtout le molybdène et l'antimoine qui retiennent l'attention, car leurs teneurs peuvent varier en fonction du type de métal, comme le montreront par la suite les autres sites.

Grâce à l'ensemble des analyses de Boécourt, la base existe pour un type de métal qui est rattachable à un lieu de production connu dans le district sidérurgique du Haut Moyen Age. A-t-il été utilisé par les forgerons de Develier-Courtételle ou par ceux de Courtedoux-Creugenat? Les artisans sidérurgistes ont-ils livré de ce métal dans ces hameaux, voire y ont-ils vécu? Ces questions seront abordées ci-dessous.

2.2.2 Intégration des calottes et des scories coulées dans un contexte archéologique élargi

Au moment de sa découverte, le petit ensemble de calottes de Boécourt constituait une nouveauté dans le district jurassien. Il peut aujourd'hui être comparé à trois autres ensembles plus importants. L'étude du matériel de Develier-Courtételle, notamment l'enregistrement du matériel et l'approche typologique, sert actuellement de référence pour l'appréhension des déchets issus de l'étape de postréduction, telle qu'elle est pratiquée au Haut Moyen Age. Sur ce site, un premier inventaire a été directement effectué sur place, après le lavage des déchets scorifiés. Une première sélection a ensuite mis en évidence les pièces marquantes, ainsi que des échantillons représentatifs, réduisant ainsi à un tiers le volume des pièces à examiner (de quatre tonnes à une et demie). Les calottes dont l'état de conservation était de 50% ou plus, ainsi que des échantillons des autres catégories de déchets scorifiés ont enfin été soigneusement inventoriés. La sélection des pièces à analyser s'est effectuée sur la base de cet inventaire.

Dans le cadre de l'étude du hameau de Develier-Courtételle (chap. 3), un système de classification des mille quatre cent trente-deux calottes constituant le corpus altomédiéval a été proposé (CAJ 14). Il est basé sur la morphologie et la technologie. La classification morphotypologique des

pièces distingue onze types. Un premier groupe englobe quatre types de petites scories avec critères complémentaires (aplaties, denses, aspect de la surface fluide ou vitrifié). Un deuxième groupe compte quatre types de grandes calottes à signes distinctifs (avec bourrelet argilo-sableux, avec empreintes de charbon, avec concavité et circulaire[6]). Un unique type de très grandes calottes se distingue par sa grande épaisseur, ainsi que par la forte convexité de sa face inférieure[7].

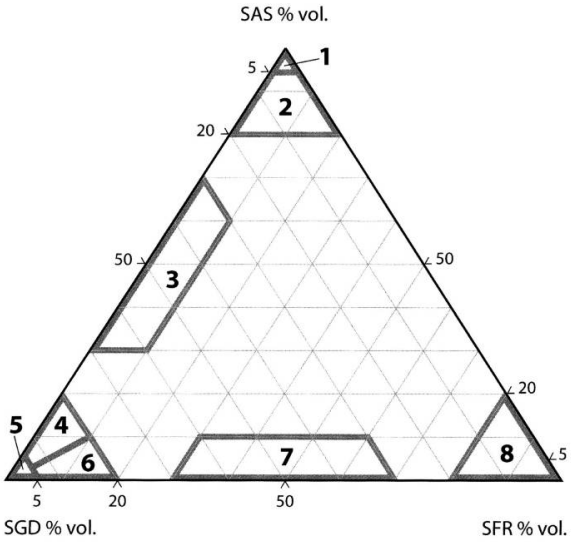

Fig. 8: Schéma et tableau de la classification des calottes en fonction des proportions des différents matériaux (Serneels, V. 2011, fig. 113).

Type			% SAS sandy-clayey material	% SGD grey dense material	% SFR iron-rich rusty material
1	SAS		100		
2	SAS-M		80 to 90	10 to 20	10 to 20
3	SAS-SGD		50	50	
4	SGD-B		10 to 20	80 to 90	
5	SGD			100	
6	SGD-SFR		0 to 10	70 to 90	10 to 20
7	SFR-M			50	50
8	SFR				100

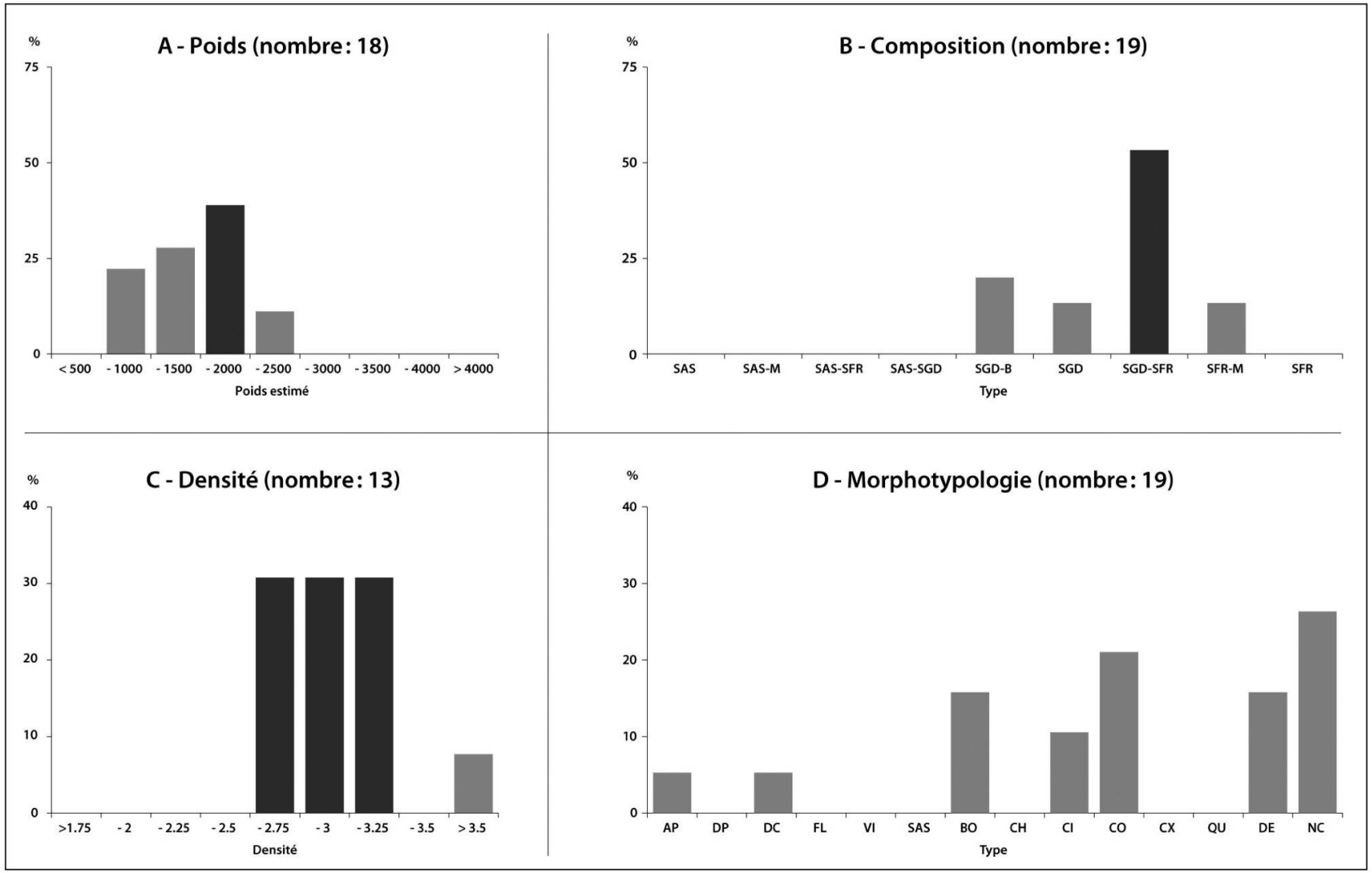

Fig. 9 : Les calottes de Boécourt-Les Boulies. Synthèse des données archéologiques, normalisées pour la comparaison avec les trois autres sites.

L'étude de la forge romaine de Châbles a donné lieu à une autre classification (Anderson, T. et al. 2003). Elle se fonde également sur la forme des pièces et la nature des matériaux : scories grises denses (SGD), scories argilo-sableuses (SAS) et scories ferreuses rouillées (SFR). En fonction de la part de ces trois matériaux, Serneels distingue trois types de base avec respectivement 100 % de SAS, SGD ou SFR, et cinq types mélangés avec des parts variables des trois matériaux (fig. 8). Nous avons adopté ici cette classification pour décrire les calottes jurassiennes, mais une part représentative des pièces a été coupée le long de l'axe médian, afin de confirmer la nature des matériaux qui les composent. En effet, un échantillon de calottes a montré, lors d'un essai de classification, une différence significative entre les caractéristiques perceptibles en surface et la composition effective en coupe (Eschenlohr, L. en préparation). Pour comparer les deux technotypologies, nous avons classé les calottes des Boulies, ainsi que celles exploitables des trois autres sites jurassiens, selon les deux systèmes (fig. 10). A notre avis, il existe une complémentarité entre les deux approches, que nous avons tenté de démontrer ici, au lieu d'opposer les deux systèmes ou de les évaluer en soi.

A Boécourt, les quelques pièces issues de la paroi d'un des deux bas fourneaux ne constituent pas un corpus représentatif. La valeur de l'information que l'on peut en tirer reste donc indicative[8]. L'apport de ces données réside donc surtout dans la comparaison avec celles provenant des trois autres ateliers (voir chap. 3, 4 et 5 ci-dessous).

Lors de la première élaboration des données, la densité des calottes n'avait pas encore été mesurée[9]. A présent, elles sont également classées en fonction de leurs composants et de leur morphologie (fig. 9). Dans ce petit corpus, on relève que toutes les calottes pèsent plus d'un kilogramme, le mieux représenté étant le groupe entre 2 et 2,5 kg. Ces grandes pièces, retrouvées en position secondaire dans le mur du second bas fourneau, ont probablement été sélectionnées par les artisans-bâtisseurs de l'époque.

La quasi-totalité des densités mesurées se situent entre 2,5 et 3,25, ce qui n'a rien d'étonnant, compte tenu de l'échantillon et de la taille des pièces. Pour ce qui est de la classification par composant et par morphologie, si les quinze pièces se répartissent en six types morphologiques, elles se concentrent surtout dans la classe SGD-SFR[10]. En outre, l'absence de pièces recelant une présence de SAS est à relever.

L'atelier de Boécourt a permis pour la première fois de reconstituer la dernière coulée d'une opération de réduction : elle été retrouvée écrasée en place dans la cuvette de travail, devant le bas fourneau 2 (CAJ 3, 71-78). Il n'existait pas, à ce moment-là, de véritable base de comparaison, ni dans le Jura, ni ailleurs. Seules les recherches menées sur le district médiéval du Jura entre 1993 et 2000 ont permis de déterminer que la scorie

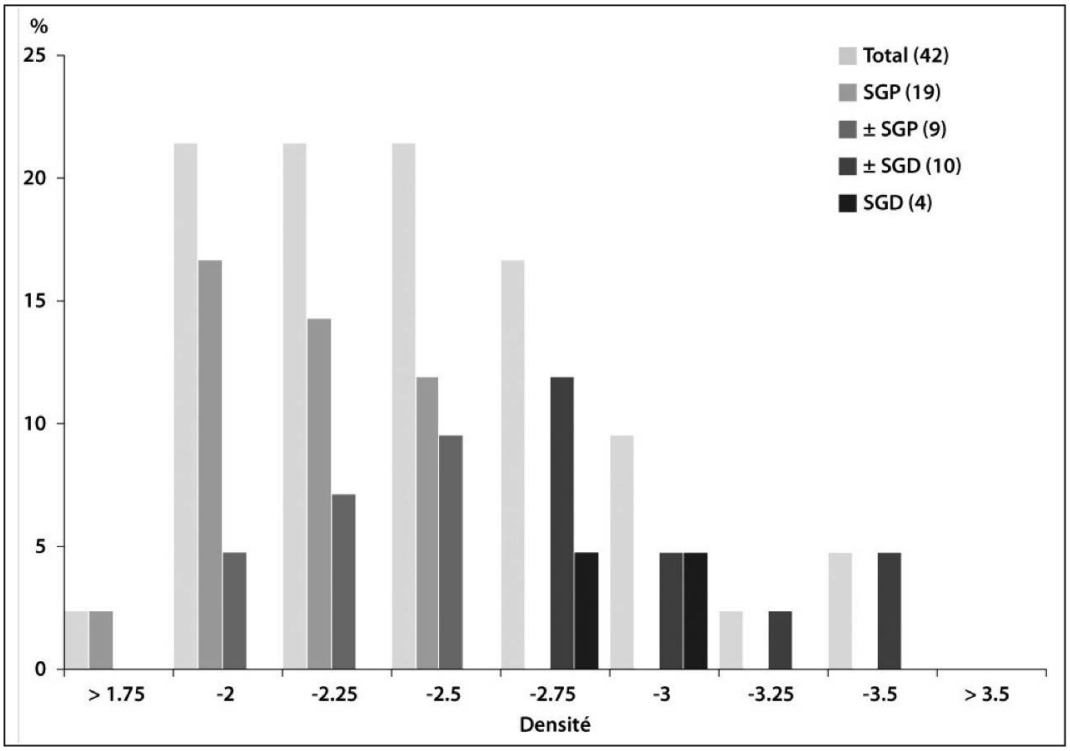

Fig. 10: Les scories coulées de la dernière coulée du fourneau 2 de Boécourt-Les Boulies. Répartition par groupe de densité et par classe morphotypologique. Les pourcentages sont calculés par rapport au nombre total (42), afin d'éviter des distorsions dues aux nombres variables d'échantillons des différents types.

grise dense qui s'écoule en cordons, souvent collés entre eux, représente au Haut Moyen Age, pour le Jura central suisse, le type de scories de réduction prédominant (CAR 88, 105-118).

Dans le cadre de l'étude de l'atelier de Chevenez-Lai Coiratte, des mesures de densité de scories coulées de réduction ont été effectuées, ce qui constitue une première (cf. plus bas, chap. 4). De même, la densité de quarante-deux pièces provenant de la dernière coulée du bas fourneau 2 de Boécourt a été mesurée, afin de pouvoir effectuer une comparaison (fig. 10) [11]. Deux tiers de ces pièces (67 %) affichent des valeurs entre 1,7 et 2,5, le solde ayant des valeurs supérieures à 2,5.

Dans l'état actuel de nos connaissances, cette dernière coulée n'est pas représentative des scories de coulées grises denses typiques. La classification morphotypologique le confirme [12]: à deux exceptions près, qui affichent une porosité moindre et peuvent être désignées comme type intermédiaire ± SGP [13], il s'agit de scories grises poreuses pouvant atteindre une densité de 2,0. Des pièces évidentes comme SGD sont rares: la densité de ces quatre individus varie entre 2,51 et 3,0. Le solde des pièces peut être désigné en tant que type intermédiaire ± SGD, à deux exceptions près, dont l'une affiche une surface irrégulière, rouillée, et l'autre une

assez forte aimantation : les deux pourraient renfermer une certaine quantité de fer ou d'oxydes de fer. Il convient encore de relever que seules trois pièces ont une densité supérieure à 3,0.

2.3 Rendement et bilan de masse des bas fourneaux

Un calcul de rendement aux Boulies a déjà été effectué dans l'étude initiale (CAJ 3, 104-105). Nous présentons ici un bilan de masse normalisé, afin de pouvoir le comparer avec ceux qui proviennent d'autres ateliers sidérurgiques artisanaux. Le fait de disposer de valeurs pour le charbon de bois est un apport nouveau, même si cette cendre ne provient pas de charbon archéologique récolté dans le district sidérurgique jurassien, mais de charbon de hêtre actuel, utilisé lors d'expérimentations (Serneels, V. 2002, 104).

	Minerai +	Paroi +	Cendre	= Total	Scorie	+ Métal	Rendement %
Teneur Fe/100 kg minerai	**52**	**0.49**	**0.03**	**52.5**	**34.5**	**18**	**34.3**
pour 100 kg de minerai	100	14	2.4		93	18	
g de matériau	108	15	3		100	19	
Variable	a=1.077	b=0.1517	c=0.026				
Si	6.65	5.74	0.10	12.50	12.50		
Al	10.14	0.80	0.04	10.98	10.98		
Fe	55.94	0.53	0.03	56.50	37.26	19.2	34.4
Ti	0.87	0.04	0.00	0.91	0.69		
Mn	0.08	0.01	0.03	0.11	0.14		
Mg	0.00	0.05	0.17	0.22	0.21		
Ca	0.04	0.03	1.12	1.19	1.19		
Na	0.00	0.03	0.01	0.04	0.05		
K	0.02	0.35	0.23	0.60	0.55		
P	0.16	0.00	0.03	0.20	0.12	0.08	
Zr	365	77	2	444	158		
Y	42	3	1	46	19		
Sr	12	8	20	40	53		
Rb	4	28	6	37	182		
Ba	31	77	28	136	507		
V	1773	11	0	1784	71	?	
Sb	6	0	0	6	0		
As	136	5	0	140	31	109	
Pb	123	1	0	124	7		
Zn	142	7	45	194	44		
Cu	42	3	6	50	18	32	
Ni	174	4	1	179	29	150	
Cr	507	12	1	520	81	?	
Co	103	35	0	138	228		
Si/Al	0.7	7.2	2.7	1.1	1.1		

Fig. 11 : Bilan de masse normalisé de tous les matériaux provenant de Boécourt ; la cendre de charbon de bois est prise en compte, à partir de données expérimentales actuelles.

Les nouveaux calculs ne montrent que de minimes différences par rapport à ceux qui existent déjà (fig. 11) : il apparaît encore une fois clairement que, lorsque le minerai interagit avec la paroi de bas fourneau, aucun ajout de matériau sablo-argileux supplémentaire n'est nécessaire à la charge.

2.4 Activités métallurgiques : compléments

Notre compréhension des vestiges de Boécourt en lien avec le processus de réduction s'est considérablement étoffée depuis la première étude. Dans une moindre mesure, il en va de même pour les quelques témoins de la postréduction récoltés.

En effet, à la lumière des nouvelles analyses de la coulée du bas fourneau 2 découverte *in situ*, et qui correspond très probablement aux restes de la dernière opération de réduction pratiquée dans cet atelier, il est légitime de se demander si ces coulures sont représentatives des déchets habituellement issus d'un bas fourneau jurassien. Il se pourrait tout à fait que le processus de réduction en question ne se soit pas déroulé comme le souhaitaient les artisans sidérurgistes, ce qui aurait entraîné l'abandon du site. Mais il est aussi envisageable que la spécificité technique des scories coulées plutôt poreuses soit à mettre en relation avec un fonctionnement propre aux fourneaux de Boécourt. Comme les scories de réduction contenues dans le ferrier aplati n'ont pas été enregistrées selon les critères retenus couramment aujourd'hui, il n'est pas possible de trancher en faveur de l'une ou l'autre hypothèse (Eschenlohr, L. 2012).

Le réexamen des « scories internes rouillées » donne en revanche de nouveaux détails sur les variations de la température au cœur du bas fourneau. Des températures jusqu'à 1400 °C ont été atteintes, du moins localement. Les scories de réduction étudiées contiennent systématiquement trop peu de vanadium et de chrome, contrairement à la scorie vitreuse agglutinée aux alentours de l'éponge de fer, qui renferme tendanciellement davantage de ces deux éléments ; on peut donc supposer qu'elles se forment régulièrement en petite quantité en lien avec l'éponge de fer. Par déduction, deux zones de température se distinguent : l'une, très chaude, vers la tuyère latérale, où se forme l'éponge et l'autre, moins chaude, près de la porte du fourneau, d'où la scorie coule. Cela aurait comme conséquence que le rendement calculé à partir des scories constituerait une valeur minimale.

Le cas de Boécourt-Les Boulies démontre tout l'intérêt d'un réexamen, deux décennies plus tard, de données et de matériaux archéologiques, en tenant compte d'un état de connaissances élargi. Une réévaluation critique effectuée par les personnes qui ont fouillé, étudié et publié un site de ce type constitue en effet une approche méthodologique intéressante : P.-L.

Pelet en avait tracé la voie, en remaniant, vingt ans après, son étude de 1973 sur la sidérurgie en pays vaudois, à la lumière des nouvelles connaissances acquises, notamment, à Boécourt-Les Boulies (Pelet, P.-L. 1973 et 1993).

3. Le hameau de Develier-Courtételle

3.1 Faits connus

Le site de Develier-Courtételle est localisé à 450 m d'altitude, dans un vallon latéral de la vallée de Delémont parcouru par le ruisseau La Pran. Cette agglomération rurale du Haut Moyen Age a été fouillée sur 3,5 hectares entre 1993 et 1996. Les résultats de ces recherches sont publiés en cinq volumes (CAJ 13 à 17, pour la métallurgie : CAJ 14). Les structures découvertes s'inscrivent, pour la très grande majorité, dans un contexte stratigraphique datant du Haut Moyen Age. L'état de conservation de l'horizon mérovingien est tributaire de l'activité ininterrompue du ruisseau : par endroits presque complètement érodé, il peut par ailleurs s'épaissir et présenter parfois plusieurs phases sédimentaires.

Ces structures dessinent plusieurs ensembles définissant des fermes ou des zones d'activité spécifique. Etalées le long du cours d'eau et séparées l'une de l'autre par des fossés ou par des espaces dépourvus de tout aménagement, six fermes et quatre zones d'activité ont ainsi été individualisées. Les fermes se composent toutes d'au moins une maison à laquelle sont associés plusieurs édifices annexes, notamment de petits bâtiments à quatre poteaux d'angle et/ou des fonds de cabane. A l'intérieur ou autour de ces bâtisses se trouvent des fours, des foyers, des fosses ainsi que des empierrements et des zones de rejet. La composition et la durée d'occupation des différentes fermes varient considérablement. Les quatre zones d'activité se situent à l'extérieur des fermes. Deux d'entre elles – les zones 1 et 4 – sont principalement dédiées au travail du fer. Le rôle des deux autres zones est moins clair. Au moment de la fouille déjà, l'existence *in situ* d'une intense activité de métallurgistes-forgerons a été perçue par la découverte, en plus de celle des déchets, de quinze structures liées au travail du fer (CAJ 13). Parmi celles-ci, les bas foyers sont au nombre de douze – dont quatre éventuels – et les aires de forge au nombre de trois.

De très nombreux déchets métallurgiques ont été recensés dans les couches d'occupation du Haut Moyen Age, soit quelque cent mille fragments pour un poids total de plus de quatre tonnes. Si tous ces déchets

caractérisent les différentes étapes de la postréduction, aucune activité productive – à savoir la réduction du minerai de fer proprement dite – n'a été décelée dans le périmètre fouillé. Tandis que près de la moitié d'entre eux (représentant environ 90% en poids) est constituée de calottes, une seconde catégorie riche en enseignements du point de vue de la typotechnologie et de l'analyse a également été classifiée: les déchets riches en fer (déchets de forge et scories ferrugineuses). Le solde des déchets métallurgiques regroupe les battitures, les scories d'aspect coulé, le minerai et les éléments sablo-argileux de construction des installations consacrées au travail du fer. L'effort principal a donc porté sur les calottes, dont mille cent septante-deux pièces ont été examinées en détail. Cet examen poussé a nécessité en parallèle une recherche analytique approfondie (chimie, minéralogie et métallographie) grâce à laquelle il a été possible de différencier les calottes issues du raffinage (épuration et compactage de l'éponge de fer formée lors de la réduction) de celles issues du forgeage (élaboration de l'objet en fer) et de définir le type de référence du métal travaillé à Develier-Courtételle.

L'examen des quelque deux mille deux cents objets et fragments d'objets métalliques retrouvés dans les couches d'occupation est présenté en fonction des grands thèmes retenus pour leur classement. La variété et la qualité souvent réelle de ce mobilier mettent en valeur les activités économiques ou domestiques, les objets usuels ou personnels et les diverses pièces d'équipement. Il en ressort que les activités artisanales ont dû constituer une occupation non négligeable pour les habitants de Develier-Courtételle: si une part de l'outillage identifié peut être associée à la métallurgie, d'autres outils attestent le travail du bois et celui de matières souples comme le cuir ou les textiles. Quelques objets liés aux travaux agricoles et à l'élevage soulignent une autre facette de l'économie de base de cet habitat. En rapport avec la chronologie relative, les données les plus intéressantes sont livrées par des accessoires vestimentaires et des objets de parure ainsi que, dans une moindre mesure, par quelques pièces d'équipement en relation avec l'armement et la cavalerie. Le spectre matériel susceptible de fournir quelques arguments de datation se limite toutefois pour l'essentiel au VIIe siècle. La production locale d'objets métalliques a par ailleurs pu être démontrée, d'une part, par la découverte de vestiges archéologiques comme les déchets de forge et la présence d'un outillage spécifique; d'autre part, grâce à l'analyse métallographique qui a établi à plusieurs reprises le lien entre le métal travaillé sur le site et celui d'objets analysés.

L'étude de la répartition spatiale concerne les dix ensembles identifiés à Develier-Courtételle, à savoir six fermes (F1 à F6) et quatre zones d'activité (Z1 à Z4). Elle a permis de mieux saisir l'organisation du travail du fer grâce aux déchets métallurgiques et de percevoir les grandes lignes de l'évolution chronologique du hameau en recourant aux objets métalliques

les plus significatifs. L'essentiel des déchets ont été retrouvés dans des contextes permettant d'identifier plusieurs ateliers métallurgiques, malgré l'érosion des structures et des niveaux de sols archéologiques. Le rapport entre les calottes attribuables à l'une ou l'autre des trois différentes phases de postréduction (épuration, compactage et forgeage) permet parfois de préciser quelque peu la nature du travail effectué dans un atelier.

Enfin, la synthèse des données acquises fait le point sur les processus métallurgiques mis en œuvre par les forgerons de Develier-Courtételle entre environ 550 et 650 ap. J.-C. Sont notamment développées ici des considérations technologiques, quantitatives et comparatives qui examinent la chronologie et les contacts culturels ou économiques du hameau de Develier-Courtételle. Entre le VIe et le VIIIe siècle, les bords du ruisseau La Pran sont ainsi occupés par une implantation de type rural comprenant différentes installations de postréduction et de forge. Cette intégration d'activités métallurgiques dans la trame d'un habitat domestique, agricole et artisanal représente l'un des intérêts majeurs du site. Comparés à ceux de l'époque romaine, ces ateliers sont de moindres dimensions et spatialement plus disséminés. Quant au cadre économique, le modèle d'organisation de la production révélé à Develier-Courtételle (approvisionnement extérieur en fer déjà réduit, transformation sur place) s'éloigne quelque peu de l'image des « forgerons itinérants » encore courante pour la période du Haut Moyen Age. Les données actuellement à disposition laissent plutôt entrevoir des ateliers permanents et organisés de manière cohérente, en relation avec un district productif.

3.2 Du nouveau au sujet du type de métal « Develier-Courtételle »

Comme nous l'avons évoqué plus haut, la composition métallographique et chimique de nombreux déchets des forges de Develier-Courtételle a été analysée, afin de déterminer l'empreinte chimique distincte d'un type de métal local (appelé plus loin type DEV-CTT, fig. 12 et 13). Ce type constitue le matériau de départ avec lequel les forgerons ont travaillé (Senn Bischofberger, M. 2005, 52-54 ; CAJ 14, 71-72). Ce métal a été produit sous forme d'éponges de fer à différents endroits du district sidérurgique jurassien, comme à Boécourt ou à Chevenez. Partant de la composition chimique de ce matériau de départ, nous avons attribué – ou non – les objets métalliques finis au type DEV-CTT, distinguant ainsi ceux fabriqués localement de ceux qui ont été importés (CAJ 14, 83-84).

Les déchets métalliques en provenance de ces forges sont de petite taille. Composés de différents types de matériaux, ce sont des fragments informes d'éponges de fer portant des traces de travail plus ou moins marquées et reconnaissables aux trous ou inclusions de scorie peu ou pas

déformés qu'ils présentent. Leur poids varie entre 5 et 95 g, mais il peut être exceptionnellement plus élevé (130 g, 195 g). La majeure partie des pièces ne pèse toutefois que de 10 à 30 g. Les véritables déchets de forge sont constitués de métal entièrement forgé et peuvent comporter plusieurs couches : il s'agit dans ce cas de produits semi-finis, de ratés ou de chutes métalliques comportant des traces de découpe. Les pièces de ce groupe sont aussi de petite taille.

Type d'objet (fragments)	Analyse métallographique	LA-ICP-MS	REM-EDX	Origine locale	Déviant/origine externe
Eponge de fer	45	27	7	18	9
Déchet de forge	17	14	3	9	5
Déchet de métal recyclé	4	4	-	-	4
Produit fini	64	58	8	24	34
Total	130	103	18	51	52

Fig. 12 : Synthèse des différentes méthodes d'analyse employées et résultats relatifs à l'origine du métal provenant de déchets et d'objets finis de Develier-Courtételle.

La composition chimique du métal des deux tiers environ des fragments d'éponge de fer, ainsi que celle de la majorité des déchets de forge et produits finis a été étudiée à l'aide de LA-ICP-MS. Bien qu'il faille partir du postulat que tous les fragments d'éponge de fer constituent des variantes de la production locale, seuls deux tiers d'entre eux ont une composition chimique semblable. Les déchets de forge analysés présen-

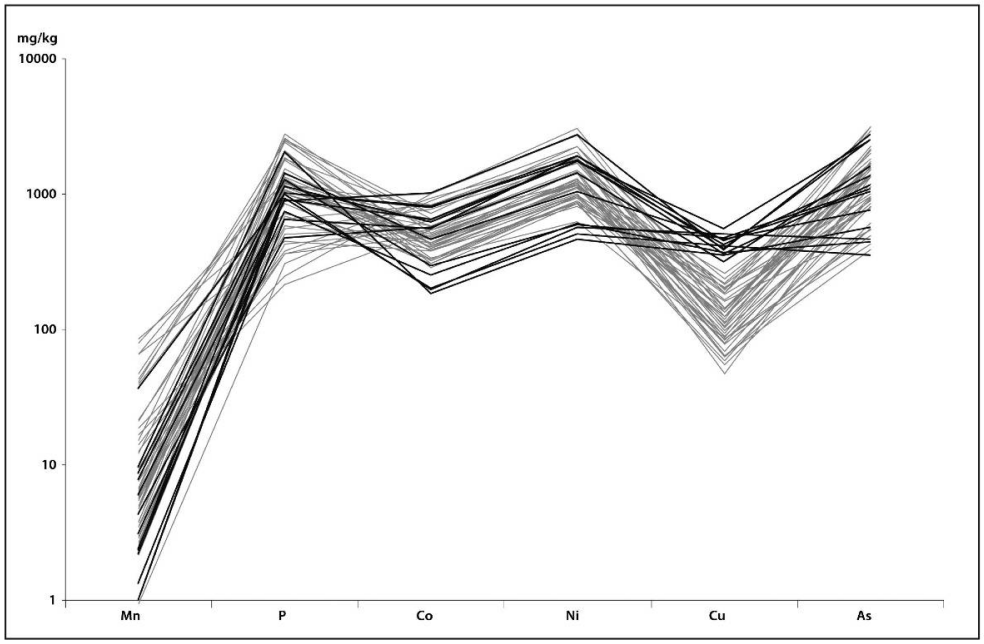

Fig. 13 : Synthèse de la composition des pièces du type DEV-CTT (en gris clair, quarante-sept analyses pour quarante-six pièces) et de celles du sous-type riche en Cu (en noir, quatorze analyses pour treize pièces).

tent des résultats analogues. Quant aux quatre déchets en métal recyclé, ils n'ont pas été fabriqués en métal local. Il s'agit de deux tôles pliées à multiples reprises (CAJ 14, cat. 89 et 112) et de deux autres pièces en métal soudé en paquet (Senn Bischofberger, M. 2005, cat. 94 et 95). Le soudage en paquet correspond à une manière désorganisée de souder des bandes et des tôles en barres et en objets finis. Ces quatre objets ont déjà été publiés[14] (Schwab, R./Senn, M. 2008). Il est difficile d'expliquer en revanche pour quelle raison des déchets de forge présentent une composition différente. Peut-être s'agit-il de fragments de produits finis importés et non de déchets de forge; à moins qu'un métal du district sidérurgique dont la nature serait encore à définir ait été travaillé à une plus petite échelle. Parmi les objets finis, la part de produits locaux dépasse à peine 40%. On peut supposer que les pièces de composition différente ont été importées.

Le réexamen critique des données LA-ICP-MS du type DEV-CTT montre que les valeurs élevées en cuivre n'ont pas toujours été interprétées de la même manière: dans la série des éponges en fer, les pièces présentant ces valeurs ont été exclues du type DEV-CTT, tandis que dans toutes les autres séries, ces mêmes valeurs ont été considérées comme preuve de l'origine locale du fer utilisé. En fait, le nouveau regroupement de ces données a abouti à la formation d'un sous-type du type DEV-CTT (fig. 13).

Il est intéressant de constater que la composition des deux types est très proche, à l'exception de la teneur en cuivre (fig. 14). A ce stade, on peut se demander si le métal produit à Boécourt a été transformé à Develier-Courtételle. Les moyennes chiffrées ci-dessus montrent que ce n'est pas le cas. Boécourt ne peut être complètement intégré ni dans le type DEV-CTT, ni dans le sous-type riche en cuivre. La composition du métal de Boécourt varie toutefois relativement peu en comparaison de celle des types de métal définis à Develier-Courtételle. Ce qui signifie peut-être que le métal travaillé à cet endroit provient de plusieurs ateliers de réduction jurassiens.

Elément	Type DEV-CTT	Sous-type riche en Cu	Boécourt
Mn	<LDD–90	<LDD–40	(10)
P	230 – 3000	340 – 2100	3000 – 5000
Co	300 – 1100	190 – 1000	100 – 310
Ni	660 – 3300	460 – 2800	300 – 800
Cu	50 – 280	320 – 560	140 – 300
As	410 – 3300	450 – 2800	400 – 800
Ni/Co	1,9 – 3,2	2,0 – 3,5	1,7 – 2,7

Fig. 14: Plage de variation du type de métal DEV-CTT, du sous-type riche en Cu, ainsi qu'à titre de comparaison, du métal de Boécourt (LDD: limite de détection).

Dans dix-huit cas, la composition chimique de la scorie agglutinée au métal ou des inclusions de scorie dans le métal a été relevée, dans l'espoir qu'elles comportent encore des caractéristiques donnant des indices sur leur origine. Une telle approche a été réussie en Scandinavie (Buchwald, V.F./Wivel, H. 1998).

En ce qui concerne le district sidérurgique jurassien, on pouvait s'attendre à déceler localement dans les inclusions de scorie, parfois de manière atténuée à cause de la transformation du métal, les caractéristiques de la scorie de réduction du minerai pisolithique. Celles-ci sont les suivantes : une teneur élevée en Al_2O_3, similaire, voire supérieure à celle en SiO_2, et une teneur légèrement plusélevée en TiO_2. Vanadium et chrome dominent parmi les éléments traces : leur concentration se situe toutefois en dessous de la limite de détection de la méthode analytique employée (MEB/EDS).

% masse	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	FeO	SiO_2/Al_2O_3	CaO/K_2O
1 Eponge de fer	2.6	18	52	<	8.3	17	0.9	0.7	2.9	2.9	2.1
2 Eponge de fer	3.5	15	47	<	5.6	25	0.8	0.8	4.7	3.1	4.9
3 Eponge de fer	0.7	7.8	23	0.8	1.7	5.2	<	<	60	2.9	3.0
4 Eponge de fer	0.8	7.7	23	4.2	1.3	4.3	<	<	59	3.0	3.3
5 Déchet de forge	1.3	9.6	31	2.8	2.0	7.3	0.6	<	48	3.2	3.7
6 Déchet de forge	1.0	4.8	31	4.5	2.6	5.7	<	<	52	6.6	2.1
7 Déchet de forge	0.8	4.5	21	0.7	1.5	7.8	<	<	66	4.7	5.3
8 Produit fini	1.2	5.4	28	3.8	2.0	7.0	<	<	56	5.5	3.4
9 Produit fini	0.7	5.4	25	2.8	1.5	5.8	<	<	61	5.0	3.5
10 Produit fini	1.3	5.4	43	1.7	3.2	8.9	<	<	34	8.1	2.8
11 Produit fini	1.5	7.6	36	2.5	1.7	13	<	<	37	4.8	7.5

Fig. 15 : Synthèse des teneurs moyennes des scories associées au métal et des inclusions de scories du type DEV-CTT.

% masse	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	FeO	SiO_2/Al_2O_3	CaO/K_2O
12 Eponge de fer	<	22	23	0.7	0.8	1.4	1.0	<	54	1.3	1.7
13 Produit semi-fini	0.8	13	28	3.7	1.8	4.4	<	<	50	2.4	2.5
14 Produit fini	1.1	4.2	34	4.8	1.4	15	<	<	var	8.3	13
15 Produit fini	0.8	5.7	31	3.6	2.3	4.4	<	<	51	5.5	1.9

Fig. 16 : Synthèse des teneurs moyennes des scories agglutinées au métal et des inclusions de scories du sous-type riche en Cu.

Si l'on compare les compositions moyennes des inclusions de scorie et des scories agglutinées au métal, il n'est pas possible de percevoir de différences entre les types de métal (fig. 15 et 16). La teneur élevée en aluminium n'apparaît que rarement : N° 1, 2, 12 et 13. Ces pièces font aussi partie des rares objets où TiO_2 et MnO sont décelables. Comme nous l'attendions, les éléments traces vanadium et chrome ne se retrouvent pas dans la composition globale. Le rapport SiO_2/Al_2O_3 est également bas. Pour les scories de réduction jurassiennes, ce rapport varie entre un et

trois (CAR 88, 106-116). Tous les objets ayant un rapport similaire contiennent donc de la scorie de réduction. Lorsque ce rapport augmente à quatre, il s'agit de scorie d'épuration dont la composition est modifiée par des matériaux sablo-argileux. Ces derniers proviennent soit de la paroi fondue du bas foyer, soit ont été ajoutés pour protéger le métal de l'oxydation dans le feu. Quand le rapport atteint la valeur de cinq, la composition est celle d'une scorie de forge. Celle-ci est constituée de métal oxydé, de cendre, de paroi fondue et de matériaux sablo-argileux. Ceux-ci ont une forte influence sur la composition. A Develier-Courtételle, le rapport SiO_2/Al_2O_3 est de six (CAJ 14, 55). La majeure partie des produits et des déchets de métal complètement transformé qui ont été examinés ont un rapport SiO_2/Al_2O_3 de cinq ou supérieur et correspondent pour cette raison à une composition de scories de forgeage. Les valeurs supérieures à six décelées dans le métal du district jurassien attestent probablement l'utilisation d'un ajout pour la soudure, tel que le sable ou un mélange sable-cendre. Par soudage, on entend l'assemblage de morceaux de métal à très haute température, ce qui signifie que le fer est chauffé à blanc. La surface métallique, une fois chauffée, est recouverte de sable, afin qu'elle soit protégée de l'oxydation. Le couteau N° 8 comporte la preuve directe de ce procédé sous forme de deux inclusions composées exclusivement de sable de quartz (SiO_2) et de métal oxydé (FeO et éventuellement P_2O_5). En conclusion, cette étude démontre que, dans le district jurassien, le métal complètement élaboré ne comporte généralement plus aucune trace du minerai initial. Cela atteste que ce métal a été beaucoup travaillé lors de sa transformation, de l'éponge de fer au produit fini.

Les éponges de fer N° 1 et 2, qui se distinguent par leur composition, ont des caractéristiques en commun : les teneurs les plus élevées en MgO, Al_2O_3, K_2O et CaO, en comparaison avec tous les autres échantillons, ainsi que très peu de fer. La scorie est constituée de verre. Il pourrait s'agir d'une variante à haute température, laquelle n'apparaît que dans le contexte de la formation d'une éponge de fer, comme à Boécourt (chap. 2.2). Les teneurs élevées en vanadium et manganèse du métal de l'éponge N° 1 confortent cette hypothèse. Quant aux teneurs plus élevées en CaO, elles sont connues de scories provenant de plusieurs ateliers de réduction (CAR 88, 196-199) ; il en va de même pour quelques scories concernant le rapport CaO/K_2O. Une attribution exacte n'est toutefois pas possible sans une analyse du métal provenant des différents sites de réduction.

Un détail de fabrication doit encore être évoqué : la lame en acier soudé du couteau N° 18 est donc celle d'un produit importé. Ce procédé de fabrication ne semble pas faire partie de la tradition de forgeage jurassienne. Dans le Jura, ce sont plutôt les techniques par couches et par damas en bandes ou la construction « en sandwich », avec alternance d'acier mou et dur, qui ont été privilégiées.

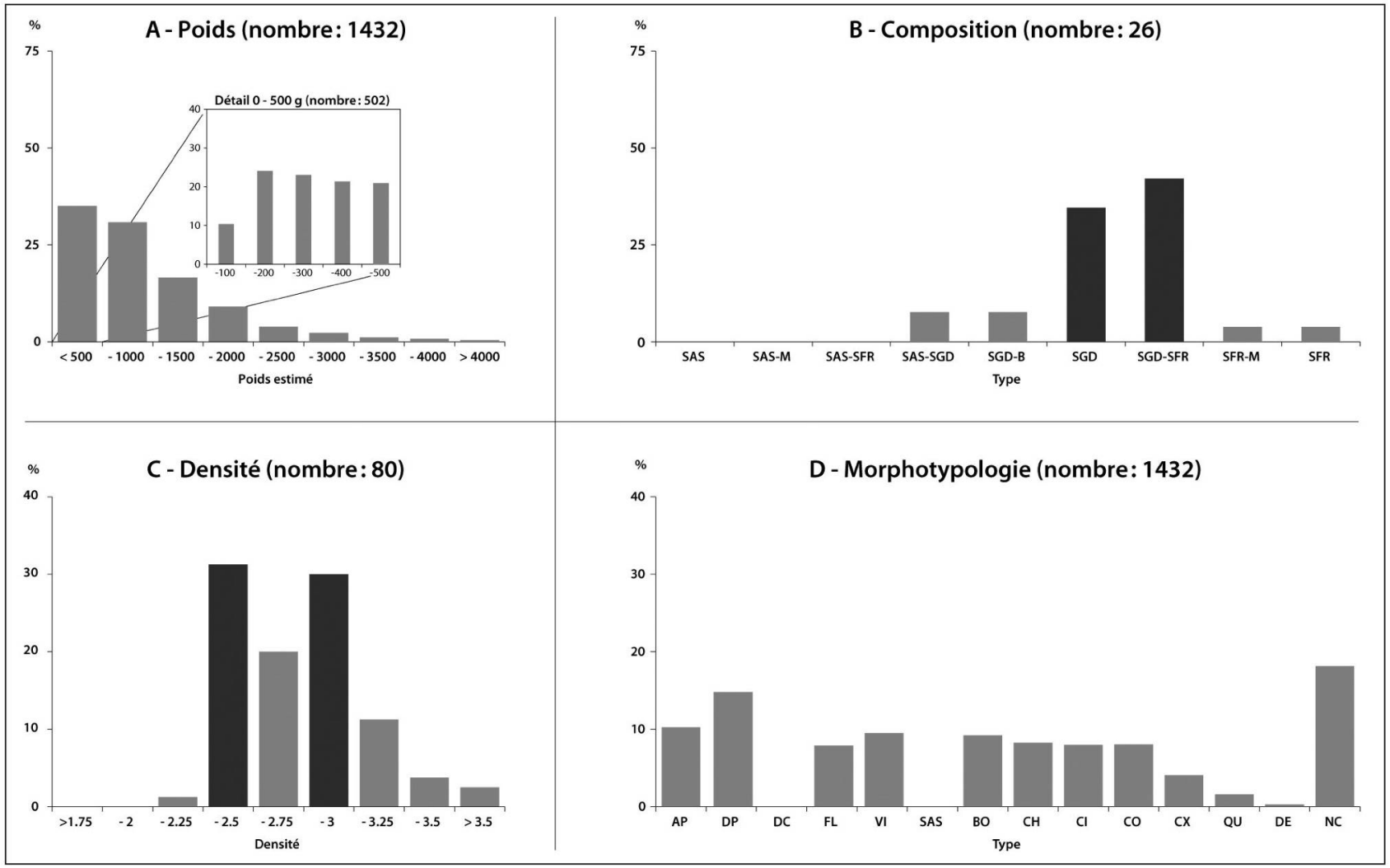

Fig. 17: Les calottes de Develier-Courtételle, synthèse des données archéologiques.

3.3 Calottes : données archéologiques complémentaires

Les calottes mises au jour à Develier-Courtételle représentent le corpus le plus important étudié dans le Jura jusqu'à ce jour. Il apporte, en tant que groupe de référence en comparaison avec les trois autres ateliers traités dans cette étude, quelques connaissances nouvelles et intéressantes (fig. 17).

Parmi les quelque mille quatre cents calottes, deux tiers pèsent moins de 1 kg, et un gros tiers pèse jusqu'à 0,5 kg. Parmi les cinq cents calottes de plus petite taille, seul un dixième affiche des valeurs jusqu'à 0,1 kg : malgré une certaine pondération, ce corpus comporte nettement moins de toutes petites calottes qu'à Chevenez et Courtedoux (cf. chap. 4.2.2 et 5.3). Près de 500 calottes pèsent donc plus de 1 kg.

Pour des raisons pratiques, un élargissement de la base de données concernant les composants et les mesures de densité n'a pas été possible. Par conséquent, les indications suivantes découlent de l'exploitation comparative des données existantes (densité) et de la nouvelle classification des calottes présentées dans le catalogue de la monographie (composants).

Comme le montre la fig. 17, 80 % des calottes ont une densité entre 2,25 et 3,0 ; celles dont la densité se situe entre 2,5 et 2,75 sont moins nombreuses. A cause du nombre de calottes beaucoup plus élevé que sur les trois autres sites étudiés, certains critères apparaissent cependant moins nettement.

Bien que seules quelques calottes aient été classées en fonction de leurs composants, on relève que le groupe prédominant des SGD-SFR est suivi de près par celui des SGD – cas unique parmi les scories de postréduction étudiées dans le district jurassien. La quasi-absence de calottes à composantes argilo-sableuses est à souligner : elle caractérise cet ensemble de scories de forge jurassiennes du Haut Moyen Age, et constitue par là une des différences les plus marquantes en comparaison avec les ensembles de l'Age du Fer et de l'époque romaine, dans le Jura et en Suisse.

3.4 Spécificité des activités métallurgiques

En analysant la composition chimique de la scorie incluse dans le métal ou agglutinée, nous espérions établir des liens avec celle du minerai pisolithique et celle des scories de réduction jurassiennes. Les résultats obtenus ne sont pas concluants, ce qui s'explique probablement par la forte transformation que subit le métal depuis l'éponge de fer jusqu'aux produits finis. Cette situation contraste avec les résultats provenant de la forge La Tène tardive de l'oppidum de Rheinau (fouille Postautogarage),

où les produits et déchets de forge peuvent être rattachés à deux types de minerai (Senn, M./Schreyer, S. en préparation).

Un détail intéressant réside dans le fait que, dans les forges de Develier-Courtételle, l'utilisation de sable ou d'un mélange de sable et de cendre comme anti-oxydant était tout à fait courante, et cela bien que l'on ne trouve pas de scories de type argilo-sableux, comme dans les forges celtiques et romaines. Il existe toutefois deux types de calottes qui, dans leur phase finale de formation, connaissent un épisode argilo-sableux : les calottes avec vitrification, souvent issues du forgeage, et les calottes avec bourrelet, dont la formation débute la plupart du temps lors de l'épuration.

4. L'atelier sidérurgique de Chevenez-Lai Coiratte

4.1 Faits connus

A Chevenez-Lai Coiratte, les investigations archéologiques ont duré de 1998 à 2002 (CAJ 27). Cet espace artisanal a livré des traces qui révèlent la présence d'un bas fourneau, ainsi que des structures sous forme de bas foyers, d'aires de forgeage et de fosses. L'atelier de Lai Coiratte paraît entièrement dévolu à l'activité sidérurgique : il prouve l'existence d'une activité de réduction du minerai de fer au Haut Moyen Age en Ajoie, ce qui est une première dans cette région du district. La découverte conjointe de vestiges de réduction et de postréduction permet d'appréhender l'organisation spatiale de cet atelier et donne une vue d'ensemble de la chaîne opératoire du travail du fer, complétant ainsi les informations récoltées dans la vallée de Delémont, à Boécourt-Les Boulies et Develier-Courtételle.

Outre les scories de fer, le mobilier archéologique est essentiellement composé de céramiques et d'objets en fer. Quelques rares récipients en verre et en pierre ollaire, ainsi que des outils lithiques complètent cet inventaire. Si l'étude des céramiques étaie les données chronologiques et morphologiques recueillies à Develier-Courtételle, elle ne lève toujours pas le voile sur la localisation des centres de production régionaux. En revanche, l'approche des réseaux d'échange, perçus à travers les pièces d'importation, est plus aisée. Ils semblent différer quelque peu de ceux de la vallée de Delémont, avec une orientation plus prononcée en direction de la Bourgogne et de l'Alsace. Les quelques pièces de verrerie et la pierre ollaire dénotent, quant à elles, une certaine aisance économique des occupants des lieux. Enfin, le développement des cultures agricoles est attesté par les macrorestes végétaux, alors que les restes fauniques reflètent

l'extension des activités d'élevage. Ces vestiges parlent en faveur d'une société agropastorale ayant adopté un mode de vie presque autarcique.

Les découvertes de l'atelier médiéval de Chevenez apportent un éclairage inédit sur l'organisation des populations rurales en Ajoie, la densité de peuplement et l'occupation des sols, ainsi que sur les réseaux d'échanges de ces débuts du Moyen Age dans cette région, période encore peu connue en dehors du contexte funéraire. Les données récoltées en lien avec les activités sidérurgiques complètent non seulement celles de Boécourt-Les Boulies et de Develier-Courtételle dans la vallée de Delémont, mais aussi celles de Courtedoux-Creugenat en Ajoie.

4.2 Données nouvelles

Le corpus de Chevenez-Lai Coiratte est le second en taille dans le Jura à l'époque altomédiévale, ainsi qu'en lien avec la réduction du minerai et la transformation du fer. Ceci est d'autant plus remarquable que l'écrasante partie des déchets scorifiés a été érodée depuis leur dépôt (plus de 90 %).

4.2.1 Types de métal

La publication de Chevenez-Lai Coiratte (CAJ 27) présente les déchets issus des ateliers de réduction et de forgeage qui sont compris dans la catégorie des scories riches en fer et qui sont supposés correspondre à des morceaux d'éponges de fer portant des traces de travail plus ou moins nettes. Il s'agit de cinq fragments d'éponge de fer, dont trois entièrement en métal, et de huit morceaux de fer, angulaires ou informes. Leur analyse avait pour objectif de déterminer le type de métal fabriqué à cet endroit, ainsi que les produits dérivés. En complément, deux couteaux et une alène ont aussi été sélectionnés. La majorité des pièces pèse entre 10 et 30 g, mais quelques-unes sont plus lourdes (50, 90, 150 et 250 g), ce qui les rapproche de la catégorie de poids des déchets étudiés à Develier-Courtételle.

Les inclusions de scorie et la scorie agglutinée montrent une composition assez similaire à celle des autres scories (fig. 18) : elles contiennent toutefois souvent plus de SiO_2, ce qui entraîne aussi un enrichissement des autres composants, à l'exception de FeO, dont la teneur diminue. Le fragment d'éponge N° 1 est pauvre en métal et renferme de la scorie en grande partie vitreuse, de la mullite, mais aussi des phases minérales du type *feldspath*, ce qui la rapproche de la scorie de Boécourt (chap. 2). Le fragment d'éponge N° 2 a été martelé à froid : sa texture contient de l'hercynite prise dans une matrice vitreuse. Ce minéral n'est décelable à Chevenez que dans les scories de réduction. Le tableau ne tient pas compte des pièces de fonte N° 3 et 4.

% masse	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	FeO *	SiO_2/Al_2O_3	CaO/K_2O
SGD	0.3	12	23	0.4	0.8	1.6	0.6	0.3	61	1.9	2.2
SGP	0.4	13	27	0.6	1	2	0.7	0.5	55	2.2	2
Scorie interne	0.4	8	23	0.4	1	1.9	0.5	0.2	63	3	2
Calottes type AP	0.3	3.9	18	0.4	1.1	2.8	0.2	0.1	73	4.6	2.4
Calottes type CI	0.3	5	20	0.6	1.6	3.3	0.3	0.1	68	4	2.2
Calottes type DC	0.3	4.4	17	0.6	0.8	1.9	0.3	0.1	75	4	2.3
Calottes type VI	0.5	6.4	29	0.5	2.3	4.6	0.4	0.1	75	4.6	2.2
1 Eponge de fer	<	21	46	<	1.6	5.0	1.3	<	var	2.2	3.2
2 Eponge de fer	<	19	43	1.0	1.0	1.9	1.6	<	36	2.4	2.0
5 Eponge de fer	1.4	13	56	<	1.8	24	0.8	<	3.3	4.1	14
Cat. 52 (CAJ 27)	1.7	11	55	<	3.3	24	0.7	<	10	5.2	7.2
Cat. 51 (CAJ 27)	<	5.4	15	2.3	0.7	1.2	<	<	81	2.8	1.7
Cat. 54 (CAJ 27)	0.6	7.9	35	0.9	2.6	4.2	<	<	46	4.3	1.5
Cat. 53 (CAJ 27)	<	7.9	24	1.1	1.1	3.4	<	<	66	3	3.1
6 Déchet de forge	<	5.0	17	0.8	1.0	2.2	<	<	73	3.3	2.2
7 Déchet de forge	1.1	13	var	<	3.7	11	0.7	<	var	4.1	3.1
8 Déchet de forge, métal recyclé	0.9	4.5	var	1.0	2.3	4.7	<	<	var	6.9	2.1

Fig. 18: Composition des inclusions de scorie et de la scorie agglutinée, comparée à celle des scories de réduction de Chevenez-Lai Coiratte (*dans le CAJ 27, la teneur en fer est exprimée en Fe_2O_3).

Type d'objet	Numéro	Ni/Co	V	Mn	P	Co	Ni	Cu	As	Mo	Sn	Sb	W	Origine
Coulée de fonte	3	1.1	<	<	400	50	60	30	30	<	10	<	<	Type P
Eponge de fer	1	1.4	40	<	1500	30	40	30	<	<	<	<	5	Type P
Eponge de fer	52, CAJ 27	2.4	<	10	700	250	620	130	400	20	20	20	5	Type P
Eponge de fer	51, CAJ 27	2.3	<	<	800	370	830	180	300	30	20	5	<	Type P
Déchet de forge	6	2.1	80	<	1200	120	250	60	240	30	<	<	<	Type P
Eponge de fer	2	1.7	<	<	5000	390	700	230	560	40	20	30	10	Type P
Coulée de fonte	4	1.4	<	<	8000	530	750	180	780	50	5	20	5	Type P
Eponge de fer	55, CAJ 27	2.2	<	10	3000	420	920	140	300	30	20	5	<	Type P
Couteau	10	2.2	<	10	7000	180	390	50	130	20	10	5	10	Type P
Eponge de fer	5	6.9	300	80	6000	360	2460	60	5000	600	<	40	<	Type As
Eponge de fer	5	6.9	100	50	1300	340	2400	60	3300	330	<	20	<	Type As
Eponge de fer	54, CAJ 27	5.1	<	<	1000	500	2300	160	2000	180	30	10	5	Type As
Eponge de fer	54, CAJ 27	5.3	<	<	1900	370	2000	170	2500	140	40	20	<	Type As
Déchet de forge	7	4.3	<	<	1000	220	940	160	7000	2900	<	20	<	Type As
Eponge de fer	53, CAJ 27	2.4	<	5	2500	370	910	190	500	40	20	5	<	DEV-CTT
Alène	9	2.9	<	<	600	300	900	330	700	150	20	30	5	Type Cu
Alène	9	3.1	<	<	500	260	800	350	1100	160	20	50	5	Type Cu
Déchet de forge métal recyclé	8	1.6	<	<	1300	250	390	40	1800	20	<	5	<	externe
Déchet de forge métal recyclé	8	2.2	<	<	210	900	1600	150	3600	40	<	10	<	externe
Couteau, tranchant en acier	11	0.6	<	50	<	900	500	40	40	<	5	<	<	externe
Couteau, corps	11	1.1	<	<	400	550	600	70	60	<	10	<		externe

Fig. 19: Composition du métal des objets de Chevenez analysés: synthèse. En grisé: composition caractéristique de la fonte ou de l'acier cémenté.

Le rapport SiO_2/Al_2O_3 des différentes catégories a la même plage de variation, sauf pour l'éponge cat. 52 (CAJ 27), ce qui indique la participation d'un matériau sablo-argileux dans le processus de formation de la scorie. Le rapport CaO/K_2O se distingue dans deux cas par une valeur nettement plus élevée : dans cat. 52 (CAJ 27), le facteur d'augmentation est de sept, dans l'éponge N° 5, il est de quatorze, indice d'une forte participation de cendre de charbon de bois à la formation de la scorie[15]. Le déchet de forge N° 8, à cause de son mode de fabrication (morceau de métal enroulé et mal scellé au milieu), est en métal recyclé[16] : il se différencie des autres pièces étudiées en particulier par son rapport SiO_2/Al_2O_3 élevé.

La synthèse des résultats relatifs à la composition du métal obtenus pour Chevenez-Lai Coiratte met en évidence sept types, dont deux assez bien représentés (fig. 19) : un premier riche en phosphore, où le phosphore affiche toujours les teneurs les plus élevées, et un second, riche en arsenic, dont les teneurs en arsenic et en nickel sont très hautes. Les déchets qui n'appartiennent pas à un type déterminé sont qualifiés de « jurassiens ». L'éponge cat. 53 (CAJ 27) s'intègre dans le type DEV-CTT.

Cette présentation synthétique montre aussi les variations de composition du métal en fonction de la formation de fonte ou de la cémentation. En revanche, elle ne met pas en évidence la composition du métal typique de Chevenez-Lai Coiratte. Le bilan de masse des scories de réduction donne néanmoins à penser que celles-ci se sont formées à partir du seul minerai pisolithique ou d'un mélange de minerai. Parmi le rare mobilier métallique mis au jour sur ce site, il n'y a que très peu de déchets de forge et leur composition chimique diffère de celle des éponges de fer étudiées.

Les produits finis examinés ont été importés. Le couteau N° 11 a une ressemblance avec celui analysé à Develier-Courtételle N°18 : le mode de fabrication est identique. La teneur en cuivre différencie ces deux couteaux dans leur composition chimique : la pièce de DEV-CTT affiche une valeur nettement plus élevée. Quant à l'alène riche en cuivre N° 9, elle a probablement été fabriquée à Develier-Courtételle, où une alène de fabrication locale qui appartient au type DEV-CTT a aussi été identifiée (cat. 644, CAJ 14).

4.2.2 Calottes et scories coulées : données archéologiques

Lors de l'étude initiale des cent cinquante-quatre calottes qui constituent le nombre minimal d'individus, la densité a été mesurée pour quarante-huit d'entre elles, réparties en six types différents. Ces mesures ont été étendues à tous les types morphologiques, portant ainsi le nombre de pièces à cent trente-cinq[17] (fig. 20). En effet, la mesure de la densité des calottes, amorcée à Develier-Courtételle, a ensuite été testée sur des scories de réduction du minerai de cuivre médiévales, avec l'idée de l'appliquer aussi aux scories de réduction du minerai de fer (Eschenlohr L., sous presse).

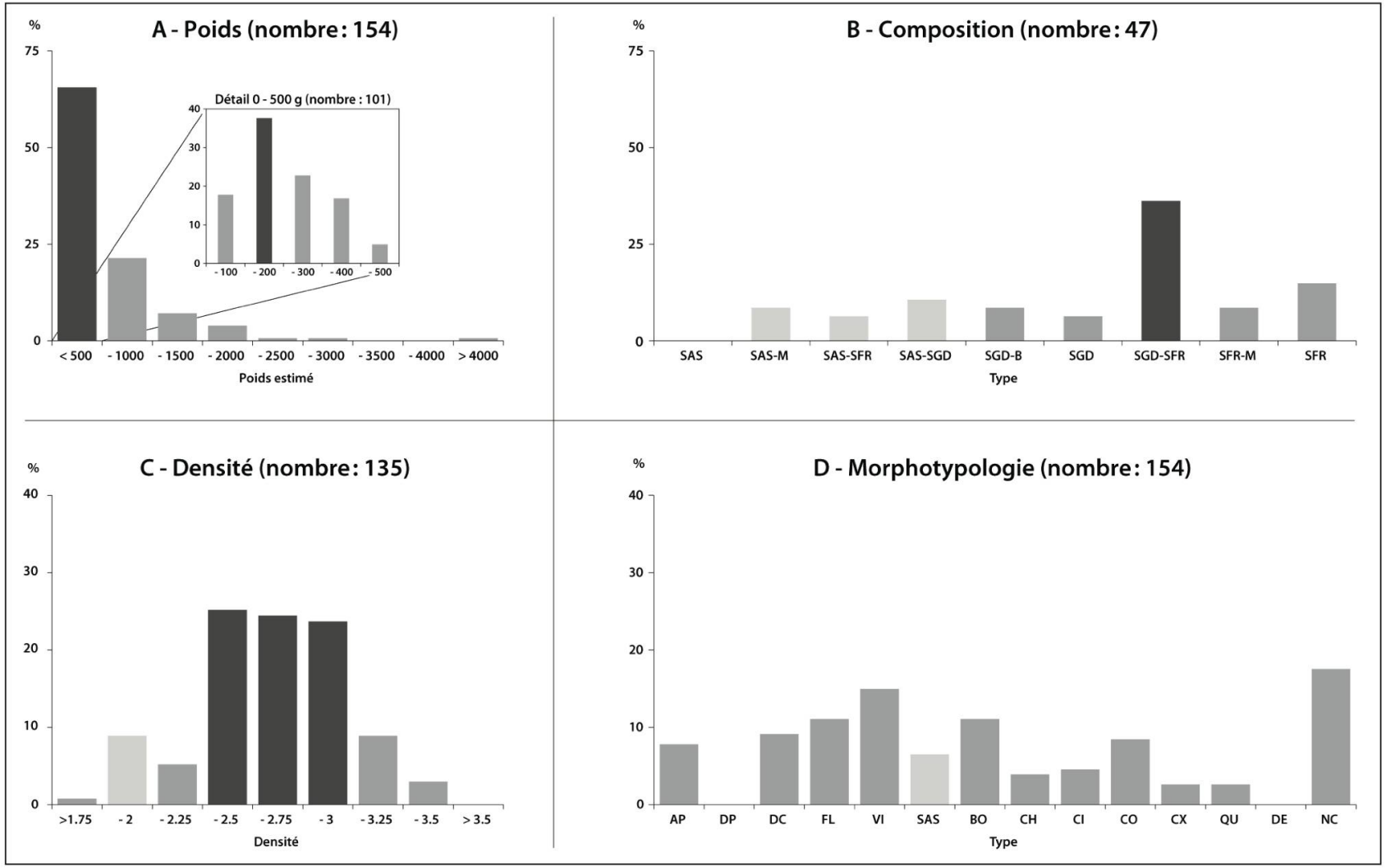

Fig. 20 : Les calottes de Chevenez-Lai Coiratte, synthèse des données archéologiques.

Chevenez-Lai Coiratte est l'unique exemple, parmi les quatre ateliers en question, à livrer un nombre significatif d'individus dont les valeurs de densité sont très basses : quatre pièces sur dix ont une mesure entre 1,5 et 2,5. A titre de comparaison, une seule pièce de DEV-CTT affiche une densité inférieure à 2,25.

En corollaire de ces résultats, on relève que la plus grande partie du corpus est composée de petites calottes (deux tiers d'entre elles pèsent moins de 500 g, et un quart entre 100 g et 200 g). Lai Coiratte est également le seul site à présenter des calottes avec une composante évidente de SAS (env. un quart, fig. 20b) et par conséquent des calottes de type SAS (fig. 20d). Ce contexte est tout à fait inédit au Haut Moyen Age dans le domaine de la sidérurgie.

La classification des scories de réduction est basée sur celle élaboré par V. Serneels à la suite de l'étude de Boécourt-Les Boulies pour l'ensemble de la sidérurgie ancienne en Suisse romande (Serneels, V. 1993). Dans le processus de réduction, il est possible de distinguer les scories qui se forment et se déposent à l'intérieur du fourneau de celles qui coulent hors du fourneau : les premières sont nommés scories internes, les secondes, scories coulées. Le degré de porosité, la couleur, ainsi que la part de fer (ou d'oxydes de fer) contribuent à leur différenciation. Il s'agit donc d'un classement morphotypologique, complété par des analyses chimiques.

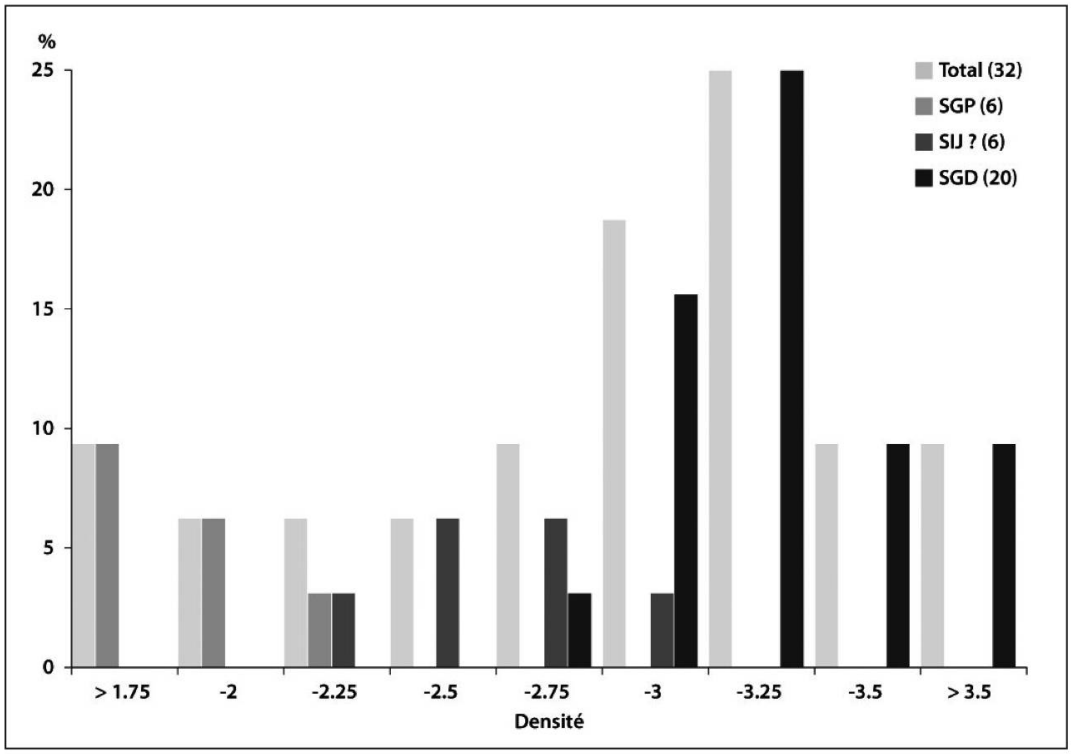

Fig. 21 : Scories coulées issues de la réduction, de Chevenez-Lai Coiratte. Répartition par densité et morphotypologie.

Dans les ateliers médiévaux qui ont livré des fourneaux fonctionnant selon la méthode directe, on distingue des scories grises denses (SGD), des scories riches en fer (SRF), des scories vitreuses noires (SVN), des scories intermédiaires jaunes (SIJ) et enfin des scories grises poreuses (SGP). Les travaux menés sur la réduction dans le district du Jura central suisse ont démontré qu'au Haut Moyen Age les scories grises denses sont les scories coulées de type dominant et assez homogène (CAR 88). L'étude du site de Lai Coiratte confirme de toute évidence cette observation.

En ce qui concerne les scories riches en fer, elles varient davantage et se trouvent sous différentes formes, suivant le procédé de réduction mis en œuvre : il peut s'agir d'une scorie interne qui s'est formée dans le fourneau à proximité de l'éponge de fer, d'une scorie coulée riche en fer ou, comme c'est le cas dans l'atelier de Lajoux-Envers des Combes (Bas Moyen Age), d'une véritable scorie d'épuration (Eschenlohr, L. 2012). Dans le Jura, le type vitreux noir est surtout présent dans les sites du Bas Moyen Age. Le type intermédiaire jaune se rencontre dans les ateliers datant du début et de la fin du Moyen Age. Quant aux scories grises denses et poreuses, la première phase d'étude des scories coulées de Lai Coiratte a permis leur identification.

La densité de scories coulées issues de la phase productive du fer – réduction du minerai – a aussi été mesurée sur un échantillon cohérent. L'objectif était de déterminer si les scories grises denses pouvaient par ce biais être distinguées des scories grises poreuses[18]. Le résultat est parlant : la densité des scories grises poreuses varie entre 1,6 et 2,2 environ, celle des scories denses oscille entre 2,7 et 3,8 (fig. 21). La majorité des mesures relatives aux scories poreuses se situe en dessous de 2 tandis que celles des scories denses sont proches de 3, voire supérieures ; les deux groupes se différencient clairement et un risque de confusion entre eux est faible.

En revanche, la classification s'avère un peu plus complexe pour les scories du type intermédiaire jaune, qui se distinguent macroscopiquement par leur couleur et par une porosité moyenne située entre celle des poreuses et celle des denses : ce groupe semble avoir été identifié lors de la seconde phase d'étude des scories coulées. Sans analyses chimiques, cette attribution ne peut pour l'instant pas être confirmée. Il convient toutefois de garder à l'esprit que les scories grises denses sont de loin les plus fréquentes dans cet atelier.

Pour comparaison, la densité de quelques coulures de la dernière coulée de Boécourt-Les Boulies a été mesurée (fig. 10). Quelle nouveauté apporte ces deux séries de mesures de densité ? Les réflexions conclusives tenteront de répondre à cette interrogation.

	Minerai+	Paroi+	Cendre =	Total	Scorie +	Métal	Rendement %
Teneur en Fe (100 kg de minerai)	58	1	0.02		33	27	46
pour 100 kg de minerai	100	20	2		83	27	
g de matériau	121	24	2		100	33	
Variable	a = 1.208	b = 0.2439	c = 0.0212				
Si	4.2	7.8	0.08	12.07	12.07		
Al	4.6	1.9	0.03	6.54	6.54		
Fe	70.7	1.7	0.02	72.50	39.93	33	46
Ti	0.25	0.14	0.001	0.38	0.38		
Mn	0.13	0.03	0.02	0.19	0.30		
Mg	0.03	0.20	0.14	0.37	0.21		
Ca	0.16	0.16	0.91	1.23	1.23		
Na	<	0.10	0.01	0.11	<		
K	0.02	0.47	0.19	0.68	0.72		
P	0.35	0.04	0.03	0.42	0.22	0.2	
Zr	121	137	2	260	278		
Y	97	15	1	113	134		
Sr	<	24	16	40	56		
Rb	<	44	5	49	<		
Ba	<	103	23	126	300		
V	808	39	0.4	847	879		
As	170	<	<	170	<	0.02	
Zn	242	<	37	279	66		
Cu	<	<	5	5	<		
Ni	162	18	0.5	180	<	0.02	
Cr	202	24	0.7	227	245		
Mo	107	<	<	107	80	0.003	
Si/Al	0.9	4.0	2.7	1.8	1.8		

Fig. 22: Bilan de masse normalisé de tous les matériaux provenant de Chevenez (calculé à partir des valeurs moyennes des scories de réduction et du minerai pisolithique).

	Minerai 1+	Minerai 2+	Paroi +	Cendre =	Total	Scorie +	Métal	Rendement %
Teneur en Fe (100 kg de minerai)	27	35	0.4	0.0		15	48	77
pour 100 kg de minerai	47	53	5	3		36	48	
g de matériau	128	147	14	9		100	131	
Variable	a=1.275	b=1.465	b=0.137	c=0.009				
Si	4.5	3.2	4.4	0.04	12.1	12.1		
Al	4.8	0.6	1.1	0.01	6.5	6.5		
Fe	75	96	1.0	0.01	171.3	39.9	131	77
Ti	0.26	0.03	0.08	0.001	0.37	0.38		
Mn	0.14	0.07	0.02	0.01	0.24	0.30		
Mg	0.03	0.09	0.11	0.06	0.30	0.21		
Ca	0.17	0.27	0.09	0.39	0.92	1.23		
Na	<	<	0.06	0.003	0.06	<		
K	0.02	0.08	0.26	0.08	0.45	0.72		
P	0.37	0.22	0.02	0.01	0.63	0.22	0.41	
Zr	128	<	77	1	206	278		
Y	140	<	8	0	149	134		
Sr	<	<	13	7	20	56		
Rb	<	<	25	2	27	<		
Ba	<	<	58	10	68	300		
V	852	443	22	0	1318	879		
As	179	1108	<	<	1287	<	1300	
Zn	256	517	<	16	788	66		
Cu	<	<	<	2	2	<		
Ni	171	2882	10	0	3063	<	3000	
Cr	213	44	14	0	271	245		
Mo	113	296	<	<	408	80	330	
Si/Al	0.9	5.4	4.0	2.7	1.8	1.8		

Fig. 23: Bilan de masse normalisé de tous les matériaux provenant de Chevenez, calculé à partir des valeurs moyennes des scories de réduction, du minerai pisolithique (1) et d'un minerai indéterminé, trouvé sur place (2).

4.3 Bas fourneau et forges : bilan de masse et calcul de rendement

Le fait d'inclure la cendre de charbon de bois actuel dans le bilan de masse assure l'apport de calcium qui sinon manquerait dans l'équation. Les résultats de ce bilan sont assez étonnants (fig. 22) : lors de la réduction de 100 kg de minerai, 20 kg de paroi de bas fourneau fondent (pour seulement 14 kg à Boécourt, fig. 12). Autrement dit, si l'on admet, comme à Boécourt, que par opération de réduction sont produits 40 kg de scories environ, ce sont approximativement 10 kg de paroi de four qui participent au processus de formation de la scorie.

Il est aussi possible de prendre en compte, pour résoudre cette équation, le minerai trouvé sur place, dont la détermination géologique reste floue et la composition chimique diffère beaucoup de celle du minerai pisolithique (fig. 23). Si l'on réduit un mélange de ces deux minerais, le rendement de l'opération s'accroît fortement, tandis qu'à l'inverse, la proportion de paroi fondue et de scorie diminue considérablement. Toutefois, dans cette variante, il existe plusieurs solutions à cette équation.

Les types de métal identifiés à Chevenez, en particulier celui riche en phosphore et celui riche en arsenic (chap. 4.2.1), plaident en faveur de l'existence des deux procédés de réduction dans le même bas fourneau. Néanmoins, il est peu plausible qu'un rendement ait pu être aussi haut, comme le met en évidence la seconde variante.

5. Le hameau de Courtedoux-Creugenat

5.1 Faits connus

L'étude du hameau de Courtedoux-Creugenat est encore à paraître (Deslex, C. et al. 2013). Nous donnons ici un bref aperçu de quelques résultats significatifs en matière de métallurgie du fer.

Les indices récoltés grâce aux analyses du métal contenu dans les scories, notamment dans les scories riches en fer et dans les déchets de forge, tendent à montrer que plusieurs types de métal ont été travaillés à Courtedoux et cela au sein d'un ou de plusieurs ateliers de forge. L'un de ces types présente de nombreuses analogies avec le type DEV-CTT. Un autre se distingue par sa teneur élevée en cuivre et en antimoine, mais son origine ne peut pas encore être identifiée sur la base de nos connaissances actuelles.

Même si nous savons que les métallurgistes de Courtedoux-Creugenat ont nettoyé du métal brut et élaboré des objets à partir de ce même métal, il n'est pas aisé de percevoir la nature exacte de l'activité métallurgique qui s'y est déroulée. Plusieurs facteurs contribuent à nous renvoyer une image floue : les limites de la zone de fouille, la détérioration constante des vestiges par l'érosion et l'origine inconnue du métal travaillé sur place (étant donné que nous ne connaissons pas non plus l'origine d'un des minerais qui a servi à produire certains morceaux de ce métal).

Il semble toutefois certain qu'à la différence des artisans du hameau de Develier-Courtételle, ceux de Courtedoux-Creugenat ont fabriqué des objets métalliques en se limitant aux besoins des habitants, sans véritable production excédentaire. Dans le matériel scorifié du site ajoulot, seuls deux types de calottes dominent : la composition de l'un des deux est très homogène, marque évidente d'une spécialisation du travail, exécuté selon un procédé toujours similaire. Il s'agirait donc d'une production ciblée, restreinte et spécialisée, ce qui ne va pas forcément à l'encontre d'une production non excédentaire. Outre la petite taille du corpus des déchets scorifiés et métalliques, l'environnement du hameau plaide aussi en faveur de cette interprétation. Placé à une des embouchures de la cuvette de Porrentruy, le site de Courtedoux-Creugenat ne dispose, selon toute vraisemblance, ni d'un bassin d'approvisionnement en matière première métallique, tel que c'est le cas dans la vallée de Delémont, ni d'un bassin démographique permettant d'écouler une éventuelle production excédentaire. Notons aussi qu'il existe d'autres habitats du Haut Moyen Age aux alentours de Porrentruy qui recèlent des traces d'activités métallurgiques mais dont la vision d'ensemble fait encore défaut.

Quant au rôle de cet établissement dans le contexte régional, tel que les déchets métallurgiques et le mobilier métallique nous permettent de le percevoir, il en sera question dans l'étude du site proprement dite (CAJ 33). Pour l'heure, il semble probable que le hameau de Courtedoux-Creugenat entretenait des contacts commerciaux avec la vallée de Delémont.

5.2 Du nouveau au sujet du métal et des produits issus de la forge

A Courtedoux, les pièces analysées de la catégorie scories riches en fer sont plus grandes, comparées à celles des autres sites (chap. 2, 3 et 4) : cinq fragments d'éponge, constitués surtout ou exclusivement de métal et qui pèsent entre 75 et 220 g ; neuf déchets de forge de petite taille et composés d'un métal entièrement forgé ; quatre couteaux et deux ciseaux, sélectionnés parce que ce type d'outils a souvent été fabriqué dans les forges de Develier-Courtételle (il s'agissait de vérifier si, à Courtedoux, des objets métalliques importés avaient été utilisés) (fig. 24).

% masse	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	CaO	K_2O	TiO_2	MnO	FeO	SiO_2/Al_2O_3	CaO/K_2O
13 Eponge de fer	0.5	13	31	<	4.3	1.8	0.9	1.4	53	2.3	2.4
15 Eponge de fer	0.5	8.1	28	1.0	8.3	1.5	0.5	0.7	50	3.5	5.6
17 Eponge de fer	0.5	17	38	0.7	5.7	2.2	1.2	1.7	47	1.9	2.7
19a Déchet de forge	0.7	4.4	39	2.8	1.6	1.5	0.5	<	50	9.1	1.2
19b Déchet de forge	1.9	10	41	3.1	20	2.4	0.9	<	19	4.0	16
20 Déchet de forge	1.3	9.6	43	1.5	5.6	6.3	<	<	36	4.5	1.4
22 Déchet de forge	<	4.1	23	1.0	6.4	1.6	<	0.7	66	5.8	5.9
25 Déchet de forge	<	6.0	17	5.1	1.6	<	<	<	76	3.2	-
26 Déchet de forge	1.0	12	53	3.5	6.5	4.5	0.8	<	25	4.7	1.5
28 Produit fini	1.3	6.2	37	1.1	7.9	3.4	<	<	44	6.7	2.5
31 Produit fini	0.8	6.3	31	3.2	7.6	2.0	<	<	52	5.1	3.8
33 Produit fini	<	2.2	17	6.7	0.8	1.1	<	0.7	74	9.5	0.7
18 Déchet de forge	0.6	3.4	25	3.0	16	1.3	<	<	52	8.1	13
21a Déchet de forge	<	<	66	<	<	<	<	<	36	-	-
21b Déchet de forge	1.8	8.1	58	0.4	18	5.5	<	<	9.4	7.2	3.3
24 Déchet de forge	0.9	3.9	36	2.8	3.9	1.9	<	<	53	9.7	2.1
27 Produit fini	0.7	6.1	31	3.5	6.9	2.1	<	<	56	5.1	3.4
29a Corps	<	1.7	26	3.1	1.2	0.6	<	<	66	21	2.2
29b Corps	0.6	3.5	29	6.0	5.5	1.6	<	<	54	8.8	3.3
30 Produit fini	0.8	2.0	27	1.2	4.5	1.2	<	0.6	62	9 / 100	5.4 / -
32a Corps	0.6	5.5	28	4.4	3.0	1.8	<	<	61	5.1	1.6
34 Produit fini	1.0	5.6	34	2.5	6.9	2.0	<	<	47	6.3	3.5
23 Déchet de forge	2.3	5.8	32	1.7	9.8	2.0	0.6	5.3	40	5.9	4.8
29c Lame	1.3	8.0	53	1.6	11	3.5	0.7	5.6	19	6.7	3.3
32b Lame	1.4	7.6	69	<	6.8	3.6	<	7.7	5.4	9.4	2.0

Fig. 24: Composition chimique des inclusions de scorie et de la scorie agglutinée au métal provenant de déchets de forge et d'objets métalliques. Gris foncé: rapport SiO_2/Al_2O_3 partiellement ou globalement bas; gris clair: teneur élevée en MnO. Les numéros renvoient au catalogue du CAJ 33.

Les analyses de Courtedoux suivent les mêmes critères établis pour les trois sites précédents. Elles ont permis d'interpréter avec davantage de clarté la composition des inclusions de scorie, présentes dans toutes les éponges étudiées qui ne sont pas en fonte (cat. 13, 15 et 17, CAJ 33). Leur texture est caractérisée par de l'hercynite, de la wustite et de la fayalite dans une matrice vitreuse. La présence de wustite est probablement en lien avec l'étape de l'épuration (cat. 15). Leur composition est riche en alumine, ce qui a pour conséquence que le rapport SiO_2/Al_2O_3 est bas.

Fait unique dans les sites étudiés, la scorie présente dans les éponges analysées a une teneur en manganèse avoisinant 1%. C'est aussi le cas, dans une moindre mesure, dans certains déchets de forge et objets finis. Un déchet (cat. 23) et deux lames de couteau (cat. 29c et 32b) contiennent des inclusions de scories avec des teneurs sensiblement plus élevées en MnO (5-8%), ce qui révèle l'utilisation d'un minerai riche en manganèse dont l'origine n'est assurément pas jurassienne.

En revanche, cinq déchets de forge et trois produits finis (fig. 25, en gris foncé) dont le rapport SiO_2/Al_2O_3 est en général bas peuvent être rattachés sans autre à la réduction du minerai de fer régional. Dans quelques

Type d'objet	Ni/Co	Cr	Mn	P	Co	Ni	Cu	As	Mo	Ag	Sn	Sb	Attribution
16 Eponge de fer	3.1	10	5	1000	640	2020	90	1400	n.d.	5	20	n.d.	DEV-CTT
21 Déchet de forge	2.6	<	10	900	600	1300	50	800	50	<	30	5	DEV-CTT
26 Déchet de forge	2.4	<	3	1900	400	1000	200	700	90	<	30	20	DEV-CTT
27 Produit fini	2.7	<	<	2000	580	1490	110	1720	110	<	30	20	DEV-CTT
31 Produit fini	2.8	20	30	1000	500	1500	90	1800	70	<	<	20	DEV-CTT
25 Déchet de forge	2.0	<	<	2000	800	1500	380	1200	120	<	30	40	Type Cu
18 Déchet de forge	4.3	<	5	<	940	4050	1000	11000	n.d.	<	n.d.	n.d.	Type As
19 Déchet de forge	7.9	<	<	200	100	1000	40	6000	1200	<	30	10	Type As
24 Déchet de forge	7.5	<	<	3000	70	600	150	4000	200	<	20	70	Type As
14 Eponge de fer	2.1	<	400	100	10	30	20	10	n.d.	<	n.d.	n.d.	Type Mn
23b Déchet de forge	2.8	<	200	300	40	100	90	80	5	<	30	10	Type Mn
29c Lame	0.4	20	200	200	800	300	40	100	<	<	3	5	Type Mn
32b Lame	0.6	30	500	100	110	70	3800	100	<	<	<	5	Type Mn
33 Produit fini	1.5	10	20	600	100	200	20	40	<	<	<	<	Type P
13 Eponge de fer	3.3	5	5	700	700	2291	30000	1200	n.d.	<	20	n.d.	jurassien
15 Eponge de fer	2.1	<	5	1500	600	1400	12000	1200	n.d.	10	20	n.d.	jurassien
17 Eponge de fer	3.5	5	10	900	720	2540	29000	1700	n.d.	10	20	n.d.	jurassien
20 Déchet de forge	4.3	<	<	600	200	800	110	600	140	<	30	10	jurassien
22 Déchet de forge	2.1	<	10	<	220	460	30	70	10	<	30	<	jurassien
28 Produit fini	7.2	<	<	<	300	2000	110	1700	140	<	20	20	jurassien
23a Déchet de forge	2.3	<	10	200	70	170	1300	1000	10	10	150	430	
29a Corps 1	1.4	20	20	1700	400	500	20	70	<	<	<	<	
29b Corps 2	3.1	20	20	1300	60	200	30	300	10	<	<	<	
30 Produit fini	0.7	20	30	1100	400	300	30	80	5	<	2	2	
32a Corps	5.6	20	30	2000	50	250	40	100	10	<	<	22	
34 Produit fini	4.1	10	20	800	700	2900	300	1800	200	<	3	50	

Fig. 25: Composition chimique du métal dans les pièces métalliques de Courtedoux. En gris: les objets fabriqués par corroyage, cat. 32 étant un damas torsadé. DEV-CTT et type Cu sont les types de métal démontrés à DEV-CTT, les types As et P proviennent de Chevenez, jurassien désigne un métal dont la composition de scorie a un rapport SiO_2/Al_2O_3 bas. Les numéros renvoient au catalogue du CAJ 33.

cas, la cendre de charbon de bois a fortement influencé la composition de la scorie, comme le montre le rapport élevé CaO/K_2O.

La composition des pièces restantes est interprétable quand un lien est possible avec celle du type de métal DEV-CTT (cat. 21 et cat. 27). Les inclusions composées exclusivement de quartz (SiO_2) et de métal oxydé (FeO) confirment qu'à Courtedoux également, du sable a servi comme anti-oxydant lors du forgeage (cat. 21). Le rapport globalement élevé de SiO_2/Al_2O_3 étaie encore cette interprétation (cat. 21, cat. 33 et partiellement cat. 19 et cat. 30).

La composition chimique du métal de Courtedoux réserve quelques surprises (fig. 25): le type de métal prédominant des éponges est caractérisé par une très haute teneur en cuivre (1-3% Cu). Ce métal doit être d'origine régionale, vu la composition de la scorie qu'il contient, mais son absence dans les déchets de forge et les objets finis ne permet pas d'affirmer qu'il a été transformé. Il en résulte que ces fragments d'éponge sont des ratés, comme le sont ceux de Boécourt en acier à phosphures.

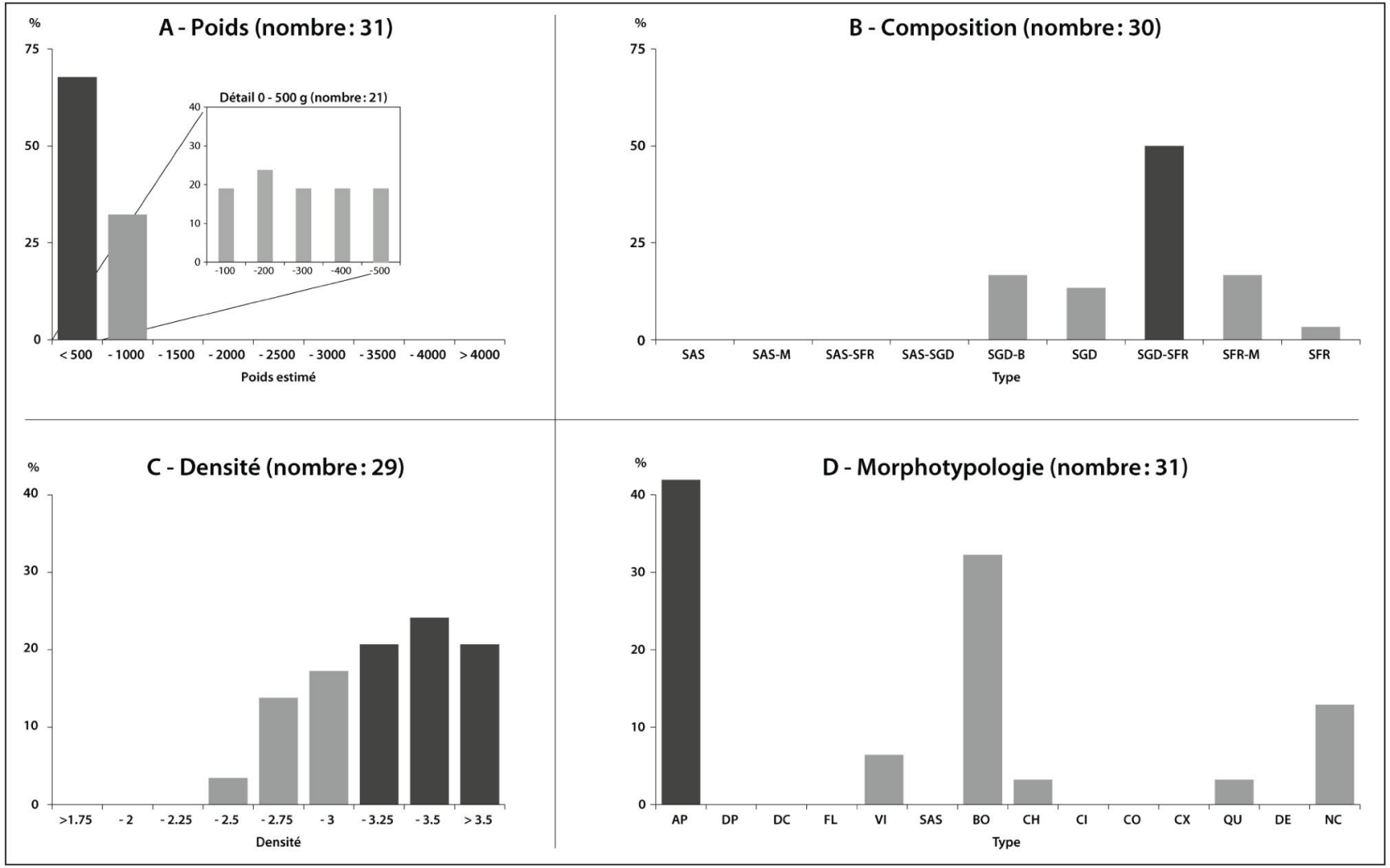

Fig. 26 : Les calottes de Courtedoux-Creugenat, synthèse des données archéologiques.

Le métal le mieux attesté à Courtedoux est celui du type DEV-CTT et de son sous-type riche en cuivre : il se décèle dans des éponges, des déchets et deux produits finis. Arrivent ensuite deux types de métal, riche en arsenic ou en phosphore, et d'origine régionale (vu la composition de la scorie), qui ont aussi été retrouvés à Chevenez-Lai Coiratte (chap. 4.2). Comme dans la scorie, le type riche en manganèse apparaît aussi dans le métal, dont l'origine régionale n'est démontrée à ce jour dans aucun site jurassien.

Quatre déchets de forge sur neuf, tous en métal d'origine jurassienne, comportent une structure métallique qui révèle l'emploi de la technique par corroyage, laquelle est exceptionnelle et ne se trouve ni à Develier-Courtételle, ni à Chevenez-Lai Coiratte. A ces déchets est associé un couteau dont la tige est façonnée de la même manière. En conclusion, les forges de Courtedoux semblent s'être spécialisées dans la fabrication de couteaux selon la technique par damas en couches à partir d'un métal dont la composition est essentiellement du type DEV-CTT.

5.3 Calottes : données archéologiques complémentaires

Toutes les calottes trouvées à Courtedoux pèsent moins d'un kilo et deux tiers d'entre elles, 0,5 kg maximum. Ces pièces de petite taille se répartissent de manière régulière entre 0 et 500 g (fig. 26a). Malgré leur faible poids, la densité de ces calottes est très élevée : deux tiers sont au-dessus de 3,0, ce qui est un cas unique au sein des quatre ateliers jurassiens (fig. 26c). La classification des pièces par composants montre que 50 % d'entre elles appartiennent au groupe SGD-SFR et qu'aucune composante argilo-sableuse n'est présente (fig. 26b). Toutefois, les calottes avec bourrelet et celles avec vitrification possèdent cette composante (fig. 26d). Quant aux calottes aplaties, souvent riches en fer, elles constituent le type dominant et leur composition explique la forte densité relevée.

6. Essai de synthèse

L'exploitation comparative systématique des données disponibles pour les quatre sites sidérurgiques majeurs du district jurassien au Haut Moyen Age a mis en évidence des aspects encore méconnus. A Boécourt, l'existence de deux zones de chaleur différentielle lors des opérations de réduction a été démontrée : l'une favorise la formation du métal aux alentours de 1400°C, près de la tuyère latérale, tandis que l'autre permet l'écoulement de la scorie à 1200°C environ, sous la tuyère frontale. En outre, la

composition de l'acier à faible teneur en carbone produit dans les bas fourneaux de cet atelier est désormais mieux définie. Notons que cet acier n'a pas été utilisé dans les trois autres sites. Quant à la dernière coulée de scories trouvée en place, elle n'est pas représentative des scories grises denses de réduction, typiques au Haut Moyen Age dans le Jura.

Dans les forges du hameau de Develier-Courtételle, dont la production est d'importance suprarégionale, le type de métal fabriqué a été défini avec davantage de précision, de même que son sous-type riche en cuivre. Sa composition variant fortement en comparaison avec celle du métal de Boécourt et celle du sous-type, on suppose que le type DEV-CTT regroupe du métal provenant de plusieurs ateliers productifs jurassiens. Ce métal peut provenir d'au moins vingt ateliers de réduction différents, datés du Haut Moyen Age, voire de soixante autres peut-être attribuables à la même période et localisés dans la vallée de Delémont, le Val Terbi ou le Grand-Val (Eschenlohr, L., 2001, 92). L'analyse des inclusions de scorie n'a toutefois pas permis d'établir leur lien avec les scories de réduction. En ce qui concerne les objets fabriqués, ils ont été protégés de l'oxydation lors du forgeage et notamment du soudage avec du sable. En effet, plus les pièces comportent des traces de transformation, plus les inclusions de scorie sont enrichies de composants (argilo-)sableux. La fabrication de couteaux selon la technique par damas en couches à partir d'une éponge de fer a nécessité de très nombreuses étapes successives de forgeage. De tels outils constituent les produits de haut de gamme issus de ces ateliers.

A Chevenez-Lai Coiratte, le type de métal prédominant demeure indéterminé, notamment parce que les déchets de forge y sont rares. Deux autres, l'un riche en phosphore et l'autre en arsenic, se distinguent toutefois, mais leur importance est probablement moindre à l'échelle du district sidérurgique. On peut se demander si le travail des artisans de Chevenez a été consacré de manière prioritaire à l'épuration des éponges de fer d'origine diverse, plutôt qu'à leur production par réduction sur place. En effet, l'étape de l'épuration est attestée pour tous les types de calottes, alors qu'à Develier-Courtételle, elle n'est qu'accessoire. Cette spécialisation expliquerait la rareté des déchets issus du forgeage final du métal.

L'atelier de Chevenez est le seul à receler des calottes à composante argilo-sableuse évidente, ce qui pourrait également parler en faveur d'une spécialisation de l'activité métallurgique. Le réexamen des scories de réduction et le calcul de leur densité ont amené à une meilleure définition de cette catégorie de déchets, qui se répartissent en deux types (scories grises denses et scories grises poreuses). L'importance moindre de l'activité productive expliquerait, du moins en partie, leur faible quantité. Cette hypothèse pourrait être corroborée par le fait que le site est localisé en périphérie du district sidérurgique jurassien.

Le hameau de Courtedoux a livré quant à lui des traces évidentes d'activités métallurgiques spécialisées, malgré l'absence de structures de forge et le peu de déchets récoltés. A cet endroit ont probablement été fabriqués des couteaux et divers outils selon la technique par damas en couches. Les calottes, à très forte densité et riches en fer, parlent pour une production standardisée. En ce qui concerne le mobilier importé, certaines techniques de fabrication, typiques du Haut Moyen Age, ont été identifiées, notamment le soudage d'un tranchant en acier sur une lame de couteau et la confection de couteaux par damas torsadé. L'utilisation de ces techniques n'est pas avérée dans le Jura à ce stade de nos connaissances.

La diversité de la composition du métal jurassien au Haut Moyen Age surprend. Toutefois, nos analyses portent surtout sur des déchets de réduction, d'épuration ou de forgeage, qui correspondent à des morceaux de métal non utilisables et non pas à des produits voulus. C'est assurément le cas pour la grande éponge de Boécourt, pour tous les morceaux de fonte étudiés et pour les fragments d'éponge riche en cuivre de Courtedoux. En revanche, le métal de type DEV-CTT et son sous-type riche en cuivre représentent la matière brute prédominante produite dans le district à cette époque.

On ignore encore quelles transformations interviennent précisément lors de l'épuration du métal. L'expulsion de la scorie nécessite d'atteindre une température légèrement supérieure à 1200°C, afin que cette matière se liquéfie. L'éponge de fer, quant à elle, doit être chauffée à blanc pour être compactée (soudage des trous subsistant dans le métal). C'est dans cette fourchette de température que des erreurs techniques peuvent intervenir dans le processus, par exemple, la chauffe excessive du métal ou sa recuite prolongée. Il en résulte que de la fonte peut se former et que la structure du métal devient inappropriée au forgeage. Le métal ne peut être associé à l'étape de l'épuration que si la scorie qu'il contient renferme de la wustite. Or, ce minéral fait défaut dans les scories de réduction issues des bas fourneaux jurassiens.

En conclusion, ces recherches récentes mettent en évidence la spécificité des techniques maîtrisées de façon remarquable par les artisans jurassiens du Haut Moyen Age, ainsi que l'importance suprarégionale de la production sidérurgique locale. Elles lèvent davantage le voile sur une époque connue jusqu'alors surtout par ses nécropoles et ses quelques rares habitats.

Préhistorien de formation, Ludwig Eschenlohr est depuis 1991 chercheur spécialisé en paléosidérurgie, associé au CNRS, UMR 5060 Belfort-Montbéliard. Il a été pendant vingt-quatre ans collaborateur scientifique à la Section d'archéologie et de paléontologie de l'Office cantonal de la culture de la République et Canton du Jura, son mandat s'est terminé en

2012. Il dirige aujourd'hui des projets de fouilles et d'études et assume une charge de cours à l'Université de Zurich.

Préhistorienne de formation, Marianne Senn est depuis 1999 chercheuse spécialisée en archéométallurgie à l'Empa (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt ou Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche). Elle dirige depuis 2004 le Centre d'Analyse des biens culturels à l'Empa.

NOTES

[1] Cet article est la version française raccourcie d'un article à paraître en allemand dans l'annuaire 2012 de l'Archéologie suisse. Le catalogue analytique et le glossaire des termes spécifiques ne seront publiés qu'en allemand.

[2] Le lecteur intéressé trouve dans les publications mentionnées des informations spécifiques à chaque site.

[3] A cause du dépôt de matériaux inertes en provenance de la construction autoroutière, le site a disparu sous plusieurs mètres de déblais. Aujourd'hui, la topographie d'origine n'est plus visible.

[4] La grande diversité des scories de réduction du district sidérurgique jurassien, du moins concernant leur composition chimique, empêche pour l'instant de procéder à un bilan de masse valable de l'étape de postréduction.

[5] Ce qui constitue une surface trop grande pour distinguer un endroit riche en phosphures.

[6] Longueur et largeur semblables.

[7] Les deux types restants sont trop peu représentés pour fournir des données exploitables : l'un se caractérise par une sorte de quille située sur la face inférieure de la calotte (type QU), l'autre, par sa très grande densité et épaisseur (type DE).

[8] Ceci d'autant plus que, sur les dix-huit individus conservés à 50 % ou plus, quatre (22 %) n'ont pas pu être réexaminés et quatre autres ont éclaté en plusieurs morceaux en raison de leurs conditions de conservation.

[9] La densité (relative) est le rapport de la masse volumique d'un corps à celle d'un corps de référence, en l'occurrence de l'eau à 4°C dont la masse volumétrique est de 1. Un objet qui flotte sur l'eau a une densité inférieure à 1, un objet plus lourd en a une supérieure à 1. La densité se calcule à partir du poids sec de l'objet divisé par ce même poids, moins le poids de cet objet dans l'eau.

[10] Pour les abréviations, se référer à la fig. 8.

[11] La densité de trois des cinq plus grandes coulures individualisées n'a pas pu être mesurée : la pièce cat. 403 a été détruite en 1990 à des fins analytiques ; cat. 414 n'est pas disponible et cat. 404 est introuvable.

[12] La classification morphotypologique s'est faite indépendamment des densités mesurées.

[13] Un enregistrement complet des scories coulées de Boécourt suivant les critères utilisés actuellement n'étant plus possible (la grande majorité des scories n'a pas été conservée), on ignore si les types intermédiaires ± SGP et ± SGD ont pu faire partie du type scorie intermédiaire jaune.

[14] Cette étude essaie de donner la définition archéologique et métallographique de ce que l'on entend par métal recyclé.

[15] Voir aussi à ce sujet Serneels, V., 2002, 15, qui a analysé de la cendre moderne.

[16] Dans l'oppidum de Manching, divers objets sont fabriqués de cette façon exclusivement en métal recyclé (Schwab, R./Senn, M., 2008).

[17] Cela représente 91 % environ du corpus total : en effet, six calottes n'ont pas été mesurées parce qu'elles ont éclaté et une, parce que son poids était trop important. Douze pièces enfin n'ont pas été retrouvées dans l'inventaire.

[18] Les mesures du faciès poreux proviennent du catalogue du CAJ 27, cette catégorie ayant déjà été archivée. Pour le faciès dense, l'échantillon a augmenté de cinq à vingt pièces.

BIBLIOGRAPHIE

CAJ : Cahier d'archéologie jurassienne

Anderson, T. / Agustoni, C. / Duvauchelle, A. et al. (2003) Des artisans à la campagne. Carrière de meules, forge et voie gallo-romaine à Châbles (FR). Archéologie Fribourgeoise / Freiburger Archäologie 19, Fribourg.

Buchwald, V.F. (2001) Ancient Iron and Slags in Greenland. Meddelelser om Grønland, Man and Society 26. Copenhagen, Danish Polar Center.

Buchwald, V.F. / Wivel, H. (1998) Slag Analysis as a Method for the Characterization and Provenancing of Ancient Iron Objects. Materials Characterization 40, 73-96.

Deslex, C. et al. (2013) Courtedoux-Creugenat. Un hameau du Haut Moyen Age en Ajoie. CAJ 33, Porrentruy.

Devos, W. / Senn-Luder, M. / Moor, Ch. / Salter, Ch. (2000) Laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) for Spatially resolved trace analysis of early-medieval iron finds. Fresenius, Journal of Analytical Chemistry, 366, 873-880.

Dillmann, P. / L'Héritier, M. (2007) Slag inclusions analyses for studying ferrous alloys employed in French medieval buildings : supply of materials and diffusion of smelting processes. Journal of Archaeological Science, 34, 1810-1823.

Eschenlohr, L. / Serneels, V. (1991) Les bas fourneaux mérovingiens de Boécourt, Les Boulies (JU, Suisse). CAJ 3, Porrentruy.

Eschenlohr, L. (2001) Recherches archéologiques sur le district sidérurgique du Jura central suisse. CAR 88, Lausanne.

Eschenlohr, L. / Friedli, V. / Robert-Charrue Linder, C. / Senn, M. (2007) Develier-Courtételle, un habitat rural mérovingien. 2. Métallurgie du fer et mobilier métallique. CAJ 14, Porrentruy.

Eschenlohr, L. (2012) Un atelier de sidérurgistes : le bas fourneau de Lajoux, Envers des Combes (JU), fouilles 2006 à 2008, in Actes 2011 de la Société jurassienne d'Emulation, 123-152.

Eschenlohr, L. sous presse in Jecklin-Tischhauser, U. / Frascoli, L. / Manuel Janosa, M. et. al., 2012. Die Burg und die Herren von Marmels - Burgenforschung im bündnerischen Oberhalbstein. Schweizer Beiträge zur Kulturgeschichte und Archäologie des Mittelalters, Band 40, Basel.

Eschenlohr, L. en préparation (manuscrit déposé) in Schucany, C. / Winet, I. (2013) Cham-Hagendorn (Kanton Zug). Schmiede – Heiligtum – Wassermühle – Schmiede. Ein Ort mit wechselvoller Geschichte römischer Zeit am Wasser. Antiqua 59, Basel.

Evéquoz, E. / Eschenlohr, L. / Elyaqtine, M. et al. (2012) Occupations du Haut Moyen Age à Chevenez : Inhumations et atelier métallurgique. Les sites de Lai Coiratte, Combe Varu et Combe En Vaillard. CAJ 27, Porrentruy.

König, K. (2011) Finsterhennen, Uf der Höchi. Eine hochmittelalterliche Wüstung im Berner Seeland, Bern.

Kronz, A. (1997) Phasenbeziehungen und Kristallisationsmechanismen in fayalitischen Schmelzsystemen – Untersuchungen an Eisen- und Buntmetallschlacken. Dissertation, Mainz.

Kronz, A. (2007) Archäometallurgische Untersuchungen an Eisenfunden und Schlacken der Schnippenburg und Erzen aus der Umgebung. In: Möllers, S. Die Schnippenburg bei Ostercappeln, Lkr. Osnabrück. Ein Zentralort mit Kultplatzfunktion im nordwestlichen Ausläufer der Mittelsgebirgszone? In: Keltische Einflüsse im nördlichen Mitteleuropa während der mittleren und jüngeren vorrömischen Eisenzeit (Hrsg. Möllers, S., Schlüter, W., Sievers, S.). Kolloquien zur Ur- und Frühgeschichte, Band 9 (Bonn), 2-45.

Pelet, P.-L. (1973) Une industrie méconnue. Fer Charbon Acier dans le Pays de Vaud. Bibliothèque Historique Vaudoise 49, Lausanne.

Pelet, P.-L. (1993) Une industrie reconnue: Fer Charbon Acier dans le Pays de Vaud. CAR 60, Lausanne.

Schwab, R. / Senn, M. (2008) Recycling von Alteisen. Berliner Beiträge zur Archäometrie, Bd. 21, 207-226.

Senn Bischofberger, M. (2005) Das Schmiedehandwerk im nordalpinen Raum von der Eisenzeit bis ins frühe Mittelalter. Internationale Archäologie: Naturwissenschaft und Technologie, Rahden / Westf.

Senn, M. / Schreyer, S. (en préparation) An urban fine smithing quarter in the oppidum of Rheinau (canton Zurich, Switzerland). In: Pernicka, E., Schwab, R. (eds.), Under the volcano, Proceedings of the International Symposium on the Metallurgy of the European Iron Age held in Mannheim, Germany, 20-22 April 2010. Forschungen zur Archäometrie und Altertumswissenschaft 5, Rahden / Westf.

Serneels, V. (1993) Archéométrie des scories de fer. Recherches sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale. CAR 61, Lausanne.

Serneels, V. (2002) Analyses chimiques des matières premières et des produits de l'opération de réduction dans le four basque de Agorregi. In: Urteaga, M. 2002. La ferrería y los molinos de Agorregi. II Arqueología experimental, 93-119.

Serneels, V. (2011) Scories. In: König, K. 2011. Finsterhennen, Uf der Höchi. Eine hochmittelalterliche Wüstung im Berner Seeland, 124-135.

Slag Atlas (1995) 2nd Edition. Ed. by Verein Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh). Düsseldorf.