Zeitschrift: Actes de la Société jurassienne d'émulation

Herausgeber: Société jurassienne d'émulation

Band: 114 (2011)

Artikel: Un atelier médiéval de sidérurgistes : le bas fourneau de Lajoux, Envers des Combes (JU), fouilles 2006 à 2008

Autor: Eschenlohr, Ludwig

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-684622

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: 13.07.2025

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

Un atelier médiéval de sidérurgistes : le bas fourneau de Lajoux, Envers des Combes (JU), fouilles 2006 à 2008

Ludwig Eschenlohr

In memoriam Loux (Antoine Houlmann)

La fouille programmée d'un bas fourneau à tirage naturel a apporté un nouvel éclairage sur les activités des artisans qui ont œuvré à l'époque médiévale dans le district sidérurgique du Jura central suisse. Elle a livré des résultats d'autant plus intéressants que le site de l'Envers des Combes se trouve au cœur d'une région d'intense production de fer, sur le territoire de l'abbaye de Bellelay. Les datations dendrochronologiques de charbons de bois ont permis pour la première fois de mettre en évidence des phases d'abattage cycliques en lien avec le charbonnage. Les analyses métallographiques démontrent que trois objets métalliques mis au jour dans cet atelier ont été fabriqués à partir du métal produit sur place.

Remarque

Il était prévu initialement d'insérer cette étude dans la série des Cahiers d'archéologie jurassienne (CAJ). Toutefois, dans le contexte actuel de restructuration que connaît la Section d'archéologie et de paléontologie, ce projet de publication a été abandonné au bénéfice du présent article, afin de permettre la mise à disposition rapide des premiers résultats importants découlant de l'étude de cet atelier[1]. Un second volet, qui paraîtra dans les *Actes 2012*, développera quelques aspects spécifiques et présentera des résultats d'analyse complémentaires.

Fig. 1. Vue du site entre 1993 et 1996, avant le défrichement (butte centrale).

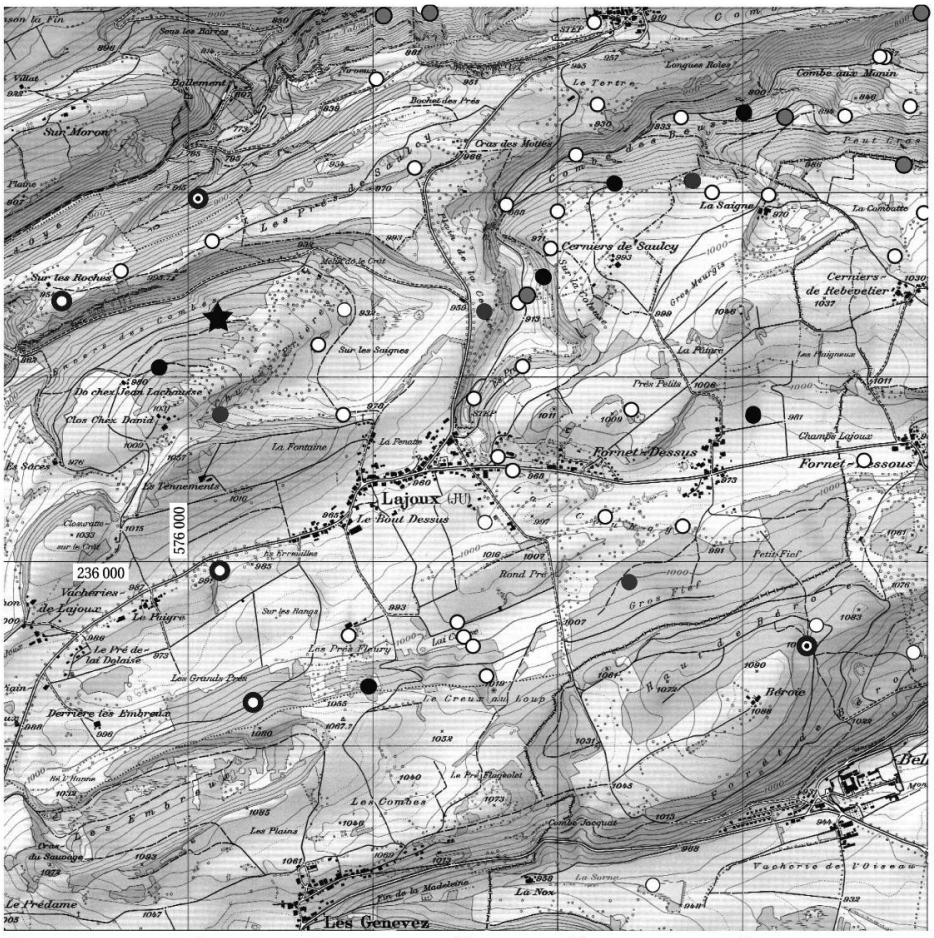


Fig. 2. Ferriers localisés et datés de Lajoux et environs (étoile : l'Envers des Combes).

Introduction

Cet atelier sidérurgique est localisé sur la commune de Lajoux dans la forêt au lieu-dit Envers des Combes, à proximité d'un chemin forestier (fig. 1). Le périmètre du ferrier[2] a fait l'objet d'un défrichement préalable en vue de la future fouilles[3]. Le sentier didactique au sujet du fer, intitulé « en marche vers le paysage », mis sur pied par la commune de Lajoux, intègre aujourd'hui la visite du site aménagé[4].

Ce site m'a été signalé pour la première fois en 1991 par Paul-Louis Pelet[5] avant le début de mes recherches sur le district sidérurgique jurassien. Cet éminent chercheur l'avait localisé déjà dans les années 1970[6]. Le Groupe d'archéologie du fer du Jura (GAF) et la commune de Lajoux qui sont à l'origine du projet de fouille m'ont ensuite mandaté pour assurer la direction scientifique de ce chantier archéologique.

Quatre raisons principales ont contribué à choisir l'Envers des Combes en vue d'une fouille programmée. La première est son contexte géographique : cet atelier se trouve dans la zone la plus riche en bas fourneaux de tout le district sidérurgique médiéval du Jura central suisse (fig. 2).

La deuxième est son contexte chronologique : la datation C^{14} d'un bon nombre de ces sites de production de fer a permis de les attribuer à une période bien définie. L'atelier de l'Envers des Combes constitue en cela un cas exemplaire, car la datation montre qu'il a été en activité durant les XIIIe et XIVe siècles, soit entre 1276 et 1395[7].

La troisième découle d'un diagnostic archéologique : l'état de conservation du site a été jugé très bon avant l'intervention.

La quatrième, enfin, est liée au fait que les résultats obtenus lors de la reconstitution expérimentale d'un bas fourneau à tirage naturel entre 1996 et 2000 par le Groupe d'archéologie du fer du Jura, actif dans le domaine depuis 1991, se sont avérés peu concluants. Ce dernier s'est donc fixé comme objectif de mieux comprendre le fonctionnement de ce type de fourneau en étudiant un spécimen archéologique bien conservé[8].

L'atelier sidérurgique de l'Envers des Combes se caractérise par une disposition apparemment simple : un ferrier à fourneau central (fig. 3). Comme son nom l'indique, le bas fourneau est généralement situé au centre d'un anneau de scories qui s'étend dans ce cas sur tout son pourtour. En lieu et place du bas fourneau central supposé, la fouille a mis en évidence une plate-forme centrale quasi quadrangulaire d'environ 25 m^2, haute de près de 2 m en bas de pente et de 0,6 m en haut de pente. Un bas fourneau complètement excentré fait partie intégrante de cette construction (fig. 4 et 5). Il sera décrit par la suite.

Cet atelier comportait plusieurs fourneaux qui ont produit une masse de déchets estimée à environ 600 m^3 : un seul d'entre eux a été dégagé. On

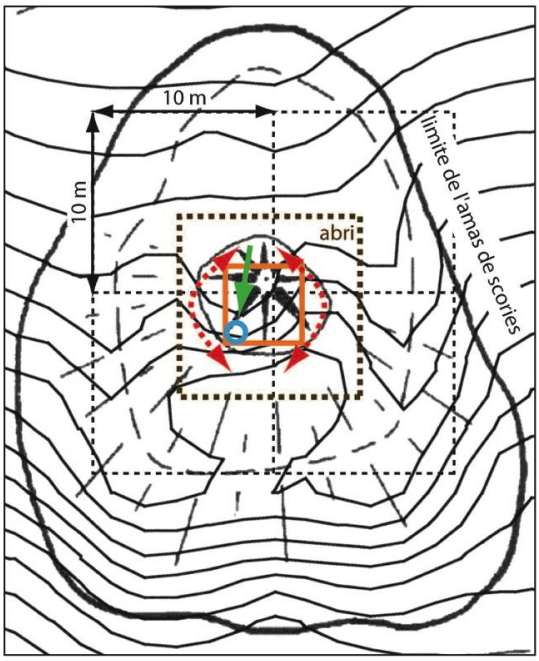


Fig. 3. Plan de l'atelier et de ses zones d'activités : bas fourneau (en bleu), plate-forme (en orange), acheminement de la charge (flèche verte), circulation entre l'aire de chargement et l'aire de travail (flèches rouges).

Fig. 4. Vue de la butte centrale sous l'abri, avant la fouille (2007).

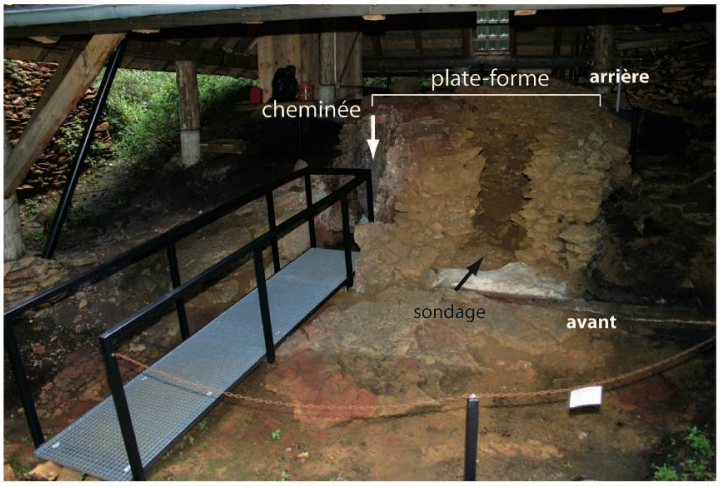


Fig. 5. Atelier de l'Envers des Combes en fin de fouille (septembre 2008).

suppose l'existence d'au moins deux autres sous l'amas actuel (voir ci-après l'étude géomagnétique). Selon toute vraisemblance, la durée de fonctionnement d'un tel atelier est assez courte : elle ne dépasserait guère un siècle. C'est en tout cas ce que semblent indiquer non seulement les données historiques qui plaident pour une exploitation intensive du minerai de fer pendant une courte période sur les terres de l'abbaye de Bellelay, mais aussi la datation archéologique, dont la plus forte probabilité se concentre dans un quart de siècle (fig. 2) [9]. Les résultats de l'étude dendrochronologique présentés ci-après obligent cependant à nuancer un tant soit peu ce premier constat.

Objectifs de la campagne de fouille

Au cours des quatre mois qu'a duré la fouille de cet atelier, des objectifs tant scientifiques que muséographiques, voire touristiques, ont orienté les travaux archéologiques[10]. Elle a comporté les étapes suivantes :

– creusement manuel d'une tranchée large de 2 m à travers l'amas de scories (dont la profondeur était estimée à 2 m au moins) ; prélèvement, classification et quantification des différents types de scories rejetées dans le ferrier ;

– documentation des alentours immédiats du fourneau : zone de travail en aval, zone de chargement à l'arrière de la cheminée – notamment en prélevant de gros morceaux de charbon de bois, en vue d'un essai de datation par dendrochronologie –, et zones de passage latérales de chaque côté de la plate-forme ;

– dégagement de la plate-forme et du fourneau situé à l'extrémité nord-est de celle-là ; consolidation de la partie friable de la paroi interne du bas fourneau, découpage de morceaux successifs dans le segment endurci et sondage au cœur de la plate-forme ;

– mise en valeur du site à l'intention des visiteurs et conservation pour les générations futures : construction d'un abri pour protéger les zones importantes de l'atelier contre les intempéries et les déprédations, tout en les maintenant visibles ; installation d'un panneau explicatif double-face agrémenté de photos, afin de permettre au visiteur de s'informer sur le site et de comprendre son importance aux niveaux régional, national et européen. A cette occasion, les deux piliers intermédiaires septentrionaux, qui gênaient passablement la visibilité des alentours immédiats de la plate-forme, ont été remplacés par des tubulures métalliques obliques prenant appui à la base des deux piliers frontaux extérieurs principaux.

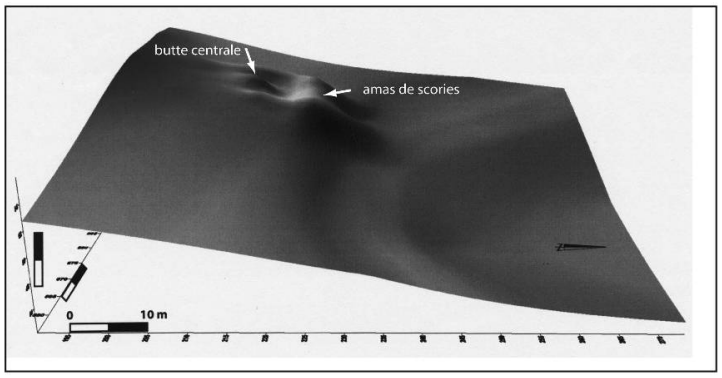


Fig. 6. Reconstitution en 3D de l'atelier.

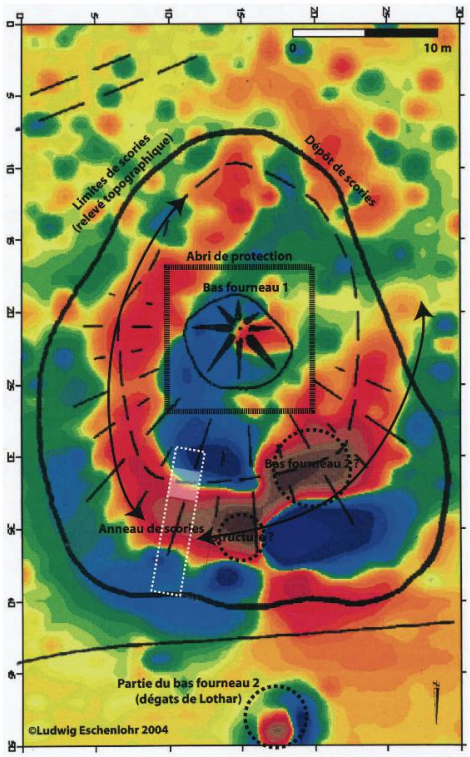


Fig. 7. Relevé magnétique situant les structures archéologiques, avec localisation de la tranchée et de la zone d'échantillonnage.

Fig. 8. Vue d'ensemble de la tranchée, où l'on aperçoit le système de stabilisation des talus.

Relevés géomagnétique et topographique

Le site de Lajoux avait déjà fait l'objet de deux relevés topographiques complémentaires dans le cadre des recherches soutenues par le Fonds national suisse de la recherche scientifique, qui ont été menées de 1993 à 2000[11]. Ils ont permis de développer un modèle de l'atelier en trois dimensions (fig. 6).

En outre, un relevé magnétique antérieur à la fouille, effectué en 2004, a eu pour but de localiser d'éventuels autres bas fourneaux recouverts par l'amas de scories et ainsi d'éviter de les couper avec la future tranchée. Ce relevé a confirmé la présence d'un bas fourneau sous la butte centrale (fig. 7). Précisons que la lecture d'un relevé magnétique s'effectue par rapport au nord magnétique (qui est généralement proche du nord géographique). Les couleurs froides (bleu) indiquent généralement une zone négative, qui contraste avec une zone positive (couleurs chaudes : rouge). L'emplacement exact de l'anomalie magnétique ainsi détectée est plus au moins proche de la limite entre ces deux zones, en fonction de l'intensité des signaux et de la profondeur de l'anomalie décelée. C'est pourquoi une marge de sécurité de l'ordre d'un mètre au moins doit être laissée autour d'une telle anomalie lorsqu'un creusement est prévu, afin d'éviter de l'endommager.

A l'Envers des Combes, les informations récoltées grâce au relevé magnétique ont été complétées par nos observations à la surface de l'amas, ce qui a notamment permis de repérer la partie supérieure de la structure appelée « bas fourneau 2 », en contrebas de l'amas, arrachée avec la souche d'un arbre tombé lors de la tempête Lothar, en décembre 1999. Une autre anomalie indique vraisemblablement un troisième bas fourneau localisé dans l'amas de scories[12].

L'amas de scories, la tranchée et le cubage

Le creusement d'une tranchée à travers l'imposant amas de scories a entraîné l'évacuation d'un volume impressionnant de matériaux durant les dix-neuf jours de fouille de juin 2006 (fig. 8). Cette tranchée, large de 2 m, atteint par endroit plus de 2 m de haut et s'étale sur 10 m de long environ. Cinq personnes en moyenne ont déplacé entre 25 et 30 m^3 de déchets métallurgiques en tout genre, ainsi que de la terre charbonneuse[13].

En premier lieu, un carroyage a été posé à l'emplacement de la future tranchée, la maille choisie étant de 2 x 2 m. Les 4 m^2 situés au sommet de l'anneau – l'endroit où la couche de scories est présumée être la plus dense – ont été décapés pour procéder à un prélèvement aussi exhaustif que possible des matériaux. Ayant constaté que les couches de scories suivaient

Fig. 9. Scories vitreuses noires (amas témoin laissé en place). Très friables, les morceaux de ce type ont une taille maximale de 15 cm.

Fig. 10. Amoncellement de scories riches en fer (témoin). Assez résistantes, leur taille varie entre 20 et 30 cm.

l'inclinaison de la forte pente perceptible en surface de l'amas, il a été rapidement décidé que les décapages suivraient tant que possible cette inclinaison. Cette étape de prélèvement a permis, à partir de 8 m^3 de déchets, d'estimer la quantité de scories présente sur le site (voir ci-après)[14]. Le très grand échantillon de scories ramassées a été trié et pesé en partie durant la fouille, en partie en août et septembre de la même année par mes soins.

L'instabilité générale du terrain, inhérente à la texture des scories, a poussé le groupe du GAF, lors de la préparation de la fouille, à mener une réflexion approfondie sur la stabilisation des profils de la tranchée : finalement, c'est le talutage qui a été retenu comme étant la technique la plus efficace[15]. Ainsi, la succession des couches, appelée stratigraphie, a pu être documentée par photographie et par relevé altimétrique des zones observées.

SVN	%	SRF	%	Terre charbonneuse	%	Paroi scorifiée	%	Divers	%	Total (kg)	%
3030	61	1120	22	750	15	83	2	9	-	4993	100

Fig. 11. Synthèse des calculs effectués (en kg) à partir de l'échantillon de déchets scorifiés.

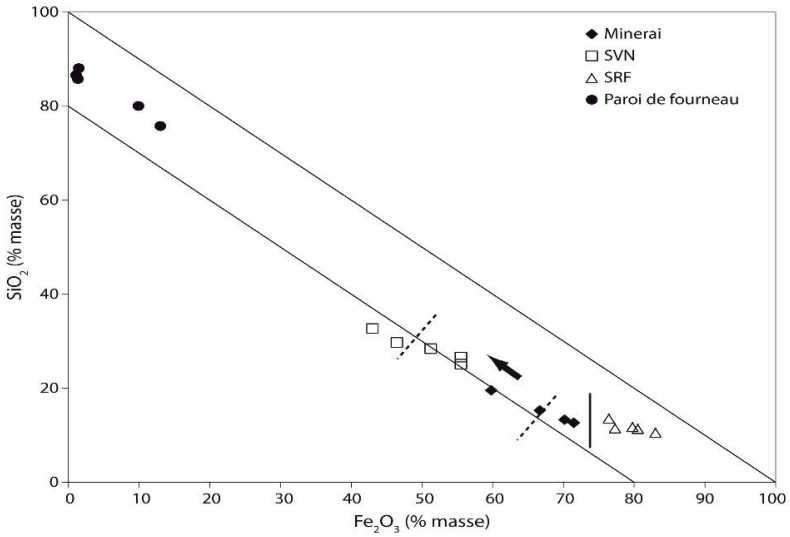


Fig. 12. Rapport Fe_2O_3 / SiO_2 dans le minerai, les scories et les parois.

La typologie et la quantification des scories

L'aspect des scories dépend du type de bas fourneau utilisé pour l'opération de réduction. D'après nos connaissances, il existe deux sortes d'appareils : ceux où la majeure partie des scories s'écoule hors du fourneau au cours de l'opération de réduction, et ceux où la scorie reste piégée à l'intérieur du fourneau. Le type de ventilation (naturelle ou artificielle) joue également un rôle déterminant dans la thermodynamique de la formation des scories, qu'elles restent piégées ou qu'elles s'écoulent à l'extérieur.

Dans l'atelier de l'Envers des Combes, les scories fabriquées lors de l'opération de réduction semblent s'être écoulées hors du bas fourneau. La localisation de l'atelier en plein cœur du district sidérurgique jurassien et l'époque de son fonctionnement, XIIIe-XIVe siècles, permettent de supposer que c'est par tirage naturel que l'on activait la combustion – ce dernier aspect a fait l'objet de toute notre attention à l'occasion du dégagement du fourneau central en 2007.

Lors de la fouille de juin 2006, deux types de scories ont été mis en évidence. Le premier correspond à des scories poreuses, assez légères, dont la surface révèle une texture de coulures. On les appelle scories vitreuses noires (SVN[16], fig. 9). Ce sont les scories typiques produites lors de l'opération de réduction dans un bas fourneau médiéval avec ou sans ventilation artificielle[17]. A première vue, cette catégorie semble réunir la majorité des déchets scorifiés du site.

Le second type se compose de scories denses, rouillées. Il constitue apparemment une particularité de la sidérurgie artisanale du Moyen Age dans le district jurassien. Elles ont surtout été observées dans des ateliers datant du Bas Moyen Age de la région de Lajoux (par exemple, Creux au Loup). Ces déchets sont appelés scories riches en fer (SRF[18], fig. 10).

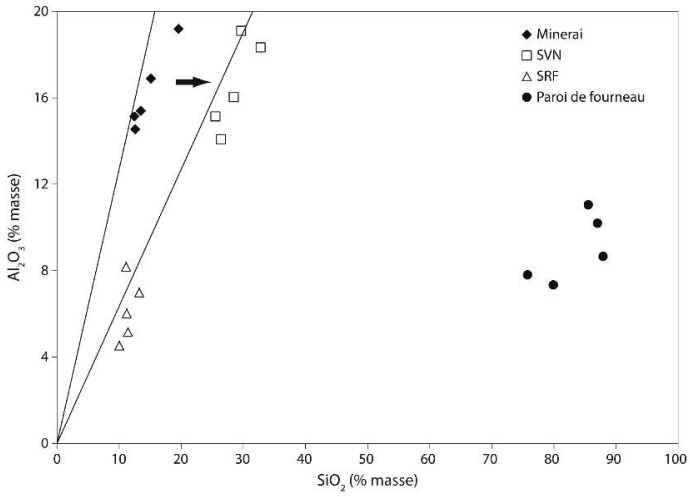


Fig. 13. Rapport SiO_2 / Al_2O_3 dans le minerai, les scories et les parois.

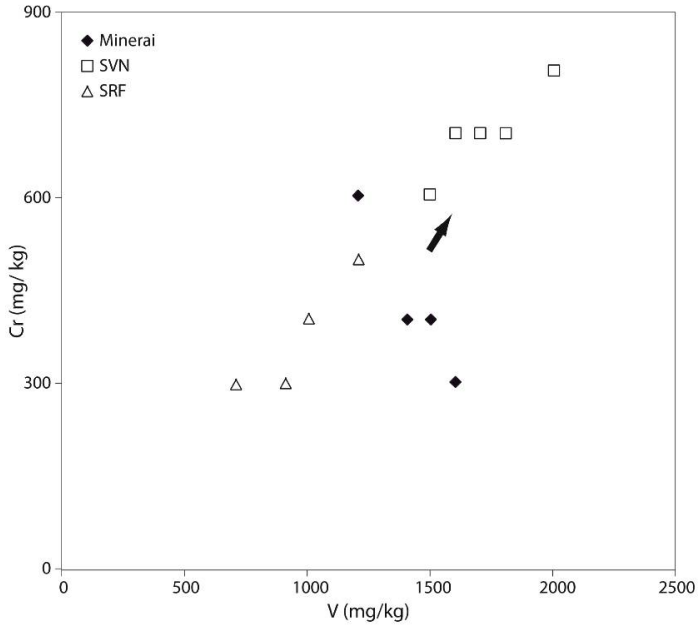


Fig. 14. Rapport V / Cr dans le minerai et les scories.

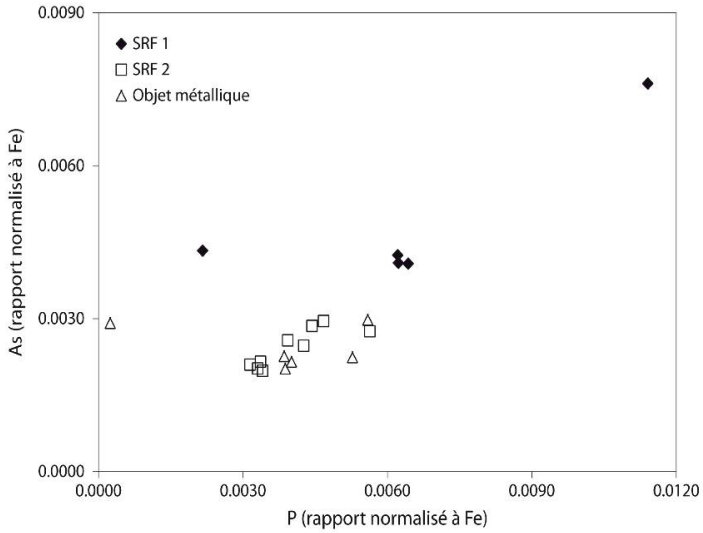


Fig. 15. Rapport des éléments arsenic et phosphore. Les deux échantillons de scories riches en fer et celui de la pièce métallique correspondent très bien.

De toute évidence, ces scories s'accumulent au fond du fourneau et ne sont vraisemblablement évacuées qu'à la fin de l'opération.

La profondeur moyenne de l'amas dans les 4 m^2 sélectionnés étant de 2 m, la zone témoin contenait donc 8 m^3 de matériaux, dont le poids a été estimé à plus de 4,5 tonnes. Compte tenu des limites approximatives de la zone de prélèvement et des pertes possibles survenues lors du déplacement des scories vers les dépôts intermédiaires, nous pensons qu'il convient de majorer ce montant de 10 % (fig. 11).

Ces chiffres issus d'un décompte systématique confirment la prédominance des scories de type vitreux noir, mais également la fréquence bien réelle des scories riches en fer. En outre, il convient de relever la part importante que constitue la terre charbonneuse dans un volume donné de déchets.

Le poids moyen de scories prélevées par mètre cube est de 520 kg environ. Ce chiffre est nettement inférieur à celui d'une tonne estimé pour l'atelier de Boécourt, Les Boulies, qui date du début du Moyen Age[19]. Toutefois, les scories qui prédominaient aux Boulies (scories grises denses) pesaient probablement davantage que les vitreuses noires qui constituent près des deux tiers du contenu de l'amas de l'Envers des Combes[20].

Les résultats analytiques des scories

Cinq fragments de scories vitreuses noires, cinq fragments de scories riches en fer, deux fragments de minerai et un morceau de paroi sableuse ont été analysés afin d'obtenir un bilan chimique global[21].

1. Les analyses montrent que la composition chimique des scories SVN qui ont coulé hors du fourneau en cours d'opération est liée à celle du minerai analysé. Quant au contenu en oxydes de fer des scories, il est inférieur à celui du minerai. Il en découle que du métal a été produit durant ce processus (fig. 12).

2. Un léger enrichissement en silice révèle l'influence d'un ajout de matière sableuse sur la formation des scories (fig. 13).

3. La teneur en vanadium et chrome augmente parce qu'une partie de l'oxyde de fer est réduite en métal. Toutefois, la teneur de ces deux éléments est supérieure à celle qui a été mesurée à Boécourt, les Boulies : cela signifie qu'à l'Envers des Combes, la température durant le processus de réduction était plus basse (fig. 14).

4. Les analyses confirment aussi que les scories de type SRF contiennent plus d'oxydes de fer que le minerai. Cet excédent en fer provient du minerai pour une petite partie, mais surtout de métal ou de métal oxydé avec lesquels ces scories étaient en contact direct. L'enrichissement en phosphore (qui provient du métal) renforce cette interprétation (fig. 15).

Fig. 16. Profil d'où proviennent les échantillons de scories : zone riche en scories SRF.

Fig. 17. Profil au cœur de l'amas de scories SVN.

Fig. 18. Photomontage d'une partie du profil de l'amas.

En résumé, les analyses chimiques mettent en évidence deux étapes successives : l'opération de réduction à proprement parler, dans le bas fourneau, dont les scories vitreuses noires sont les déchets, ainsi qu'un premier nettoyage de l'éponge de fer, durant laquelle beaucoup de fer est perdu. Les déchets caractéristiques de cette opération de nettoyage sont les scories riches en fer.

Cette seconde opération a dû également se dérouler dans la cuve du bas fourneau. En effet, dans le périmètre fouillé, nous n'avons trouvé aucun indice plaidant pour une autre structure de combustion destinée à la réchauffe de l'éponge de fer lors de ce nettoyage. En soi, l'existence très probable de ces deux étapes successives de production et de transformation ne constitue pas une surprise. A notre avis, les artisans ont déjà dû procéder de la sorte dans l'atelier sidérurgique de Boécourt, Les Boulies, au début du Moyen Age : des scories en forme de calotte ont été dégagées dans la paroi d'un des bas fourneaux[22]. Les scories riches en fer découvertes à l'Envers des Combes sont issues de la même étape de travail que ces calottes d'épuration de l'éponge.

Les premiers calculs quantitatifs que nous avons effectués sur la base de l'échantillonnage pratiqué dans la tranchée montrent que les scories riches en fer y sont surreprésentées. L'explication de ce phénomène est donnée par la stratigraphie même de l'amas. On y distingue en effet des niveaux très denses en scories riches en fer (là où l'échantillonnage a été effectué) puis, plus bas, des niveaux composés essentiellement de scories vitreuses noires (fig. 16, 17 et 18).

Les foyers de grillage situés en aval du bas fourneau

Des activités en lien avec les bas fourneaux situés en aval, au cœur de l'actuel amas de scories (mais qui n'ont pas été dégagés), se sont probablement déroulées sur la zone de travail qui s'étend à l'avant du fourneau fouillé. Cette zone se trouve à même le substrat rocheux qui est marqué à plusieurs endroits par une nette rubéfaction (fig. 19). Il s'agit vraisemblablement de foyers dans lesquels le minerai a été grillé : les fines couches qui surmontent ces endroits rubéfiés contiennent en alternance du charbon et du minerai compacté (fig. 20). L'interprétation de ces vestiges se fonde sur les observations faites lors de la fouille de l'atelier de Boécourt, Les Boulies. A l'Envers des Combes, cinq foyers ont été mis en évidence. D'un point de vue purement fonctionnel, trois foyers de grillage situés immédiatement devant le bas fourneau fouillé semblent plutôt être en lien avec les

Fig. 19. Zone de travail à l'avant du fourneau (foyers de grillage).

Fig. 20. Coupe à traverun foyer de grillage.

Fig. 21. Vue sommitale de la dernière charge bloquée dans la cheminée du bas fourneau.

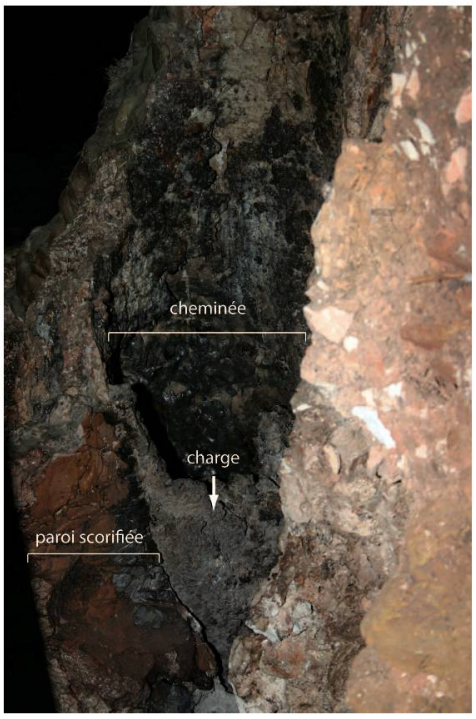


Fig. 22. Vue latérale de la cheminée : paroi scorifiée (coupe) et dernière charge bloquée.

fourneaux antérieurs qui s'élevaient en aval. En revanche, deux autres foyers découverts plus à l'ouest ont pu être en fonction en même temps que le dernier bas fourneau. L'absence de foyer à l'arrière de la plate-forme rend cette hypothèse plausible.

Le bas fourneau et la plate-forme aménagée

Toutes les informations disponibles concernant le district sidérurgique du Jura avant le début de cette fouille tendaient à démontrer que dans un atelier à butte centrale, entourée d'un anneau plus ou moins important de scories, au moins un des bas fourneaux était localisé au centre de cette butte.

Le cas de l'atelier de l'Envers des Combes se révèle un peu différent : le bas fourneau dégagé s'élève dans le quart nord-est de la plate-forme aménagée dans la pente et il est encore excentré à l'intérieur même de ce quart ! Cette situation particulière peut s'expliquer si l'on envisage l'existence d'un fourneau antérieur au centre de cette plate-forme. Toutefois, malgré des investigations ciblées, il n'a pas été possible de mettre en évidence une telle structure (fig. 5)[23].

Dans ces circonstances, la localisation du sommet conservé de la cheminée a pris plus de temps que prévu : après dégagement, il s'est avéré que l'état de conservation de la partie sommitale de cette cheminée était nettement moins bon que l'on pouvait espérer, probablement à cause de sa situation marginale.

Fig. 23. Vue frontale : partie conservée de la cheminée du bas fourneau.

Le fourneau conservé présente une cheminée de section ovale dont le plus grand diamètre est de 30 cm. A mi-hauteur de ce conduit, une partie de la dernière charge obstrue le passage (fig. 21 et 22). La forme du conduit correspond assez bien à celle qu'Auguste Quiquerez a dessinée (fig. 23 et 24)[24].

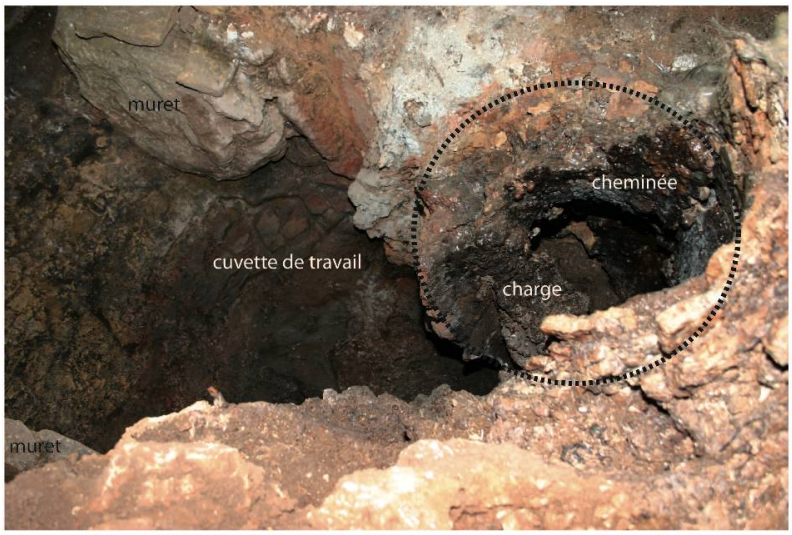


Fig. 24. Vue sommitale du bas fourneau.

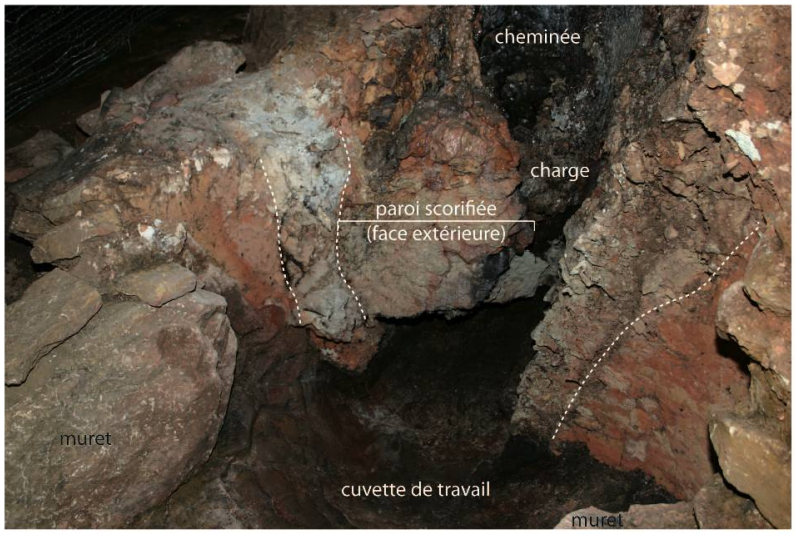


Fig. 25. Vue frontale du bas fourneau : en pointillés, les parties friables de la paroi.

Fig. 26. Ouverture à la base du fourneau, sous la voûte frontale : remplissage stratifié et très compact.

D'un point de vue morphologique, le bas fourneau de l'Envers des Combes fait assurément partie de la catégorie des fourneaux à tirage naturel, comme l'a décrite pour la première fois l'érudit jurassien du XIXe siècle. L'absence de tout fragment de tuyère sur le site conforte cette attribution. La voûte qui surmonte le canal de sortie frontal a été en grande partie conservée. Toutefois, les segments de paroi qui ont été moins exposés à la chaleur sont très friables ; il n'a donc pas été possible de les maintenir en place ni de les consolider dans toute leur épaisseur au-dessus de la porte et de la cuvette (fig. 25). Cette dernière, de même que le fond du fourneau, sont colmatés par une couche durcie de matériaux oxydés ; il pourrait s'agir de minerai partiellement réduit (fig. 26).

La zone de chargement à l'arrière du fourneau

Les quantités de minerai et de charbon de bois récoltées à l'arrière de la plate-forme sont importantes et aident à comprendre comment l'atelier a fonctionné : les métallurgistes acheminaient les matières premières de cet endroit en direction du fourneau, situé tout à l'avant de la plate-forme, puis ils chargeaient successivement charbon et minerai dans la cheminée. La plate-forme leur offrait un accès stable et relativement aisé (fig. 27). Il est difficile de distinguer une stratigraphie dans cette zone de chargement : les matériaux charbon et minerai ont donc été prélevés sur toute l'épaisseur de la couche sans que leur position verticale ne soit relevée.

Le minerai de fer

Du minerai pisolithique en abondance a été récolté à l'arrière de la plate-forme, un phénomène fréquemment observé dans d'autres ateliers. La quantité de matière perdue peut être estimée à plus d'une dizaine de kilogrammes. La provenance de ce minerai n'est pas connue. Il est généralement admis que les ateliers productifs étaient installés à proximité des ressources en bois et que l'on y déplaçait le minerai. Selon toute vraisemblance, il n'a donc pas été extrait dans les environs du site.

Pour déterminer l'origine du minerai employé dans les bas fourneaux de la région de Lajoux, une prospection ciblée des affleurements potentiels, conjuguée à une analyse des minerais retrouvés à ces endroits, serait indispensable pour pouvoir établir une comparaison avec le minerai provenant de ces ateliers. Il faudrait ensuite pouvoir compter sur la présence d'éléments majeurs (Al_2O_3, SiO_2, CaO…) ou d'éléments traces (V, Cr…) qui permettraient d'établir une distinction entre le minerai sidérolithique d'origine locale et celui en provenance de la partie ouest de la Vallée de Delémont[25].

Fig. 27. Arrière de la plateforme : vue du parement solidement construit.

Fig. 28. Morceaux de charbon :
A: sapin blanc avec aubier ;

B: sapin blanc avec traces d'oxydes de fer (cœur du bois).

Le charbon de bois

Lors de l'installation d'un atelier sidérurgique, ce sont tout d'abord les alentours que l'on défriche. Après avoir effectué une sélection parmi les essences de bois disponibles, les artisans procèdent au charbonnage. A l'Envers des Combes, une épaisse couche noire, présente tout autour de la plate-forme du bas fourneau et plus particulièrement à l'arrière, où elle est très riche en morceaux de charbon, atteste de cette manière d'opérer. Les plus grands morceaux de charbon atteignent 10 cm d'épaisseur (fig. 28a et 28b). Cela nous a amenés à effectuer des analyses dendrochronologiques sur les fragments récoltés[26].

Les analyses dendrochronologiques

Les analyses dendrochronologiques sur charbons de bois constituent un apport novateur du point du vue scientifique. Selon nos connaissances, c'est la première fois qu'un tel essai de datation concerne la sidérurgie médiévale. A l'Envers des Combes, l'ensemble des différentes phases d'abattage – et donc probablement la durée globale de fonctionnement de l'atelier avec plusieurs bas fourneaux – s'étend sur une période de près d'un siècle et demi. Cette fourchette est bien plus précise que celle fournie au préalable par la datation C^{14} (1276 – 1395 : 95 % de probabilité – plus grande probabilité : 1297). Le nombre de phases d'abattage (au moins huit), ainsi que les intervalles entre ces dernières (± 10 à ± 20 années) tendent à montrer que la forêt a été gérée en fonction des besoins croissants en combustible des sidérurgistes, dès la fin du Moyen Age (fig. 29). Quand le bois se faisait trop rare à une distance déterminée autour de l'atelier, l'activité de ce dernier était suspendue pour laisser le temps à la forêt proche de se reconstituer.

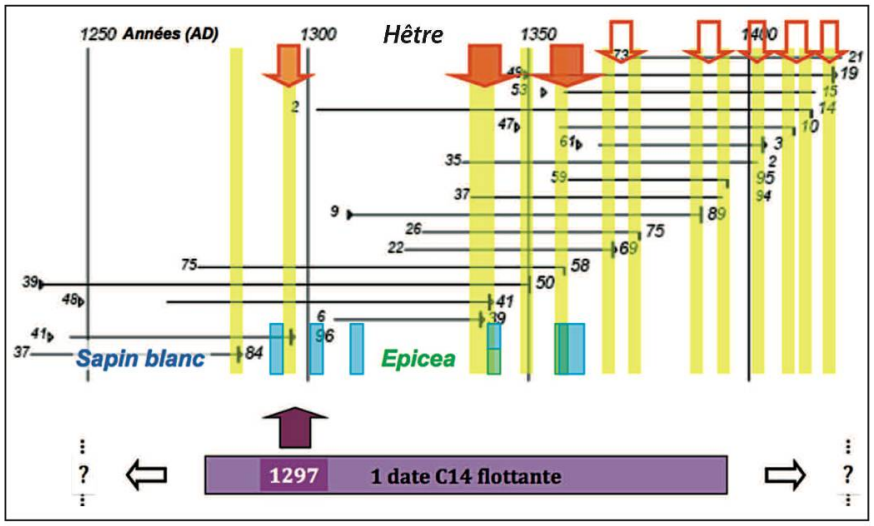


Fig. 29. Compilation des données dendrochronologiques.

Fig. 30. Un des trois objets métalliques dans son contexte de découverte.

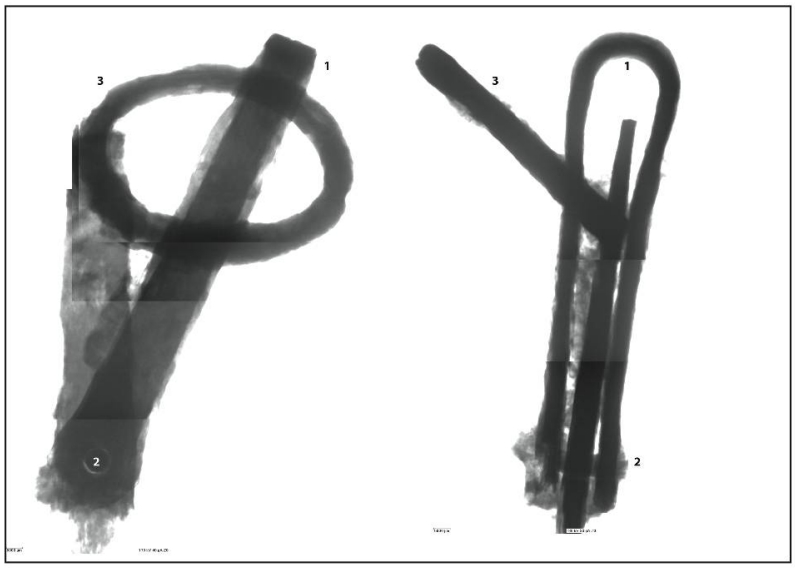


Fig. 31. Radiographies de l'objet métallique de la fig. 30 : à gauche, vue de face ; à droite, vue en coupe. Description : bande pliée en boucle (1) et fixée par une cheville (2) ; anneau à section quadrangulaire (3).

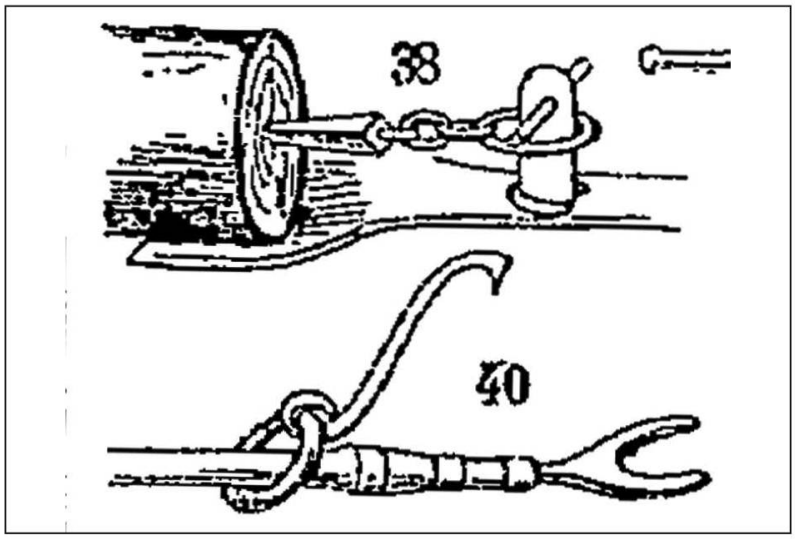


Fig. 32. Outils en lien avec le débardage (« 38 : chaîne à coin et patin pour traînage ; 40 : griffes »).

Les objets métalliques et l'analyse métallographique

Trois objets métalliques ont été découverts à proximité de la plate-forme centrale, dans la couche recouvrant l'aire de travail en aval de la plate-forme (fig. 30). Ils comportent tous encore des restes de bois imprégnés de fer fortement oxydé. Une analyse radiographique met en lumière l'agencement des différentes parties métalliques de ces objets (fig. 31)[27]. Il pourrait s'agir de pièces spécifiques en lien avec le débardage, mais l'absence de coin et de fourche nécessaires à la fixation dans le bois ne permet pas de les identifier avec certitude comme telles (fig. 32)[28]. A ce jour, l'hypothèse retenue est que ces parties métalliques ont pu appartenir à une armature de chariot ou de luge. A notre connaissance, il n'existe pas d'étude typologique ou fonctionnelle de ce genre de mobilier métallique pour ces périodes[29].

Un des anneaux de fer a fait l'objet d'une étude métallographique (fig. 33a et 33b). L'échantillon découpé révèle une section quadrangulaire, ainsi que de nombreuses inclusions de scories. Le métal est composé de gros grains et de structures fantômes, ce qui plaide en faveur d'un fer riche en phosphore. La dureté moyenne de la ferrite (fer « doux », quasi sans carbone), assez élevée, confirme ce premier constat, ainsi que l'analyse chimique, avec 0,26 % masse de teneur en phosphore[30].

La composition chimique des scories riches en fer est très proche de celle des objets métalliques mis au jour. Cela prouve que ces pièces ont été fabriquées à partir de métal produit dans un des bas fourneaux de l'atelier de l'Envers des Combes. La composition chimique du métal utilisé ici diffère de celle du fer travaillé dans les forges du début du Moyen Age de Develier-Courtételle, mais aussi de celle du fer prélevé dans l'atelier productif tout proche et quasi contemporain de Sur les Roches 1[31].

Peut-on affirmer que les objets métalliques trouvés à l'Envers des Combes y ont été aussi forgés ? L'existence d'un lieu de forgeage sur le site n'est pour l'instant pas prouvée, mais le fait que les éponges de fer produites dans les fourneaux ont été systématiquement nettoyées sur place nous incite à penser que les opérations suivantes de transformation du métal se sont peut-être aussi déroulées à cet endroit.

Le rendement du bas fourneau

Grâce à la caractérisation chimique du minerai, des scories, de la paroi et du métal, le processus de production du fer à l'Envers des Combes peut être partiellement reconstitué. Les scories vitreuses noires (SVN) sont les déchets des opérations de réduction dans le bas fourneau. A partir de leur

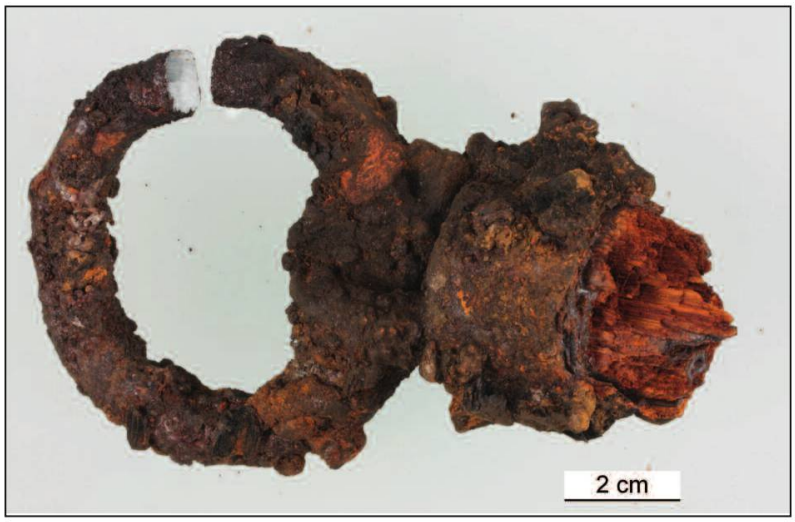
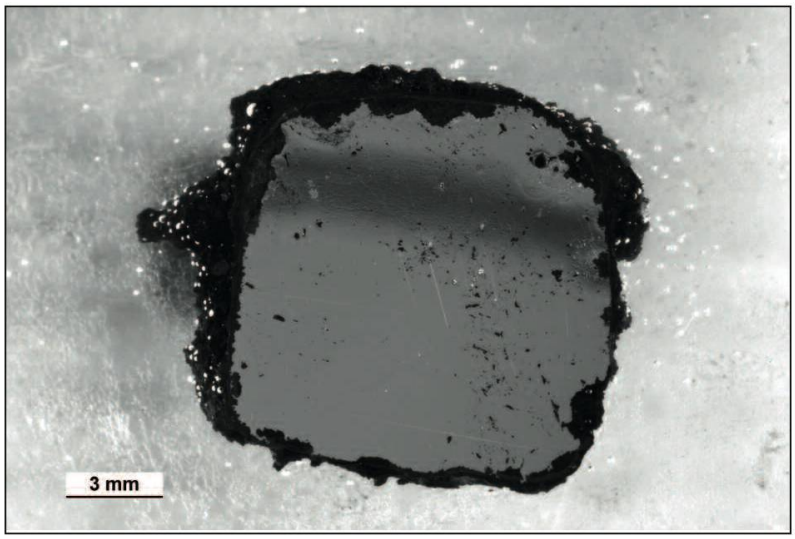


Fig. 33. Anneau à section quadrangulaire,
A : emplacement de l'échantillon prélevé pour analyse ;



B: coupe polie de l'échantillon, avec de nombreuses inclusions de scories (taches noires).

composition chimique, le rendement d'une opération peut être fixé à 27% de la teneur globale en fer, et ceci par le biais d'un bilan de masse (fig. 34). Un ajout volontaire de sable ou d'un produit riche en silice joue également un rôle dans le processus de réduction[32].

Les scories riches en fer (SRF) se sont formées lors de l'épuration de l'éponge de fer dans le fond du bas fourneau. L'expulsion de la scorie semble avoir été l'objectif principal. En l'absence de toutes traces de déformation du métal et de battitures, on peut en conclure que l'éponge a été uniquement réchauffée. Etonnamment, cette épuration n'a pas produit de véritables scories en forme de calotte. Ceci s'explique par le fait que le processus s'est déroulé dans le bas fourneau même, où s'est formée une galette de scories dont le centre porte l'empreinte en cuvette de l'éponge épurée.

g/100g (%)	Minerai	Paroi	Sable	Cendre	Total	Différence	Scorie Type SVN	Fer
Si	6.67	0.97	5.41	0.13	13.18		13.18	
Al	8.58	0.12		0.05	8.74		8.74	
Fe	47.42	0.09		0.03	47.55		35.05	12.5
Ti	0.48	0.02		0.002	0.50	-	0.74	
Mn	0.10	0.00		0.04	0.14	-	0.27	
Mg	0.05	0.00		0.21	0.26	+	0.16	
Ca	0.12	0.01		1.37	1.50		1.51	
K	0.02	0.01		0.29	0.32	-	0.58	
P	0.11	0.00		0.04	0.15		0.07	0.08
Sr	<	<		0.002	0.002	-	0.01	
Ba	<	<		0.003	0.003	-	0.01	
Y	0.01	<		0.001	0.01		0.02	
Zr	0.02	0.00		0.0003	0.03		0.04	
V	0.14	0.00		0.0001	0.14		0.17	
Cr	0.04	0.00		0.0001	0.04		0.07	
Ni	0.01	<		0.0001	0.01		<	0.01
Zn	0.02	0.00		0.006	0.03		0.01	
As	0.01	<		<	0.01		<	0.01
Mo	0.01	<		<	0.01		<	0.01
Pb	0.01	<		0.00	0.01		<	
Ce	0.03	<		<	0.03		<	
Rapport Si/Al	0.78	8.20		2.70	1.51		1.51	
Variable a-e	a=1	b=0.025	c=0.116	d=0.032			e=1	f=0.125
Facteur 1 = 100kg/a	100							
kg (Variable x Facteur 1)	100	2.5	11.6	3.2			100	12.5
Teneur en Fe (kg)	47.42	0.09		0.03			35.05	12.5

Fig. 34. Bilan de masse calculé pour 100 kg de minerai, basé sur les valeurs analytiques des scories de réduction (SVN), de la paroi du fourneau, de la cendre de hêtre et du minerai pisolithique (valeurs moyennes normalisées sur 100, converties en éléments et multipliées avec les variables a-f ; e équivaut toujours à 1 ; f = (teneur totale en Fe – teneur en Fe de la scorie)/100). « < » : en dessous de la limite de détection.

Les analyses métallographiques ont mis en évidence que le métal produit est riche en phosphore, ce qui nécessite un forgeage à plus basse température que d'habitude[33]. Un rebut métallique en provenance de l'atelier de Boécourt, Les Boulies, comportait aussi cette particularité[34].

Une « enclume » ?

Une pierre calcaire en forme de cylindre régulier a été mise au jour au pied de la butte centrale (fig. 35). Il est probable qu'elle n'était pas à sa place initiale au moment de sa découverte. Elle comporte sur plusieurs faces des traces de rubéfaction. Elle mesure 24 cm de haut pour un diamètre de 25 cm et pèse 25 kg. Il est prévu d'analyser les éventuelles microtraces qui pourraient se trouver en surface, afin de prouver son utilisation comme enclume[35]. La découverte, à Cham, Hagendorn, d'une pierre d'aspect similaire dans le contexte d'une forge gallo-romaine associée à un moulin pourrait corroborer cette interprétation[36].

Fig. 35. Enclume dans son contexte de découverte, avec traces de rubéfaction.

Outre ces quelques pièces de mobilier, aucun autre objet usuel n'a été découvert lors de la fouille, à l'exception d'un petit fragment de céramique commune auquel ne peut être attribuée aucune forme spécifique de récipient.

Conclusions et perspectives

Les études menées à bien à l'Envers des Combes apportent un bon nombre de connaissances nouvelles :

– Les grands ateliers à fourneau central (il en existe plusieurs dans le Jura) peuvent comporter un nombre supplémentaire de bas fourneaux recouverts par les résidus scorifiés de l'amas.

– La distinction claire des différentes phases de la chaîne opératoire de la sidérurgie ancienne ne correspond qu'à un concept théorique ; la réalité du terrain démontre qu'à l'Envers des Combes, comme sans doute aussi à Boécourt, Les Boulies, les artisans métallurgistes ont mis à profit la chaleur résiduelle du bas fourneau pour effectuer une première épuration de l'éponge, produit assez hétérogène provenant du même bas fourneau.

– Les données très précises et complètes de l'étude dendrochronologique montrent la pertinence limitée d'une datation C^{14} à l'échelle d'un atelier : l'analyse des morceaux de charbon de bois situe les phases d'abattage entre 1284 et 1419, dépassant ainsi de près de vingt années la fourchette maximale donnée par la datation C^{14} (1276 – 1395). Si l'étude comparative des datations absolues entre les différents ateliers d'une même région a une valeur informative indéniable, il n'en va pas de même pour les étapes successives de fonctionnement d'un même atelier, que seul le recours à la dendrochronologie permet de détailler.

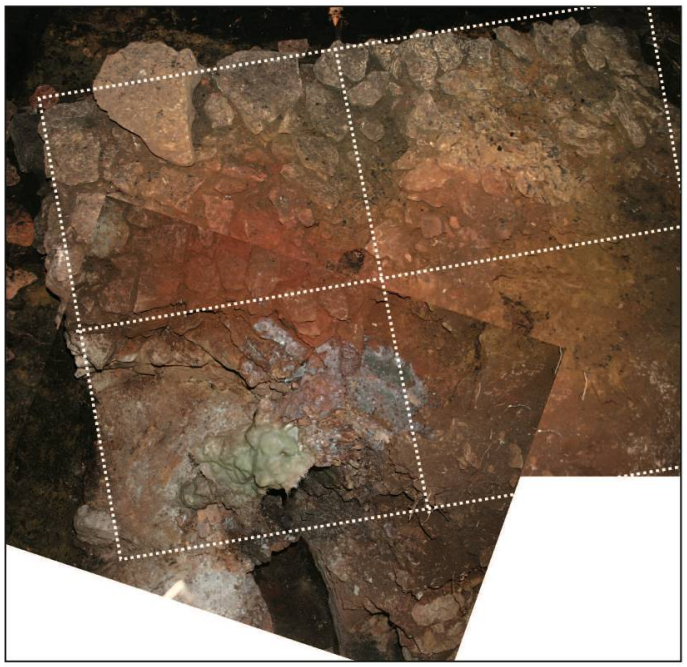


Fig. 36. Photomontage de la plate-forme : cheminée du fourneau et zone de rubéfaction à l'arrière de celle-ci.

Ces premières données dendrochronologiques donnent l'espoir d'aboutir un jour à une meilleure compréhension de la manière dont ont fonctionné les nombreux ateliers proches de Lajoux et environs[37], qu'il s'agisse d'une utilisation cyclique ou intermittente, voire itinérante. Ces résultats inédits offrent de nouvelles perspectives aux recherches portant sur la gestion forestière du Bas Moyen Age dans cette région.

La présence d'un unique fourneau en bordure d'une plate-forme de grandes dimensions est pour l'instant difficilement explicable. Il conviendrait donc de poursuivre les investigations sur d'autres ateliers à butte centrale de la même période, pour vérifier s'il s'agit ou non d'un cas unique d'aménagement. Il en va de même pour le fonctionnement d'un bas fourneau à tirage naturel : nos observations ne suffisent pas encore à l'expliquer de manière convaincante (fig. 36).

Enfin, pour la première fois, la fouille d'un atelier sidérurgique jurassien d'une certaine envergure a permis de mettre en évidence un ensemble de scories issues d'une production artisanale typique, nous semble-t-il, de la région de la Courtine de Bellelay. Il est utile de rappeler que cette région constitue une des zones de production les plus importantes d'Europe occidentale durant les XIIIe et XIVe siècles. Grâce au calcul du volume des déchets, combiné avec celui de leur poids par mètre cube, on obtient une masse globale de 300 tonnes ± 10 %. Cet amas de déchets est le résultat de l'activité de plusieurs fourneaux (au moins trois). Dans le seul secteur de Lajoux et environs (une vingtaine de km^2), le volume de déchets sidérurgiques produit pendant deux siècles environ s'élève approximativement à

18000 tonnes ± 10%. Avec une production de 10000 tonnes de déchets scorifiés par siècle, il est possible d'évaluer la production de fer brut à environ vingt tonnes par année et cela pour cette seule portion de territoire. Chaque atelier a donc produit annuellement quelque 330 kg de fer[38].

Il n'est pas prouvé qu'une partie du fer produit sur place y a été transformée en objets. La présence de trois pièces trouvées dans l'atelier et fabriquées avec du métal issu du bas fourneau local semble pourtant le suggérer. Il aurait fallu une fouille plus étendue afin de retrouver l'emplacement d'éventuels bas foyers de forgeage[39].

En résumé, l'organisation de l'atelier sidérurgique de l'Envers des Combes s'avère bien plus complexe que cela ne paraissait de prime abord. Au moins trois bas fourneaux ont fonctionné successivement sur le site, dont un a été construit sur une plate-forme aménagée de dimensions remarquables. On dénombre au moins cinq foyers de grillage de minerai pisolithique. Il est presque certain qu'une meule à charbon s'élevait à proximité et probablement aussi un foyer de forgeage. Cet atelier a dû fonctionner de manière cyclique, en alternance avec d'autres ateliers de la région.

Remerciements

Les trois campagnes de fouilles ont été menées à bien, d'une part grâce aux moyens financiers récoltés par le GAF et la Commune de Lajoux, mandataires du projet, et d'autre part, grâce à la collaboration bénévole d'une trentaine de personnes dont certaines se sont investies sans compter. Je tiens à leur adresser mes plus chaleureux remerciements pour avoir contribué au bon déroulement des travaux. J'exprime toute ma gratitude pour leur soutien constant en particulier à Willy Houriet, tant en sa qualité de responsable administratif du projet que de fouilleur fidèle, au Loux, qui entre-temps nous a quittés, et à Nicolas Gogniat, qui s'est chargé notamment des aménagements destinés à la mise en valeur du site de façon durable.

La collaboration avec Philippe Fluzin, directeur de l'UMR 5060 du CNRS (UTBM) et Michel Aubert, collaborateur technique dans cette même unité, s'est poursuivie tout au long de ce projet de manière fructueuse; je remercie chaleureusement ces deux collègues pour leur soutien. Enfin, j'ai pu compter sur l'excellente collaboration établie de longue date avec Marianne Senn dans le domaine des analyses chimiques et métallographiques (Empa Dübendorf), avec Trivun Sormaz (Dendrolabor des Archäologischen Dienstes Graubünden), ainsi qu'avec Matthias Seifert, responsable de ce laboratoire; je leur exprime toute ma reconnaissance.

La relecture de cet article a été assurée par Corinne Eschenlohr et Nicolas Gogniat; qu'ils en soient sincèrement remerciés.

Préhistorien de formation, Ludwig Eschenlohr est depuis 1991 chercheur spécialisé en paléosidérurgie, associé au CNRS, UMR 5060 Belfort-Montbéliard. Il a été pendant plus de vingt-trois 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 se termine en 2012. Adresse de l'auteur : Jonnières 11, CH–2900 Porrentruy.

Courriel : ludwig.eschenlohr @bluewin.ch

PETIT LEXIQUE

Bas fourneau : fourneau de réduction du minerai de fer par la *méthode directe* (définition ci-dessous), produisant un bloc de fer ou d'acier brut, appelé *éponge* (tiré du vocabulaire raisonné de GSAF/ASTFA 1997, p. 77).

Ferrier : ce terme désigne l'atelier de réduction dans sa globalité, comprenant le(s) bas fourneau(x), aire(s) de travail et amas de scories.

Méthode directe de réduction du minerai de fer : le minerai, généralement sous forme d'oxydes de fer, est réduit à l'aide de charbon et transformé partiellement en fer métallique et/ou acier dans un bas fourneau. Cette opération produit une éponge, mélange de métal et de déchets, qui doit être purifiée et compactée par chauffage et martelage. Au cours de ce procédé, le métal reste toujours à l'état solide-pâteux, ceci à la différence de la méthode indirecte dans le haut fourneau (GSAF/ASTFA 1997, p. 77).

Scories : déchets solides ayant passé par l'état plus ou moins liquide et provenant des opérations de traitement des minéraux métalliques.

Scories de réduction : résidus de la fusion de la gangue du minerai lors de la réduction dans le bas fourneau (GSAF/ASTFA 1997, p. 78).

BIBLIOGRAPHIE

Dunikowski Christophe et Cabboi Sandra 1995, La sidérurgie chez les Sénons : les ateliers celtiques et gallo-romains des Clérimois (Yonne). Document d'archéologie française 51.

Eschenlohr Ludwig 2001, Recherches archéologiques sur le district sidérurgique du Jura central suisse. Cahiers d'archéologie romande 88.

Eschenlohr Ludwig 2007, The ironworking district of the central Jura, Switzerland : recent advances, Early Ironworking in Europe II – archaeology, technology and experiment, abstracts, 23-24. Ed. by Peter & Susan Crew, Plas Tan y Bwlch.

Eschenlohr Ludwig 2008, L'exploitation du fer dans le Jura. Almanach du Jura, 59.

Eschenlohr Ludwig 2009, 1989 à 2009 : vingt ans de recherche sur l'ancienne industrie du fer dans le Jura. Almanach du Jura, 29.

Eschenlohr Ludwig 2011, Das Eisengewerbe im Jura – spätmittelalterlicher Werkplatz von Lajoux JU, Envers des Combes. Moyen Age. Revue de l'Association suisse châteaux forts, N° 2, 41-51.

Eschenlohr Ludwig, Friedli Vincent, Robert-Charrue Linder Céline et Senn Marianne 2007, Develier-Courtételle, un habitat rural mérovingien. Métallurgie du fer et mobilier métallique. Cahier d'archéologie jurassienne, 14.

Eschenlohr Ludwig et Serneels Vincent 1991, Les bas fourneaux mérovingiens de Boécourt, Les Boulies (JU/Suisse). Cahier d'archéologie jurassienne, 3.

Evéquoz Emmanuelle, Eschenlohr Ludwig et al., à paraître 2012. Cahier d'archéologie jurassienne, 27.

Groupe d'archéologie du fer (GAF) 2005, La production du fer au Moyen Age – Expérimentations dans le Jura. SJE, L'Œil et la Mémoire, 16.

Groupe d'Histoire du Mont-Repais (GHMR) 2003, Le Fer dans le Jura.

Groupe de travail suisse d'archéologie du fer 1997 (Doswald Cornel, Duvauchelle Anika, Eschenlohr Ludwig, Fasnacht Walter, Schaltenbrand-Obrecht Verena, Senn-Luder Marianne, Serneels Vincent), Minerai, scories, fer - Erze, Schlacken, Eisen : Cours d'initiation à l'étude de la métallurgie du fer ancienne et à l'identification des déchets de cette industrie, ASTFA/VATG, Bâle, 1997, 2e édition renouvelée.

Joos Marcel 1994, Ein spätmittelalterlicher Rennofen von Lajoux/JU. Minaria Helvetica 14a, 53-73.

Pelet Paul-Louis 1993, Une industrie reconnue : fer, charbon, acier dans le Pays de Vaud. Cahiers d'archéologie romande, 60.

Serneels Vincent 1993, Archéométrie des scories de fer, recherches sur la sidérurgie ancienne en Suisse occidentale. Cahiers d'archéologie romande, 61.

Vega Enrique et al. 2003, Forging of phosphoric iron. An analytical and experimental approach. Archaeometallurgy in Europe, Milan 2003, Proceedings Vol. 2, 337-346.

CREDIT ICONOGRAPHIQUE

Sans autre indication, les illustrations sont de l'auteur.

Fig. 12 à 15 et 34, adaptées d'après M. Senn, Empa.

Fig. 28, T. Sormaz, Dendrolabor des Archäologischen Dienstes Graubünden

Fig. 31, Association suisse pour la technique de soudage, Bâle.

Fig. 32, Larousse Universel, 1922, 2 volumes, tome 1, p. 257, planche « bois ».

Fig. 33, M. Senn, Empa.

NOTES

[1] Le lecteur intéressé par le district sidérurgique médiéval du Jura central suisse trouvera de plus amples renseignements dans Eschenlohr 2001.

[2] Les quelques termes spécifiques de la sidérurgie ancienne sont expliqués dans un lexique en fin d'article.

[3] Ce défrichement a été décidé suite à mes observations au Pays de Galles (Snowdonia National Parc) où les zones de ferriers prévues pour la fouille ont été déboisées une dizaine d'années avant l'intervention archéologique.

[4] Willy Houriet a été une des chevilles ouvrières de ce projet. Pour plus d'informations : http://www.lajoux.ch/visite/general.htm

[5] Paul-Louis Pelet (1920-2009) a été professeur en histoire économique et sociale à l'Université de Lausanne. Il a privilégié la pluridisciplinarité, en recourant dans ses travaux notamment à l'archéologie, l'histoire, l'ethnographie et la géographie. Il est à l'origine du renouveau des recherches sur la sidérurgie ancienne durant la seconde moitié du XXe siècle (Pelet 1993) et a été à ce titre le mentor de mon projet de recherches sur le district sidérurgique jurassien (1993-2000).

[6] P.-L. Pelet était venu sur les lieux pour apporter son soutien à l'équipe de Marcel Joos de l'Université de Bâle qui fouillait, en sa qualité d'assistant du professeur Elisabeth Schmid, un autre atelier sidérurgique de Lajoux, touché par la construction d'un chemin forestier (Joos 1994).

[7] La plus forte probabilité des datations effectuées sur plusieurs ateliers de Lajoux et environs se concentre au quatrième quart du XIIIe siècle.

[8] Groupe d'archéologie du fer (GAF) 2005.

[9] Eschenlohr 2001, p. 145-146.

[10] Les campagnes de fouilles se sont déroulées entre juin 2006 et août 2008.

[11] Eschenlohr 2001, p. 260.

[12] Il s'agit d'un nombre minimal de bas fourneaux, compte tenu qu'un appareil a pu être reconstruit plusieurs fois, à peu près au même emplacement.

[13] Ce qui équivaut au dégagement et au déplacement d'environ une tonne de matériaux par jour de fouille !

[14] Il s'agit en fait d'un cube de 2 m de largeur, de profondeur et de hauteur.

[15] Les deux bords de la tranchée ont été aménagés en talus avec une inclinaison suffisante pour en assurer la stabilité (fig. 8).

[16] Appellation d'après Serneels 1993, p. 108.

[17] Une tranchée effectuée en 1993 à travers la partie restante de l'amas de scories de l'atelier d'Undervelier, Montépoirgeat 1, atteste cela (Eschenlohr 2001, p. 247-248). La quasi-totalité des scories est constituée de scories vitreuses noires (SVN). Les restes conservés du bas fourneau fouillé dans le talus d'un chemin forestier recelaient un morceau de tuyère.

[18] Appellation d'après Eschenlohr 2001, p. 109-117.

[19] Eschenlohr et Serneels 1991.

[20] Aucun décompte systématique n'a cependant été effectué sur le site des Boulies ; les valeurs obtenues pour l'atelier de l'Envers des Combes semblent donc plus fiables et plus vraisemblables. L'étude réalisée par C. Dunikovski et S. Cabboi aux Clérimois va également dans ce sens : ces auteurs calculent avec un poids moyen de 760 kg par m^3 (Dunikowski et Cabboi 1995, p. 122).

[21] Les analyses ont été effectuées par M. Senn, Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche (Empa). Un premier rapport a été fourni en automne 2006, puis un second fin 2008.

[22] Eschenlohr et Serneels 1991.

[23] Ceci nous a décidés à approfondir encore une fois nos investigations en juin 2008.

[24] Eschenlohr 2001, p. 49, fig. 29.

[25] Eschenlohr 2001, p. 27-34.

[26] Les analyses ont été effectuées par Trivun Sormaz, Labor für Dendrochronologie des Archäologischen Dienstes Graubünden.

[27] Les analyses radiographiques ont été effectuées par l'intermédiaire de M. Senn à Bâle auprès de l'Association suisse pour la technique de soudage.

[28] Illustration transmise par François Rais (source : Larousse Universel, 1922, 2 volumes, tome 1, p. 257).

[29] Dans la région, le mobilier métallique du début du Moyen Age est très bien connu ; on constate ensuite une lacune pour toute la période médiévale après l'an mil, à l'exception de quelques objets d'équipement militaire trouvés lors de fouilles officieuses dans l'un ou l'autre château.

[30] Le pourcentage massique est une modalité utilisée en chimie et en métallurgie pour désigner la composition d'un mélange ou d'un alliage (c'est-à-dire les proportions de chaque composant dans le mélange). 1 % masse = 1 g pour 100 g = 1 kg pour 100 kg.

[31] Eschenlohr et al. 2007, p. 71-72 et Eschenlohr 2001, p. 123-125.

[32] Il s'agit d'un ajout de 25 g pour 1 kg de minerai, ce qui équivaut à une poignée de matière sableuse.

[33] Vega et al. 2003.

[34] Eschenlohr 2001, p. 121-122.

[35] Cet aspect sera abordé dans le second volet à paraître *(Actes 2012)*. Il en va de même pour la stratigraphie détaillée de l'amas de scories et la morphologie des scories riches en fer (SRF).

[36] Communication écrite de Marianne Senn.

[37] La densité des ateliers sidérurgiques est de 4 par km^2 dans une fourchette chronologique maximale de cinq siècles.

[38] Il est utile de rappeler que le facteur d'erreur augmente avec chaque niveau supplémentaire d'estimation. L'ordre de grandeur reste toutefois pertinent et permet de se faire une assez bonne idée de l'importance productive du district durant la phase finale du Moyen Age. Ceci représente une nette avancée depuis l'état de la question en 2000, à la fin de nos recherches à caractère prospectif.

[39] L'atelier altomédiéval de Chevenez, Lai Coiratte, en est un bel exemple : Evéquoz, Eschenlohr et al., à paraître.