



**HAL**  
open science

## La métallurgie du fer dans l'agglomération antique d'Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, 25)

Rémy Jeannot, Marion Berranger, Pierre Nouvel

► **To cite this version:**

Rémy Jeannot, Marion Berranger, Pierre Nouvel. La métallurgie du fer dans l'agglomération antique d'Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, 25). Mémoires de la Société d'Emulation de Montbéliard, 2018, 140. hal-02521039

**HAL Id: hal-02521039**

**<https://hal.science/hal-02521039>**

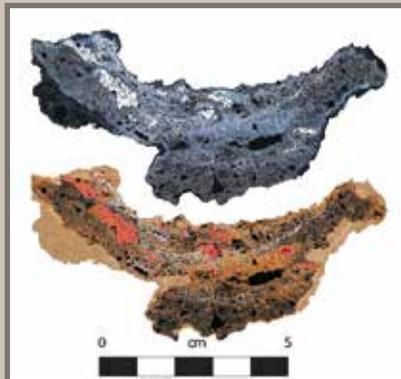
Submitted on 7 Apr 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Rémy Jeannot, Marion Berranger et Pierre Nouvel

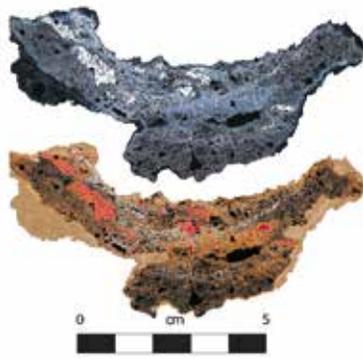
La métallurgie du fer  
dans l'agglomération antique  
d'*Epomanduodurum*  
(Mandeure-Mathay, 25). Archéologie et archéométrie





Rémy Jeannot, Marion Berranger et Pierre Nouvel

La métallurgie du fer  
dans l'agglomération antique  
d'*Epomanduodurum*  
(Mandeure-Mathay, 25). Archéologie et archéométrie



Page précédente : Photographie d'une scorie de forge du corpus, cartographie microscopique et interprétation. Sauf précision, les figures sont de l'auteur.

Rémy Jeannot, Marion Berranger et Pierre Nouvel

# La métallurgie du fer dans l'agglomération antique d'*Epomanduodurum*

(Mandeure-Mathay, 25). Archéologie et archéométrie

## INTRODUCTION

Les communes actuelles de Mandeure et Mathay, à 6 km au sud de Montbéliard (25), recouvrent les vestiges d'une large agglomération antique, *Epomanduodurum*. À l'époque gallo-romaine, cette agglomération d'environ 150 hectares était la plus importante de la cité Séquane après la capitale, *Vesontio*-Besançon. L'accessibilité des vestiges et le nombre des témoins archéologiques mis au jour depuis les années 1980 en a fait un sujet de choix pour mieux comprendre le fonctionnement de la société de cette époque. Plusieurs synthèses sur ce sujet ont récemment été publiées (scientifiques : Barral (dir.), 2015, ou plus grand public : Barral (dir.), 2011), s'attachant entre autres à comprendre les dynamiques d'émergence et de transformation de l'agglomération, ou son rôle dans l'organisation du territoire.

Ces témoins ont révélé la présence d'une part importante d'activités sidérurgiques, sans donner lieu jusqu'ici à la réalisation d'une étude poussée sur ce thème. Or, à l'époque romaine, comme c'est le cas dès la protohistoire, le fer revêt une importance primordiale dans la société : il est produit abondamment malgré l'important investissement humain que nécessite sa transformation (Crew, 2013) ; le passage du minerai à l'objet fini suppose en outre l'organisation d'une chaîne de production complexe (Bauvais & Fluzin, 2014), dont chacune des étapes requiert un haut niveau de connaissances techniques. L'étude de l'organisation de la production sidérurgique permet donc de mieux appréhender un pan des économies anciennes ; elle constitue ainsi un outil im-

portant dont dispose l'archéologie pour mieux comprendre leur fonctionnement.

L'article présenté ici est le résultat d'un travail de master réalisé à l'université de Franche-Comté dans le cadre thématique de deux Programmes Communs de Recherche (PCR – programme fédérant des acteurs multiples, issus par exemple des universités, du CNRS ou de l'archéologie préventive). Le premier, en cours, cherchant à étudier l'organisation de la production sidérurgique dans la région – *La Sidérurgie en Bourgogne-Franche-Comté avant le haut fourneau*, coordonné par M. Berranger – et le second, achevé en 2011, se focalisant sur l'agglomération – *Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique : Epomanduodurum*, coordonné par Ph. Barral. Ce travail de Master s'était donné pour but de compiler et d'interpréter les données concernant la métallurgie du fer disponibles pour l'agglomération, afin de répondre à deux problématiques principales, formulées comme suit :

- Comment la production métallurgique s'organise-elle dans la ville antique ?
- Comment s'intègre cette agglomération dans l'économie du fer – production, échanges – dans l'espace régional ?

Dans les pages qui suivent, est d'abord présenté le contexte scientifique de ce travail, à travers un bref historique des recherches sur l'agglomération et du développement de la paléométallurgie ; les résultats des études interdisciplinaires réalisées sur les secteurs fouillés anciennement sont ensuite détaillés ; l'ensemble se termine par une proposition de synthèse reprenant les problématiques énoncées ci-dessus.

## UNE DOUBLE PROBLÉMATIQUE : CONTEXTES SCIENTIFIQUES DE L'ÉTUDE ET MÉTHODOLOGIES

L'intérêt pour le site d'*Epomanduodurum* naît très tôt : dès le xvi<sup>e</sup> siècle les premières découvertes sont réalisées et le nom romain de l'agglomération est découvert. Au xix<sup>e</sup> siècle commencent les fouilles de grande ampleur, qui se concentrent surtout sur l'impressionnant théâtre sous l'autorité de Frédéric Morel-Macler ; c'est néanmoins dès cette époque qu'est mis au jour un premier atelier de forge romain, publié en 1887 dans les Mémoires de la Société d'Émulation de Montbéliard par H. L'Épée (L'Épée, 1887).

La fin du xx<sup>e</sup> siècle constitue un tournant dans ces recherches, grâce au développement de l'archéologie de sauvetage puis de l'archéologie préventive : de nombreuses campagnes de fouilles ponctuelles, puis de grands chantiers, contribuent à une meilleure connaissance de la ville antique. Ces investigations, qui constituent la majeure partie de la base documentaire sur laquelle est construit le présent article, s'appuient sur le travail de bénévoles, dont des étudiants de l'université de Besançon. La paléoméallurgie est à cette époque une branche naissante de l'archéologie ; l'implication du directeur de la chaire d'Archéologie d'alors, M. Michel Mangin, assure l'intérêt des fouilleurs pour les déchets métallurgiques et la conservation de ces derniers.

Plus récemment, l'année 2001 marque l'ouverture du Projet Collectif de Recherches *Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique : Epomanduodurum, archéologie, territoire et environnement*, qui durera plus de 10 ans. Dès l'origine, ce projet vise à comprendre les mécanismes d'émergence et de transformation de ce pôle, en rapport avec son contexte environnemental. Bien que ses problématiques interrogent sur « le statut civique et socio-économique exact de l'agglomération » (Barral (dir.), 2001), l'artisanat ne fait l'objet que d'études préliminaires, non focalisées sur un type précis de productions. Un travail de Master réalisé dans ce contexte par C. Fruchart (Fruchart, 2009) est particulièrement intéressant, puisqu'il se donnait pour objectif de dresser une première synthèse de l'artisanat mandurien sur la base de la bibliographie ancienne, entre activités réalisées, topographie et phasage. Il propose en particulier une synthèse détaillée des deux zones artisanales les mieux connues – *Essarté* et *Champs des Isles*.

Dans le but de continuer à nourrir cette réflexion et devant l'abondance des témoins de travail du fer découverts, il était donc nécessaire de s'interroger sur le rôle joué par cette activité économique dans les dynamiques de l'agglomération antique – de son développement à son déclin – et ses relations avec des secteurs polarisants déjà étudiés, tels que la zone du grand sanctuaire. Cet axe de recherche est le reflet de la première problématique évoquée en introduction : « Comment la production métallurgique s'organise-elle dans la ville antique ? »

Les fouilles réalisées avant les années 1990 à Mandeuve n'ont pas pu bénéficier des méthodologies actuelles qui permettent de restituer avec précisions les étapes de la chaîne opératoire de production du fer. Le passage du minerai à l'objet fini nécessite en effet la mise en œuvre d'une suite d'opérations précises dont les déchets et témoins sont caractéristiques. La chaîne opératoire de la production sidérurgique est maintenant bien connue (entre autres : GSAF, 1991 ; Mangin (dir.), 2004).

Avant l'avènement progressif de la sidérurgie indirecte (en haut fourneau) à la fin du Moyen Âge, le fer est produit par la méthode dite « directe ». Le minerai, qui contient une part importante de fer sous la forme d'oxydes, est réduit dans un « bas fourneau » en présence du monoxyde de carbone ce qui conduit à la formation de fer métallique. Les éléments non ferreux fondent sous l'effet de la chaleur et s'évacuent sous la forme d'un fluide essentiellement composée de silice (scorie coulée ou piégée), alors que le fer métallique est réduit sous sa température de fusion (1536°C) et reste à l'état solide. Le résultat de cette opération est une masse métallique riche en inclusions et porosités, où le fer est irrégulièrement allié à du carbone (acier). Ce produit nécessite d'être travaillé par martelage à chaud afin de l'épurer et de l'homogénéiser, avant de pouvoir être utilisé comme matière première pour la fabrication d'objets.

La reconnaissance des étapes de production passe essentiellement par l'étude des déchets de ces activités, les matières premières et produits finis n'étant qu'exceptionnellement présents sur les lieux de production. Ces déchets sont de plusieurs types : chutes métalliques (soies de préhension, éléments découpés), battitures (petits éléments infra-centimétriques, composés majoritairement d'oxydes, et détachés du métal pendant le travail) ou scories en culot (agglomérat fondu de tous les éléments tombés dans le foyer : éléments de construction des structures de chauffe, sol, métal ou oxydes issus des pièces travaillées, éventuels ajouts volontaires). La caractérisation de ces déchets est réalisée à plusieurs échelles pour déterminer leurs propriétés, de l'évaluation à l'œil nu de larges lots jusqu'à l'observation détaillée d'individus représentatifs à l'échelle microscopique. L'approche macroscopique permet la définition de groupes partageant des caractères semblables, en même temps qu'une première évaluation de la nature des pertes générées par le travail de forge. Cette éva-

luation passe essentiellement par la quantification de la part de trois faciès dominants (SAS – scories argilo-sableuses, poreuses, légères, aux surfaces parfois bleutées, verdâtres, qui dénotent d'un travail générant peu de pertes en fer ; SGD – scories grises denses, d'aspect gris à noir, lisse et fondu, qui illustrent un travail générant des pertes sous la forme d'oxydes de fer ; SFR – scories ferreuses rouillées, magnétiques, souvent recouvertes de corrosion orangée, qui sont les témoins de travaux générant d'importantes pertes de fer sous sa forme métallique). L'étude de la métrologie des déchets permet de compléter ces premières observations. L'approche microscopique permet quant à elle d'étudier en détail les constituants de déchets représentatifs, pour définir les caractéristiques des travaux réalisés (nature des produits travaillés, conditions de chauffe et de transformation de la matière). Ces études ont été réalisées au laboratoire « Métallurgies et Cultures (UMR5060 – CNRS) à Sévenans, suivant une méthodologie largement publiée et éprouvée (par exemple Leroy *et al.* 2007 ; Bauvais et Fluzin, 2009 ; Berranger 2014).

Sur ces bases, l'enjeu est maintenant de tenter de tirer des informations d'ordre économique de ces observations ponctuelles, en les multipliant, pour en comprendre l'organisation. Les recherches menées par M. Mangin dans le secteur du Morvan-Auxois dans les années 1990 (Mangin *et al.* (dir.), 2000), le PCR *Les formes d'organisation de la production du fer en métallurgie ancienne* coordonné par M. Leroy et L. Cabboï de 2007 à 2012 (Leroy, Cabboï (dir.), 2013), puis le PCR *La sidérurgie en Bourgogne-Franche-Comté* initié en 2014 (Berranger (dir.), 2016) se placent dans cette mouvance. Le travail présenté ici, en s'interrogeant sur le rôle des activités sidérurgiques de l'agglomération antique d'*Epomanduodurum* dans le fonctionnement de la production régionale, s'inscrit lui aussi dans cette démarche, en prenant part au dernier programme cité. On retrouve ici la seconde des problématiques définies en introduction : « comment s'intègre cette agglomération dans l'économie du fer – production, échanges – dans l'espace régional ? »

## ÉTUDES DES TÉMOINS D'ACTIVITÉS MÉTALLURGIQUES

Les ensembles étudiés proviennent de 17 opérations de terrain, effectuées entre 1885 et 2015, et sont au nombre de 20. Ils présentent une documentation et un matériel disponibles à l'étude, très variables, selon qu'ils proviennent de chantiers bien documentés et où le mobilier a pu être enregistré, d'opérations ne donnant qu'une documentation partielle, ou de lots de matériel sans contexte (tableau 1). La présentation qui suit met en avant les études des trois secteurs jugés les plus intéressants, à titre d'exemple ; toutes les synthèses détaillées sont consultables dans le mémoire déposé à l'issue de ces études à l'Université de Besançon (Jeannot, 2015).

### Les ateliers du *Champs des Isles*, fouille de 1991

Deux ateliers de travail du fer ont été fouillés dans le secteur du Champs des Isles en 1991 (parcelles B336 et B337, Mathay, RAT67), sous la direction de Jean-Pierre Mazimann (Mazimann, 1991 ; Mazimann, 1992). Dans les rapports, deux « salles métallurgiques » sont identifiées, qui semblent fonctionner durant les mêmes phases chronologiques, entre la fin du 1<sup>er</sup> siècle et la fin de la période antonine (Fruchart, 2009). L'une semble accueillir uniquement des activités de forge (SM1), l'autre une activité polymétallurgique, entre travail du fer et des alliages cuivreux (SM2). Les relations entre les US livrant du mobilier métallurgique et ces deux ensembles ont en partie pu être déterminées sur la base de la reprise documentaire.

Les structures se résument à un foyer en fosse (Ø 0,5 m) et un éventuel calage d'enclume pour la salle SM2 et à un foyer en plaque construit en tuiles (1,2 x 0,9 m) pour la salle SM1. Les mobiliers métalliques n'ont pas fait l'objet d'un inventaire complet ; seuls huit fragments informes de blocs tuyère sont assimilés à SM1, issus des US ZC-212 et ZC-90. La salle SM2 contient quant à elle de nombreux témoins de travail des métaux cuivreux, en particulier du recyclage d'éléments de récupération, tel qu'évoqué dans le rapport de fouilles.

Les déchets de travail du fer étudiés dans chacun de ces ensembles sont présentés dans le tableau 2, par US, types et familles de mobilier. SM1 contient une forte majorité de scories du

| Code atelier     | Année de fouille | Secteur                     | Éléments remarquables étudiés | Masse de scories étudiée | Type d'opération  | Structures métallurgiques | Interprétation                  |
|------------------|------------------|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------|---|---------------------------|---------------------------------|
| CDI1885          | 1885             | <i>Les Champs des Isles</i> | -                             | -                        | Fouilles anciennes  | Atelier                   | Forge indéterminée              |
| CDI84            | 1984             | <i>Les Champs des Isles</i> | 25 culots                     | 4,8kg                    | Surveillance de chantier                                      | -                         | Épuration ?                     |
| FI85-Z1          | 1985             | <i>Oichoites</i>            | -                             | -                        | Fouilles  | Foyer                     | Forge indéterminée              |
| FI85-Z2          | 1985             | <i>Oichoites</i>            | 16 culots                     | 2,5kg                    | Fouilles  | Foyer ?                   | Forge indéterminée              |
| FI85-Z3          | 1985             | <i>Oichoites</i>            | -                             | -                        | Fouilles  | Bac de trempe             | Coutellerie ?                   |
| CDI87            | 1987             | <i>Les Champs des Isles</i> | 14 culots                     | 2,7kg                    | Fouilles  | Foyer ?                   | Forge ?                         |
| OI87             | 1987             | <i>Oichoites</i>            | -                             | -                        | Fouilles  | Foyer                     | Forge indéterminée              |
| CDI88            | 1988             | <i>Les Champs des Isles</i> | 18 culots                     | 1,8kg                    | Fouilles  | Foyers multiples          | Mise en forme & polymétallurgie |
| MONT89           | 1989             | <i>Montoilles</i>           | -                             | -                        | Fouilles  | Foyer                     | Forge indéterminée              |
| BRANDT90         | 1990             | <i>Les Champs des Isles</i> | 44 culots                     | 7,8kg                    | Fouilles  | Fosse de rejet            | Épuration                       |
| ES90-Z15         | 1990             | <i>Essarté</i>              | 23 culots                     | 4,6kg                    | Fouilles  | Fosse de rejet            | Forge indéterminée              |
| CDI91-SM1        | 1991             | <i>Les Champs des Isles</i> | 22 culots                     | 3,5kg                    | Fouilles  | Foyer                     | Épuration & mise en forme       |
| CDI91-SM2        | 1991             | <i>Les Champs des Isles</i> | 77 culots                     | 11kg                     | Fouilles  | Foyer                     | Recyclage et polymétallurgie    |
| ES91-Z21         | 1991             | <i>Essarté</i>              | 19 culots                     | 1,5kg                    | Fouilles  | Foyer                     | Forge indéterminée              |
| SHUNT97          | 1997             | <i>Oichoites</i>            | 11 culots                     | 1,6kg                    | Diagnostique  | Cave                      | Mise en forme                   |
| CDC98b           | 1998             | <i>Cloux-du-Château</i>     | -                             | -                        | Diagnostique  | -                         | Forge indéterminée              |
| CDC98a           | 1998             | <i>Cloux-du-Château</i>     | 19 culots                     | 1,9kg                    | Diagnostique  | -                         | Mise en forme & recyclages      |
| ES05             | 2005             | <i>Essarté</i>              | -                             | -                        | Diagnostique  | Cave                      | Forge indéterminée              |
| MONT12           | 2012             | <i>Montoilles</i>           | 10 culots                     | 1,9kg                    | Fouilles  | Foyer ?                   | Mise en forme ?                 |
| MONT15           | 2015             | <i>Montoilles</i>           | -                             | -                        | Diagnostique  | Foyer                     | Forge indéterminée              |
| Autres contextes |                  |                             | 108 culots                    | 40,5kg                   | Divers contextes incertains, par exemple de CDI91, SM1 ou SM2 |                           |                                 |

Tableau 1 : Liste des ateliers et matériel étudiés...

type SGD-ferreuses (scories de forme assez variable, d'une taille de 5 à près de 25 cm de diamètre, à matrice poreuse, d'aspect dé-chiqueté et aux surfaces mates de couleur noire-violette, parfois avec quelques plages noires brillantes et des charbons figés par la minéralisation). SM2 n'est quasi-exclusivement composée que de scories de types SFR (SFR-1 représente un sous-ensemble de ce groupe, aux caractéristiques particulièrement standardisées).

Les deux ensembles montrent une répartition similaire entre une majorité de culots riches en pertes ferreuses (SFR et SGD\_ferreuses) de masses relativement importantes (dépassant régulièrement les 200 g) et une plus faible proportion de scories peu ferreuses (SAS) de taille moindre (ne dépassant jamais 200g). Or, plus la matière travaillée est avancée dans la chaîne opératoire – loin de la masse brute de réduction, proche de l'objet fini – plus ces pertes sont réduites. En effet, les pertes métalliques sont plus importantes quand le matériau travaillé est à un stade de compactage moins avancé; les pertes sous forme d'oxydes, quant à elles, s'amoindrissent avec la baisse de la température de travail et la diminution des pièces travaillées. Le travail dans ces contextes semble donc débiter avec un matériau brut (hétérogène, à un niveau de compactage moindre) et se poursuivent jusqu'à des étapes plus avancées dans la chaîne opératoire (soudures ou déformations réalisées sur un métal bien compacté).

Neuf culots de ces contextes ont été étudiés à l'échelle microscopique, ce qui permet de préciser l'opposition évoquée plus haut entre la salle SM1, marquée par la présence de scories SGD\_ferreuses, et SM2, réunissant des culots standardisés SFR\_1. Les résultats des observations métallographiques réalisées sur un individu caractéristique de chacun de ces types sont présentés ci-dessous.

Le culot 125, issu de la salle SM2, est une fine scorie très fortement concave, qui semble avoir occupé toute la largeur du foyer dont elle est issue (10 cm de large, trois points d'appui). La surface supérieure, plutôt lisse, montre quelques discrètes zones grises recouvertes par de larges plages d'oxydes noirs à bordaux. Ces oxydes recouvrent la majeure partie de la face inférieure, plus tortueuse et craquelée. La matrice est dense et très magnétique.

| Contexte               | US                            | Type           | Famille_mobilier              | NR                            | Masse        |      |
|------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------|------|
| SM1                    | 3148                          | SGD_fer-reuses | Culot de forge                | 3                             | 450          |      |
|                        |                               |                | Fragments de scories de forge | 2                             | 125          |      |
|                        |                               | SGD-SFR        | Culot de forge                | 1                             | 75           |      |
|                        | ZC-212                        |                | SFR                           | Culot de forge                | 2            | 225  |
|                        |                               |                | SGD_fer-reuses                | Culot de forge                | 4            | 415  |
|                        |                               |                |                               | Fragments de scories de forge | 8            | 210  |
|                        |                               |                | SGD-SFR                       | Culot de forge                | 1            | 280  |
|                        |                               |                | SAS                           | Culot de forge                | 1            | 75   |
|                        | ZC-62                         |                | SFR                           | Culot de forge                | 1            | 210  |
|                        |                               |                | SAS                           | Fragments de scories de forge | 5            | 250  |
|                        | ZC-90                         |                | SGD_fer-reuses                | Culot de forge                | 6            | 1325 |
|                        |                               |                |                               | Culot de forge                | 2            | 140  |
|                        |                               |                | SAS                           | Fragments de scories de forge | 10           | 150  |
| <b>TOTAL SM1</b>       |                               |                |                               | <b>46</b>                     | <b>3930</b>  |      |
| SM2                    | ZA-9                          | SFR            | Culot de forge                | 10                            | 975          |      |
|                        |                               |                | Fragments de scories de forge | 12                            | 320          |      |
|                        |                               | SFR_1          | Culot de forge                | 28                            | 4125         |      |
|                        |                               | SGD            | Culot de forge                | 2                             | 485          |      |
|                        |                               | SGD-SFR        | Culot de forge                | 2                             | 370          |      |
|                        | SAS                           |                | Culot de forge                | 2                             | 245          |      |
|                        |                               |                | Fragments de scories de forge | 8                             | 240          |      |
|                        |                               |                |                               |                               |              |      |
|                        | ZB-47                         | SFR            | Culot de forge                | 25                            | 2855         |      |
|                        |                               |                | Fragments de scories de forge | 5                             | 130          |      |
|                        |                               | SFR_1          | Culot de forge                | 2                             | 265          |      |
|                        |                               | SGD            | Culot de forge                | 2                             | 245          |      |
|                        |                               | SGD-SFR        | Culot de forge                | 1                             | 760          |      |
| SAS                    |                               | Culot de forge | 1                             | 160                           |              |      |
|                        | Fragments de scories de forge | 11             | 390                           |                               |              |      |
| <b>TOTAL SM2</b>       |                               |                |                               | <b>111</b>                    | <b>11565</b> |      |
| <b>TOTAL SM1 + SM2</b> |                               |                |                               | <b>157</b>                    | <b>15495</b> |      |

Tableau 2 : Comptage des déchets scorifiés issus de l'opération CDI91.

À l'échelle microscopique, cette scorie présente une matrice en majeure partie constituée d'oxydes : de gros fragments de métal oscillant entre ferrite seule et acier jusqu'à 0,5 %C (5 % de la surface), qui présentent des faces à tendance planes et de nettes zones de brûlure, semblent à l'origine d'une forte proportion de

corrosion (37 %) à l'intérieur de la matrice scoriacée. Les oxydes formés à chaud sont aussi très présents : des globules de wustite saturant la matrice siliceuse, dont une très faible proportion est visible (17 %). Les porosités ont tendance à prendre des formes ovoïdales, et représentent 30 % de la surface.

La planche 1 présente l'organisation de ces éléments sur la surface étudiée. Plusieurs dépôts semblent se superposer, en alternant couche d'oxydes et pertes à l'état métallique. La matrice siliceuse est apparente au fond du culot et dans la partie la plus proche de l'arrivée d'air ; après ces premiers dépôts, une alternance de séquences à forte oxydation et générant de fortes pertes en fer est enregistrée au moins à cinq reprises ; cet aspect cyclique est plus visible encore dans un autre culot analysé très similaire, 126. Les séquences générant une forte oxydation aboutissent à la formation d'une matrice ne présentant que des globules de wustite (planche 1, cliché 1 et 2). Entre elles, les pertes en fer se répartissent entre gros fragments aux faces plates (planche 1 cliché 3), dont les surfaces déchiquetées peuvent être mises en relation avec les évidentes preuves de brûlure du métal (planche 1 cliché 4) constituées par les billes ou globules métalliques. Les inclusions de scories visibles dans certains fragments ferreux peuvent aussi être assimilées à ce phénomène, dans la mesure où le fer entre partiellement en fusion lors de ces événements (planche 1 cliché 5). Les structures de Widmanstätten observables après attaque au nital (planche 1 cliché 6) confirment la surchauffe de l'alliage.

Dans la mesure où tous les fragments de fer perdus dans ce culot présentent des faces planes, ces éléments semblent pouvoir être interprétés comme des fragments d'objets issus d'étapes postérieures aux opérations d'épuration. Si ces pertes ne sont pas dues à un métal incomplètement compacté, ce culot pourrait être le témoin d'activités de recyclage : il résulte en effet d'un travail réalisé en atmosphère très oxydante, où l'artisan cherche à atteindre une température suffisante pour faire fondre partiellement le métal. Le culot marque par ailleurs une répétition cyclique de la même séquence de travail. Or, puisqu'il est possible de facilement recycler des fers plats de taille suffisante par simples soudures d'assemblage, l'utilisation d'une technique générant tant de pertes pose la question de l'utilisation d'une matière première moins aisément transformable ; les clous, l'un



Photographie de la scorie n°125 avec indication du plan de coupe.

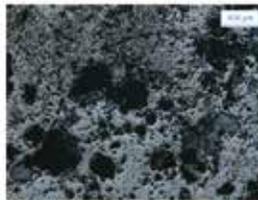


- LEGENDE
- Corrosion externe
  - Corrosion interne
  - Fer métallique
  - Wustite
  - Ferrite
  - Amorphes

Cartographie de la section étudiée et dessin d'interprétation de la section.



Cliché n°1 :  
Matrice saturée en globules de wustite.  
Micrographie M. Berranger.



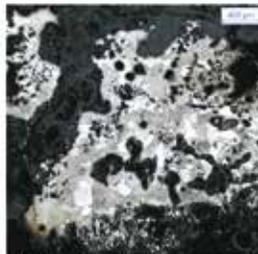
Cliché n°2 :  
Matrice saturée en globules de wustite.  
Micrographie M. Berranger.



Cliché n°3 :  
Fragment de métal aux faces plates.  
Micrographie M. Berranger.



Cliché n°4 :  
Métal en cours de brûlure.  
Micrographie M. Berranger.



Cliché n°5 :  
Fragment de ferrite en cours de brûlure, après attaque au nital.  
Micrographie M. Berranger.



Cliché n°6 :  
Ferrite aciculaire dans un léger acier, 0,3%C env.  
Micrographie M. Berranger.

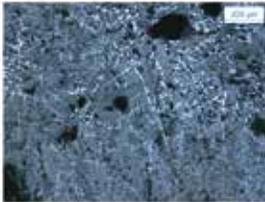
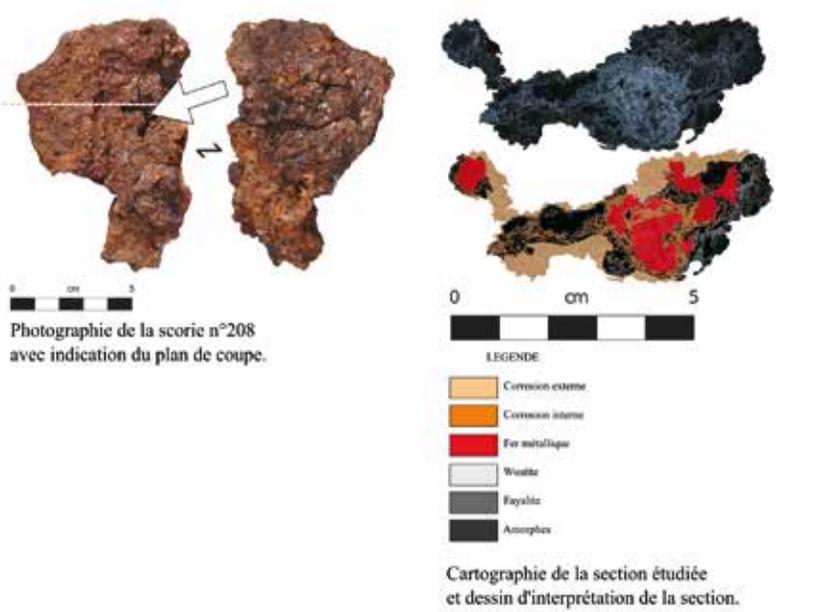
Planche 1 – Étude de la scorie en culot 125.

des principaux consommateurs de fer à cette période, pourrait être un exemple de ce type de matières. À ces éléments s'ajoute enfin une trace de corrosion de cuivre relevée à l'échelle macroscopique : si aucun indice de travail du cuivre n'a été noté dans le culot, la position en face supérieure de la trace de corrosion semble interdire son interprétation comme pollution due à l'utilisation d'un même foyer pour des activités de forge et de polymétallique. Elle s'accorde par contre tout à fait avec les activités de recyclage, considérant la probabilité de la récupération d'éléments comprenant à la fois fer et cuivre à l'époque gallo-romaine.

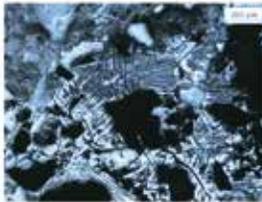
Le culot n° 208, issu de la salle SM1, est une scorie de taille moyenne (inférieure à 10 cm), formée dans un angle du foyer, irrégulièrement plano-convexe en coupe. La matrice est relativement poreuse et magnétique. Ses surfaces sont quasi-intégralement recouvertes d'une importante couche de charbons minéralisés dans un placage d'oxydes noirs à bords.

À l'échelle microscopique, le culot comprend une très forte proportion de fragments de fer métallique corrodés (32 %) accompagnés de corrosion incluse dans la matrice scoriacée (18 %). La matrice siliceuse, majoritairement composée de lattes de fayalite, ne représente qu'une très faible part de la scorie (9 %). La part restante est constituée par les porosités (40 %), souvent au profil très déchiqueté.

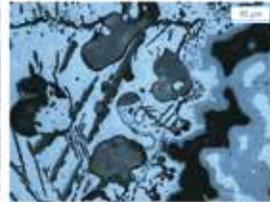
La planche 2 montre l'organisation et la forme de ces éléments, interprétés sur la base de la cartographie microscopique de la surface polie. Deux phases stratigraphiques sont discernables à partir de cette organisation : dans un premier temps, la scorie n'est formée que de phases siliceuses et inclusions argilo-sableuses, peu fondues et sans pertes en fer, présentant rarement quelques dendrites de wustite (planche 2, cliché 1). Cette phase étant surtout présente à proximité de l'arrivée d'air, il est possible qu'elle ne se soit formée que lors de la mise en chauffe du foyer, à partir des éléments intrusifs (éléments de construction, poussière, sols) ou lors d'une première phase de petite mise en forme sans rapport avec les travaux suivants. La seconde phase est nettement plus caractéristique d'un travail sidérurgique, par la présence de nombreux fragments de métal de taille relativement importante (à l'échelle du cm). Ces fragments sont en grande majorité de formes très déchiquetées, fortement carburés (acier



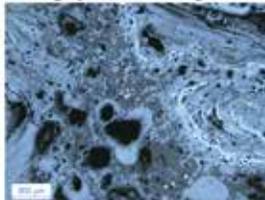
Cliché n°1 :  
Phase silicatée avec dendrites de wustite.  
Micrographie M. Berranger.



Cliché n°2 :  
Phantôme d'acier hypereutectoïde (1/1,5%C), identifié à partir des lamelles de cémentite conservées.  
Micrographie M. Berranger.



Cliché n°3 :  
Acier hypereutectoïde corrodé et inclusions siliceuses.  
Micrographie M. Berranger.



Cliché n°4 :  
Filaments de métal corrodés dans une matrice siliceuse.  
Micrographie M. Berranger.

Planche 2 – Étude de la scorie en culot 208.

| N° échantillon | Opération | Typologie        | Métrologie |        |        |         | Taux de porosité (%) | Matrice base silice |  |                    |                        |                                       | Battitures            |                   |                        |                   |                     |                                      |  |
|----------------|-----------|------------------|------------|--------|--------|---------|----------------------|---------------------|--|--------------------|------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-------------------|------------------------|-------------------|---------------------|--------------------------------------|--|
|                |           |                  | Masse (g)  | L (mm) | l (mm) | ep (mm) |                      | Stratification      | Proportion inclusions argilo-sableuses (%) | Fayalite seule (%) | Fayalite + wustite (%) | Matrice majoritairement siliceuse (%) | Proportion oxydes (%) | Battitures plates | Battitures globulaires | Battitures billes | Croutte de fayalite | Taille importante (> 1/2 centimètre) |  |
| 4              | CDI88     | SAS              | 88         | 70     | 70     | 30      | 69                   | 0                   | 16   | 0                  | 0                      | 84                                    | 0                     |                   |                        |                   |                     |                                      |  |
| 12             | CDI88     | SGD              | 78         | 45     | 75     | 15      | 2                    | 0                   | 0  | 58                 | 58                     | 36                                    | 5                     |                   |                        |                   |                     |                                      |  |
| 13             | CDI88     | SGD              | 224        | 75     | 75     | 45      | 41                   | 0                   | 0  | 32                 | 32                     | 31                                    | 0                     |                   |                        |                   |                     |                                      |  |
| 67             | ES91      | SFR <sub>1</sub> | 600        | 90     | 110    | 60      | 36                   | 0                   | 1  | 35                 | 35                     | 26                                    | 23                    | 1                 |                        | 1                 | 1                   |                                      |  |
| 90             | CDI91     | SFR              | 410        | 100    | 90     | 50      | 40                   | 1                   | 16   | 22                 | 22                     | 41                                    | 10                    | 1                 | 2                      | 1                 |                     |                                      |  |
| 125            | CDI91     | SFR <sub>1</sub> | 300        | 80     | 100    | 50      | 47                   | 0                   | 0  | 0                  | 0                      | 25                                    | 14                    |                   |                        |                   |                     |                                      |  |
| 126            | CDI91     | SFR <sub>1</sub> | 175        | 60     | 80     | 25      | 58                   | 0                   | 0  | 0                  | 0                      | 0                                     | 24                    |                   |                        |                   |                     |                                      |  |
| 159            | CDI91     | SGD              | 270        | 70     | 90     | 60      | 32                   | 1                   | 17   | 21                 | 21                     | 55                                    | 1                     |                   | 2                      | 1                 |                     |                                      |  |
| 208            | CDI91     | SGD_f            | 200        | 65     | 100    | 40      | 48                   | 0                   | 0  | 14                 | 14                     | 0                                     | 0                     |                   |                        |                   |                     |                                      |  |
| 241            | CDI91     | SGD_f            | 190        | 70     | 85     | 30      | 40                   | 0                   | 0  | 34                 | 34                     | 28                                    | 8                     |                   |                        |                   |                     |                                      |  |
| 243            | CDI91     | SGD_f            | 110        | 65     | 70     | 23      | 54                   | 0                   | 0  | 0                  | 0                      | 59                                    | 37                    |                   | 1                      |                   |                     |                                      |  |
| 264            | CDI91     | SGD_f            | 150        | 60     | 70     | 25      | 27                   | 0                   | 7  | 0                  | 0                      | 25                                    | 8                     |                   |                        |                   |                     |                                      |  |
| 328            | CDC98     | SGD              | 225        | 70     | 80     | 30      | 46                   | 0                   | 20   | 41                 | 41                     | 36                                    | 1                     | 1                 | 1                      |                   |                     |                                      |  |
| 329            | CDC98     | SGD              | 250        | 60     | 70     | 45      | 28                   | 1                   | 21   | 28                 | 28                     | 24                                    | 5                     | 1                 |                        |                   |                     |                                      |  |
| 330            | CDC98     | SGD              | 150        | 50     | 65     | 45      | 64                   | 0                   | 2  | 0                  | 0                      | 66                                    | 14                    |                   |                        | 1                 |                     |                                      |  |
| 397            | BRANDT90  | SGD_f            | 560        | 65     | 130    | 40      | 63                   | 0                   | 0  | 0                  | 0                      | 27                                    | 19                    |                   |                        |                   |                     |                                      |  |
| 562            | CDI91     | SAS              | 70         | 50     | 55     | 30      | 43                   | 0                   | 47   | 0                  | 0                      | 47                                    | 6                     | 1                 | 1                      |                   |                     |                                      |  |

Tableau 3 : Résultats des analyses microscopiques des scories de l'agglomération.

| N° échantillon | Pertes métalliques                   |                                   |                                    |                      |             |   |            |                  |                               |                       |                      | Chaîne opératoire    |                         |           |                   |                     |                      |                    |
|----------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------|-------------|---|------------|------------------|-------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|-----------|-------------------|---------------------|----------------------|--------------------|
|                | Nature                               |                                   |                                    |                      |             |   | Proportion |                  |                               |                       | Structure            |                      |                         | Réduction | Epuraton primaire | Epuraton secondaire | Manufacture primaire | Manufacture finale |
|                | Taille importante (> 1/2 centimètre) | Gros fragments (> 1/2 centimètre) | Petits fragments (<1/2 centimètre) | Surfaces déchiquetés | Angles vifs | Inclusions base silice / replis dans le métal | Filaments  | Globules, billes | Très importante (Plus de 15%) | Importante (15 à 10%) | Moyenne (de 10 à 5%) | Faible (moins de 5%) | Ferrite à acier à 0,2%C |           |                   |                     |                      |                    |
| 4              |                                      |                                   |                                    |                      |             |   | 1          |                  |                               |                       | 0                    |                      |                         |           |                   |                     | 1                    |                    |
| 12             |                                      |                                   |                                    |                      |             |   | 1          |                  |                               |                       | 0                    |                      |                         |           |                   |                     | 2                    |                    |
| 13             |                                      |                                   |                                    |                      |             | 1   | 1          | 20               |                               |                       |                      |                      |                         |           |                   |                     | 2                    |                    |
| 67             |                                      |                                   |                                    | 1                    |             | 1   | 2          |                  |                               | 7                     |                      | 1                    | 1                       |           |                   |                     | 1                    | 2                  |
| 90             |                                      |                                   |                                    |                      |             | 1   | 2          |                  |                               | 6                     |                      |                      |                         |           | 1                 |                     | 2                    | 1                  |
| 125            |                                      |                                   |                                    |                      |             | 1   | 1          |                  |                               | 8                     |                      | 2                    | 1                       |           |                   |                     |                      |                    |
| 126            |                                      |                                   |                                    |                      |             | 1   | 1          | 12               |                               |                       |                      | 2                    |                         |           |                   |                     |                      |                    |
| 159            |                                      |                                   |                                    | 2                    |             |   | 1          |                  |                               | 5                     |                      | 2                    |                         |           |                   |                     | 1                    |                    |
| 208            |                                      |                                   | 2                                  |                      |             | 1   |            | 54               |                               |                       |                      | 1                    | 1                       |           | 1                 | 2                   |                      |                    |
| 241            |                                      |                                   | 1                                  |                      |             | 1   | 1          |                  |                               | 5                     |                      |                      |                         |           |                   |                     | 1                    |                    |
| 243            |                                      |                                   |                                    |                      |             |   | 2          |                  |                               |                       | 0                    |                      |                         |           |                   |                     | 1                    |                    |
| 264            |                                      |                                   | 2                                  |                      |             | 2   | 2          | 36               |                               |                       |                      |                      | 1                       |           | 2                 | 2                   |                      |                    |
| 328            |                                      |                                   |                                    |                      |             | 1   | 1          |                  |                               |                       |                      |                      | 1                       |           |                   |                     |                      | 1                  |
| 329            |                                      |                                   |                                    | 2                    |             |   | 1          | 21               |                               |                       |                      |                      | 1                       |           | 1                 |                     | 1                    | 1                  |
| 330            |                                      |                                   |                                    |                      |             | 1   | 2          |                  |                               | 5                     |                      |                      |                         |           |                   |                     | 2                    |                    |
| 397            |                                      |                                   | 2                                  |                      |             |   |            | 30               |                               |                       |                      |                      | 2                       |           | 2                 | 2                   |                      |                    |
| 562            |                                      |                                   |                                    |                      |             |   |            |                  |                               |                       | 0                    |                      |                         |           |                   |                     |                      | 1                  |

Tableau 3 : Résultats des analyses microscopiques des scories de l'agglomération.

hypereutectoïde, entre 1 et 1,5 %C, planche 2, cliché 2) et parfois contiennent quelques inclusions majoritairement siliceuses (planche 2, cliché 3), ou sont accompagnés localement de billes et filaments métalliques pris dans les rares îlots de matrice siliceuse (planche 2, cliché 4). Ces fragments, par leurs formes déchiquetées et l'importance de leur volume, suggèrent une forte parenté de ces chutes avec un métal brut de réduction. Dans la mesure où les fragments observés semblent comporter quelques faces planes, il est possible que le métal travaillé ait déjà subi un compactage sommaire ; néanmoins au vu de l'importance des chutes métalliques, le travail réalisé ici peut sans risque être interprété comme une opération d'épuration de métal brut, qu'il ait ou non subi un premier compactage.

Bien que les deux ensembles travaillent tous deux des produits bruts jusqu'à l'obtention d'objets propres et réguliers, les études des deux culots vues plus haut mettent en évidence une différence fondamentale : en effet, dans SM1 est utilisé un métal très carburé aux propriétés proches de la masse brute de réduction ; dans SM2 au contraire, que ce soit pour le fer ou le bronze, semblent travaillés majoritairement des produits de récupération dans le cadre d'opérations de recyclage. Les résultats des études microscopiques réalisées dans ces contextes sont présentés dans le tableau 3.

Malgré leur relative contemporanéité et leur fort rapprochement géographique, ces deux ateliers s'organisent donc très différemment. Au-delà des différences de structures de chauffe ou des activités pratiquées, l'étude des culots suggère des stratégies d'approvisionnement radicalement opposées. Ainsi, des fers très proches de produits bruts de réduction ont été travaillés ici, malgré l'absence apparente de réduction dans l'espace de la cité Séquane (Laurent *et al.*, 2012) ; en parallèle, des activités de recyclage induisant de fortes pertes de métal ont aussi été réalisées. Malgré la diversité des stratégies d'approvisionnement, il semble que la production ait été tournée dans les deux cas vers la fabrication d'objets finis, comme le suggère l'identification dans tous les contextes d'une part de déchets de petite mise en forme. Des ateliers aux spécialisations différentes pouvaient donc réaliser en parallèle tous les travaux de la chaîne opératoire de post-réduction.

### Les ateliers du *Champs des Isles*, fouille de 1988

Un ensemble de pièces abritant des activités métallurgiques est issu de la fouille effectuée sur le lotissement du *Champs des Isles* à Mathay, en 1987 et 1988 (parcelle n° 7 du lotissement). Ces ensembles sont présentés dans le rapport rendu au SRA Franche-Comté en 1988 (Lame & Mazimann, 1988). Dans les contextes fouillés, deux pièces adjacentes semblent avoir accueilli des activités métallurgiques variées : les nombreux foyers et les sols livrent des scories de travail du fer en abondance, toujours associées à de nombreux témoins d'activités de bronzier, en particulier gouttelettes et coulures d'alliages cuivreux.

Deux autres foyers de cette pièce livrent des scories, hélas non retrouvées ou non prélevées. Le seul ensemble de déchets à avoir pu être étudié provient de la seconde pièce (carré RA22/23), dans laquelle sont documentés un foyer et une fosse à vocation métallurgique. Le foyer, oblong, d'une trentaine de cm environ, était installé à même le sol argileux contre le mur sud-ouest de la pièce.

Le lot est clairement dominé par les scories de type SAS (tableau 4), généralement témoins d'activités générant peu de pertes. Les types SFR et SGD sont également représentés, avec quatre individus chacun. Les culots des types SGD et SAS ont des masses en majorité inférieures à 100 g, et ne dépassent pas 150 g, contrairement aux scories des types SFR et SGD-Mixtes, dont les individus peuvent régulièrement atteindre plus de 200 g. Dans les deux cas, ces masses suggèrent des travaux peu intensifs, où les objets travaillés sont de taille réduite ou ne restent qu'un temps court dans le foyer.

| Opération    | US      | Type       | Famille_mobilier              | NR        | Masse       |
|--------------|---------|------------|-------------------------------|-----------|-------------|
| CDI88        | RA22/23 | SFR        | Culot de forge                | 4         | 642         |
|              |         |            | Fragments de scories de forge | 6         | 226         |
|              |         | SGD        | Culot de forge                | 4         | 237         |
|              |         | SGD-Mixtes | Culot de forge                | 1         | 224         |
|              |         | SAS        | Culot de forge                | 8         | 582         |
|              |         |            | Fragments de scories de forge | 5         | 53          |
| <b>TOTAL</b> |         |            |                               | <b>28</b> | <b>1964</b> |

Tableau 4 : Comptage des déchets scorifiés issus de l'opération CDI88.

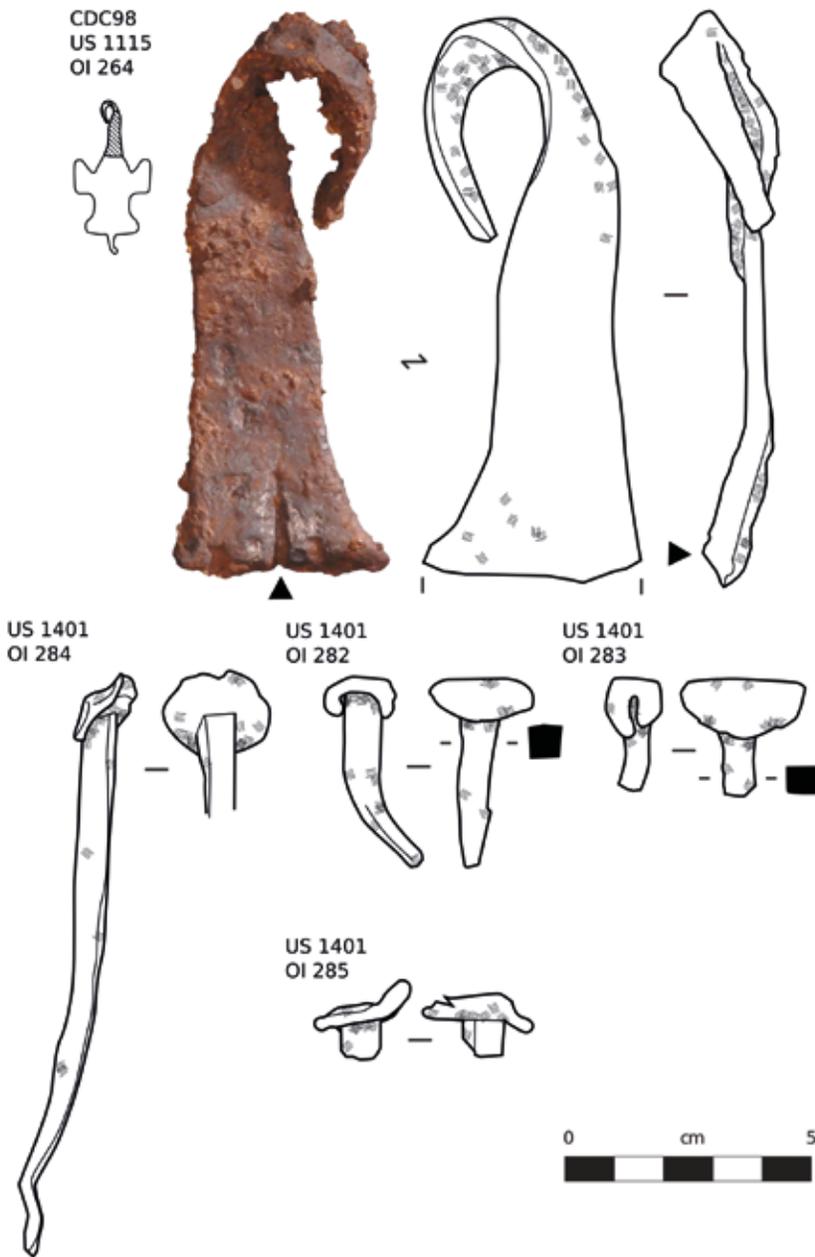
Un culot de chacun des trois types de scories représentées a été étudié à l'échelle microscopique (tableau 3); ces culots dépeignent un atelier de métallurgie aux activités variées, tournées vers des activités avancées dans la chaîne opératoire sidérurgique. La matière première employée semble pouvoir avoir été proche du produit brut, bien que déjà travaillée (présence d'acier, chutes massives); néanmoins le travail du cuivre et la fabrication de petits objets semblent y être aussi réalisés. Les nombreuses billes cuivreuses trouvées en contact avec le foyer ajoutent des éléments probants à ce discours, bien qu'il soit difficile d'identifier les objets finis issus de ce travail.

Ce contexte livre donc un petit atelier clairement orienté vers le travail de petits objets, où le fer est travaillé conjointement aux alliages cuivreux. Pourtant contemporain des ensembles SM1 et SM2, cet atelier présente un travail différent de ces deux exemples, preuve d'une grande variété dans les formes de production présentes dans l'agglomération du Haut-Empire.

### Un atelier du IV<sup>e</sup> siècle aux *Cloux du Château*, fouille de 1998

Dans le secteur des *Cloux du Château*, un chantier permet de documenter l'activité d'un atelier métallurgique issu d'une phase plus tardive de l'agglomération : un diagnostic suivi de fouilles menés en 1998 a livré un atelier métallurgique, évoqué dans le *Document d'évaluation du patrimoine archéologique des villes de France* (Mougin *et al.*, 2003). La fouille n'a hélas pas fait l'objet d'un rapport; seul le compte-rendu de diagnostic est disponible (Mazimann (dir.), 1997) et il ne fournit qu'une documentation très partielle. Un premier inventaire du mobilier avait néanmoins été réalisé dans le cadre du PCR *Epomanduodurum* (Barral (dir.), 2005, p. 179-192), mais de nombreux objets en avaient été écartés, entre autres clous, fragments de fer et autres éléments peu reconnaissables. L'étude de ces mobiliers paraissait cependant particulièrement intéressante, puisque se trouvaient associés, dans un contexte daté du IV<sup>e</sup> siècle (US 1401), des éléments métalliques tranchés et des déchets scorifiés. Un inventaire systématique du mobilier et des scories de ce contexte a donc été entrepris.

L'étude des clous de cet ensemble est particulièrement éloquent : sur les 350 individus comptés, seuls 27 sont complets et pourraient se trouver en position d'utilisation. Les autres



Fragment de pince d'hipposandale et clous arrachés et fragmentés

Planche 3 – Mobilier en fer des US 1115 et 1401.

individus montent très régulièrement des traces d'arrachage, têtes tordues ou relevées, tiges pliées irrégulièrement (planche 3, objets 282 à 285), ou traces de tranche. À leur côté, se retrouvent un grand nombre d'éléments fragmentaires d'hipposandales (ferrures de chevaux, cf. Halbout *et al.*, 1986), renforts latéraux, pinces (planche 3, objet 264), talonnières ou crochets ; ces derniers montrent systématiquement des stigmates de tranche à chaud. Ce constat, entre la part importante des fragments de clous – têtes, tiges ou pointes isolées – et la présence de parties d'hipposandales, suggère la réalisation d'un travail métallurgique destiné à réutiliser ces éléments devenus trop petits pour être mis en forme en l'état. Or, cette pratique trouve son parallèle direct dans le site de Cutry-la-Hache (54, Leroy & Cabboi (dir.), 2013). Sur ce site, daté du IV<sup>e</sup> siècle lui aussi, l'analyse archéométallurgique a permis de démontrer le recyclage de clous et de fragments de sonnaillles par agglomération à chaud. Cette pratique est déjà connue par ailleurs, par exemple dans la forge traditionnelle japonaise (Merluzzo & Forrières, 1995) : en plaçant de petits éléments de vieux fers dans un foyer fermé, chauffé en atmosphère légèrement réductrice, elle permet d'agglomérer ces éléments et de les carburer, sans intervention mécanique. Le produit issu de cette opération est une masse comparable aux produits de la réduction, qui doit ensuite être épurée afin de rendre le métal forgeable. Dans ce sens, l'absence observée de talonnières complètes ou de soles d'hipposandales s'expliquerait par la facilité de recycler ces grands éléments de manière plus simple, par replis et soudures.

Plusieurs éléments de cet ensemble ont été étudiés à l'échelle microscopique – soies coupées, éléments en cours de travail ou fragments d'hipposandales – afin de caractériser les propriétés du métal dont ils sont constitués. Parmi ceux-ci, l'objet 262 est une hipposandale dont il manque la pince et un renfort latéral, et dont la talonnière et le second renfort latéral ont été pliés dans le plan de la sole. L'objectif de l'étude de cet objet était avant tout de déterminer si les déformations observées étaient bien le fruit d'une intervention volontaire réalisée à chaud dans un contexte de forge.

L'objet a été découpé afin d'en étudier deux sections, l'une centrée sur le pli du renfort latéral, l'autre courant de la base du



Photographie de l'objet n°262.



Cartographie des sections étudiées après attaque chimique au nital (3%) et dessin d'interprétation.



Cliché n°1 :  
Inclusion déformée saturée de globules de wustite.  
Micrographie M. Berranger.



Cliché n°2 :  
Inclusions peu déformées, en majorité siliceuses.  
Micrographie M. Berranger.



Cliché n°3 :  
Couches de ferrite réagissant différemment à l'attaque acide et révélant une superposition de feuilles soudées.  
Micrographie M. Berranger.



Cliché n°4 :  
Repli révélé par des lignes de soudures superposées.  
Micrographie M. Berranger.

Planche 4 – Étude de l'objet 262 (hipposandale).

crochet aux premiers centimètres de la sole, telles que présentées dans la planche 4.

À l'échelle microscopique, le métal présente peu d'inclusions siliceuses (2,6 %). Toutes sont fortement étirées, et comprennent tantôt des globules de wustite (planche 4 cliché 1), tantôt de la fayalite en lattes (planche 4, cliché 2). Il s'agit exclusivement d'un fer non carburé, constitué de ferrite sans aucun écrouissage visible – pas même au niveau du renfort latéral ou de la liaison sole-talonnière. Cette liaison montre par ailleurs une forte abrasion sur sa face extérieure, identifiable par l'interruption de lignes d'inclusions qui sortent de l'objet à cet endroit. L'angle formé entre ces parties de la sandale semble donc avoir été tronqué par l'usure avant d'être ouvert. Ces premières observations permettent déjà de démontrer que l'objet a été utilisé et qu'il a été déformé à chaud après cette utilisation. Inutilisable en l'état, il était donc bien destiné à être recyclé dans ce contexte.

L'observation montre en outre de nombreuses lignes de soudures parcourant l'objet : après une courte attaque acide (nital) destinée à révéler la structure du métal, elles apparaissent sous la forme de lignes de moindre action du réactif (cf. Tylecote, 1991), ou de zones de contrastes entre des fers aux propriétés différentes (tailles des grains, coloration de la ferrite ; planche 4 cliché 3).

Ces lignes de soudures peuvent être les témoins du repli de la masse de métal initiale sur elle-même, destiné à l'homogénéiser – comme le montrent les lignes d'inclusions en U ou en Y encore visibles dans le renfort latéral (planche 4 cliché 4). L'hétérogénéité des fers présents suggère aussi qu'elles puissent être dues à l'assemblage de masses de métal aux propriétés légèrement différentes ; dans la mesure où ces masses de métal ne se différencient pas par des contrastes de teneurs en C ou P – qui auraient modifié leurs propriétés mécaniques – cet assemblage n'aurait pas d'autre fonction que la réunion d'éléments devenus trop petits pour être mis en forme directement. Le métal de l'hippodamale semble donc lui-même issu du recyclage de vieux fers.

L'étude de cet objet permet donc de déterminer, non seulement qu'il s'agit d'un élément mis en forme à partir de fer recyclé, mais aussi qu'il a été déformé à chaud après son utilisation, ce qui suggère le début d'un nouveau cycle de réutilisation de la matière. Des observations similaires ont été réalisées sur d'autres chutes étudiées dans ce contexte, suggérant que cet exemple

n'est pas un cas isolé; le fer pouvait donc à cette époque être recyclé à plusieurs reprises, les produits usagés formant un stock de matière première pour la fabrication de nouveaux objets.

En parallèle de l'étude de ces mobiliers, les déchets scorifiés apportent leur lot d'informations concernant cet ensemble et les activités qui en sont à l'origine. Le tableau 5 présente les types de déchets scorifiés étudiés à l'échelle macroscopique dans ce contexte. Il indique une relative surreprésentation des culots SAS par rapport aux autres types, alors que SGD, SGD-SFR et SFR sont présentes en proportions similaires. Ce premier constat suggère une certaine orientation de l'activité autour d'opérations générant peu de pertes en métal et oxydes, soit principalement des opérations de mise en forme.

| Opération    | US   | Type         | Famille_mobilier              | NR         | Masse (g)   |
|--------------|------|--------------|-------------------------------|------------|-------------|
| CDC98        | 1400 | SFR          | Culot de forge                | 2          | 175         |
|              |      |              | Fragments de scories de forge | 18         | 620         |
|              |      | SGD_ferreuse | Culot de forge                | 1          | 160         |
|              |      | SGD          | Culot de forge                | 3          | 525         |
|              |      |              | Fragments de scories de forge | 29         | 1200        |
|              |      | SGD-SFR      | Culot de forge                | 4          | 425         |
|              |      | SAS          | Culot de forge                | 9          | 565         |
|              |      |              | Fragments de scories de forge | 76         | 1125        |
| <b>TOTAL</b> |      |              |                               | <b>142</b> | <b>4795</b> |

Tableau 5 : Comptage des déchets scorifiés issus de l'US 1400.

Trois individus ont été étudiés à l'échelle microscopique (tableau 3); parmi ceux-ci, deux sont les témoins d'activités assimilables à la mise en forme de pièces de tailles importantes ou à la réalisation de soudures – qui pourraient confirmer l'importance dans ce contexte du recyclage par replis successifs. La dernière se démarque par des caractéristiques évoquant plutôt des opérations d'épuration, telles que la présence de gros fragments carburés. La régularité des faces de ces fragments et la reconnais-

sance de traces d'oxydes de cuivre et d'étain pourrait cependant suggérer qu'il puisse s'agir de métal brut de recyclage plutôt que de réduction (considérant la probabilité de recycler des objets composites – Schwab & Senn, 2007). Les déchets de telles activités sont néanmoins encore trop peu connus pour permettre une interprétation plus affirmative.

Sur ces bases, il semble possible de reconstituer une partie de la chaîne opératoire suivie ici : les hipposandales et les clous, produits courants, auraient été récupérés pour être recyclés ensemble ; les éléments les plus fragiles des hipposandales, déjà tordus, (renforts latéraux), arrachés à froid, puis les autres appendices coupés à chaud (crochet, pince). Ces éléments pourraient alors être mêlés aux clous sectionnés et recyclés par agglomération à chaud, quand les plus gros éléments (sole et talonnière) auraient été recyclés par replis et soudures successifs. Il est moins aisé de déterminer les produits sortant de cet atelier.

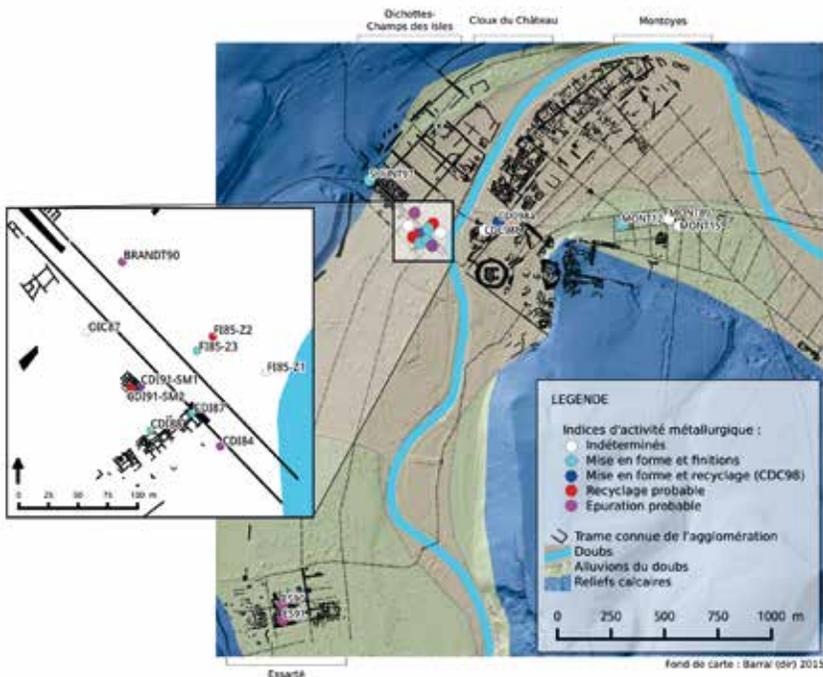
L'assemblage issu de ce chantier aura permis de bien caractériser l'activité d'un atelier du IV<sup>e</sup> siècle, en particulier en mettant en évidence la pratique de deux possibles types de recyclages, par replis successifs et potentiellement par agglomération à chaud. Si le produit final est encore mal identifié, la matière première est par contre bien connue, essentiellement composée de clous et d'hipposandales usagées.

## SYNTHÈSE DES DONNÉES SUR L'AGGLOMÉRATION

Avant de pouvoir synthétiser ces études ponctuelles pour développer un discours concernant toute l'agglomération, il est nécessaire, dans un premier temps, de déterminer leur représentativité. Ainsi, considérant la zone du *Champs des Isles-Oichottes*, zone relativement bien documentée par les fouilles archéologiques et qui a livré un total de douze ensembles de témoins de travail du fer, il apparaît que seulement 5 % de la surface a été touchée par des investigations archéologiques. Sur un autre plan, la période pour laquelle le plus grand nombre de culots de forge ont été étudiés en livre moins de deux individus par an, quand il est possible de considérer qu'un atelier réalisant des activités variées devait en produire au minimum deux par semaine. Les culots étudiés et les ensembles connus ne représentent donc qu'un moindre échantillon des témoins potentiels à l'échelle de l'ag-

glomération. Faut-il pour autant considérer ces données comme insuffisantes pour discuter l'organisation de la production dans ce contexte? La redondance des types des déchets étudiés, ainsi que l'apparition de contrastes entre des zones fortement marquées par la métallurgie et d'autres dépourvues de témoins qui indiqueraient la proximité d'une quelconque activité de ce type, sont toutefois des indices qui permettent d'attribuer une certaine portée à ces études.

L'observation de la carte de répartition des ensembles sidérurgiques (figure 1) permet de définir des zones de plus forte concentration d'ateliers. Il est intéressant de remarquer que la grande majorité d'entre eux se concentrent dans la zone des *Champs des Isles-Oichottes*, soit au croisement entre deux voies de communication majeures, le Doubs et la voie partant vers Besançon-*Vesontio*. Cette polarisation préférentielle des activités sidérurgiques autour des voies de communication, plutôt que vers d'autres secteurs dynamiques de l'agglomération tels que le



grand sanctuaire du *Clos du Château*, pourrait indiquer une relation forte avec ces voies, que ce soit pour l'acquisition de matière première ou la redistribution des produits. La forte proportion d'ateliers de travail du fer dans ce secteur suggère aussi que la production sidérurgique ait pu avoir une relative importance dans l'économie de l'agglomération; il est cependant difficile, par manque d'informations concernant la métallurgie dans la microrégion, de déterminer à quelle échelle s'étend l'influence de cette production. Elle semble toutefois plus réduite que celle de grands secteurs de production bourguignons, tels que l'agglomération d'Entrains-sur-Nohains (Berranger (dir.), 2015). La présence au quatrième siècle de seulement deux forges dans le secteur des *Cloux du Château* reflète bien des dynamiques connues par ailleurs (Nouvel et coll., in Barral (dir.), 2010, p. 23 sq.), qui suggèrent que l'activité se concentre essentiellement dans les murs du castrum tardo-antique.

L'étude dans le détail des activités sidérurgiques réalisées durant le Haut-Empire indique que tous les ateliers semblent travailler le fer jusqu'à l'obtention de produits relativement propres, soit objets finis, soit demi-produits prêts à être mis en forme. Ces études suggèrent aussi que cohabitent au minimum deux types d'approvisionnement en métal brut, le premier apparenté à un métal issu de la réduction et faiblement épuré, le second issu du recyclage. Ce constat apporte des informations importantes sur l'économie du fer à cette époque : des produits apparentés à des masses brutes de réduction semblent parvenir à l'agglomération malgré la très probable absence de réduction du fer dans la cité séquane durant le Haut-Empire ; en parallèle, le recyclage apparaît comme une pratique relativement commune à *Epomanduodurum*, dont il existe aussi des témoins à Luxeuil-*Luxovium* (Jeannot, 2015) et Besançon-*Vesontio* (Berranger, in Munier (dir.), 2017), alors qu'elle semble absente des agglomérations situées à proximité des grands centres de réduction bourguignons. Dans ce schéma, l'agglomération devait donc importer du fer de régions productrices voisines et compléter cet apport de matière par le recyclage des éléments usagés. Or, la raison de l'absence de production primaire de fer dans l'espace séquane ne doit pas être cherchée dans la disponibilité des ressources en minerai, dont la région possède de nombreux gisements, mais plus probablement dans des paramètres tels que la gestion des ressources en bois, la

viabilité économique de l'exploitation face à de grands centres productifs, ou la volonté d'autorités politiques, qu'elles soient locales ou liées au pouvoir impérial romain.

Le travail présenté ici aura permis de dresser un portrait exhaustif des données disponibles concernant la métallurgie du fer dans l'agglomération antique d'*Epomanduodurum*. Ces données, issues de plusieurs dizaines d'années d'archéologie sur le site, sont en effet nombreuses et leur reprise apparaissait comme indispensable dans le cadre de la recherche régionale actuelle. Par le biais de cette analyse, les modalités d'intégration de l'activité sidérurgique dans l'agglomération sont mieux connues, comme l'est le rôle de ce pôle dans l'économie du fer à une plus large échelle. Ce travail ne représente toutefois que l'ébauche d'une recherche plus large, qui a pour finalité de comprendre comment s'organise et se transforme l'économie du fer entre Protohistoire et Moyen Âge; ces dynamiques devront enfin être mises en articulation avec des données concernant, entre autres exemples, l'environnement, l'occupation du territoire ou l'Histoire telle qu'entrevue par les textes.

### Bibliographie

**Barral (dir.), 2001** : BARRAL Ph. (dir.), *Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique : Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs)*. Rapport de PCR, Besançon : SRA Franche-Comté, 2010.

**Barral (dir.), 2005** : BARRAL Ph. (dir.), *Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique : Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs)*. Rapport de PCR, Besançon : SRA Franche-Comté, 2005.

**Barral (dir.), 2010** : BARRAL Ph. (dir.), *Approche pluridisciplinaire d'une agglomération antique : Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs)*. Rapport de PCR, Besançon : SRA Franche-Comté, 2010.

**Barral (dir.), 2011** : BARRAL Ph. (dir.), *Mandeure, une villa antique sur le Doubs*. Archéologie en Franche-Comté, DRAC Franche-Comté, Besançon, 2011.

**Barral (dir.), 2015** : BARRAL Ph. (dir.), BILOIN D., BLIN S., BOSSUET G., CRAMATTE C., FRU-CHART C., LAPLAIGE C., MAMIE A., MONNIER J., MOUGIN P., NOUVEL P., PININGRE J.-F., THIVET M., « Nouvelles données sur l'agglomération antique d'*Epomanduodurum* (Mandeure et Mathay, Doubs) ». *Gallia*. Paris, CNRS Éditions, 2015.

**Bauvais & Fluzin, 2009** : BAUVAIS S., FLUZIN Ph., « Archaeological and Archaeometrical Approaches of the *Chaîne Opératoire* in Iron and Steelmaking : Methodology for a Regional Evolution Study » in Rosen S. A., Roux V. (eds). *Techniques and Peoples. Anthropological*

*Perspectives on Technology in the Archaeology of the Proto-Historic and Early Historic Periods in the South Levant*, Mémoires et travaux du centre de recherches Français à Jérusalem, Paris, 2009.

**Bauvais & Fluzin, 2014** : BAUVAIS S., FLUZIN Ph., « Organization of Forging Activities in Northern Paris Basin Agglomerations (France) during the Final La Tène » in Cech B., Rehen Th. (eds). *Early Iron in Europe*, Monographies Instrumentum 50, Montagnac, 2014.

**Berranger (dir.), 2014** : BERRANGER M., *Le fer, entre matière première et moyen d'échange, en France du VI<sup>e</sup> au I<sup>er</sup> s. av. J.-C. Approches interdisciplinaires*. Éditions Universitaires de Dijon, 2014 (Collection art, archéologie, histoire).

**Berranger (dir.), 2016** : BERRANGER M., *La sidérurgie en Bourgogne et en Franche-Comté avant le haut-fourneau, organisation et circulation des productions*. Programme Collectif de Recherche, Rapport d'activité 2015, SRA Franche-Comté et Bourgogne, 2016.

**Bouziane, 2011** : BOUZIANE M., *La circulation monétaire à Epomanduodurum (Mandeure-Mathay, Doubs). Faciès et approche spatio-chronologique*. Mémoire de Master sous la direction de P. Nouvel, Université de Franche-Comté, Besançon, 2011.

**Crew, 2013** : CREW P., « Twenty-five years of bloomery experiments : perspectives and prospects » in DUNGWORTH D., DOONAN R. C. P. (eds), *Accidental and Experimental Archaeometallurgy*, London, 2013.

**Fruchart, 2009** : FRUCHART C., *Topographie des zones artisanales de l'agglomération antique de Mandeure-Mathay. Recherches documentaires, établissement de données, comparaisons*. Mémoire de Master 2 Archéologie, Cultures, Territoires, Environnement. Université de Franche-Comté, Besançon, 2009.

**G.S.A.F., 1991** : Groupe de travail Suisse d'Archéologie du Fer (Doswald C., Eschenlohr L., Fasnacht W., Senn M., Serneels V.), « Minerais, Scories, Fer : cours d'initiation à l'étude de la métallurgie du fer ancienne et à l'identification des déchets de cette industrie ». *Technique des Fouilles n° spécial*, Association Suisse des Techniciens des Fouilles Archéologiques, 1991.

**Halbout et al., 1986** : HALBOUT P., PILET Ch., VAUDOUR C., « Corpus des objets domestiques et des armes en fer de Normandie. Du I<sup>er</sup> au XV<sup>e</sup> siècle. », *Cahier des Annales de Normandie* 20, 1986.

**Jeannot, 2016** : JEANNOT R., *Organisation des activités sidérurgiques au sein de l'agglomération antique de Mandeure-Mathay (25) : caractérisations spatiales, archéologiques et archéométriques*. Mémoire de Master 2, Besançon, 2016.

**L'Épée 1887** : L'ÉPÉE H., « Mandeure, octobre et novembre 1885 ». *Mémoires de la Société d'émulation de Montbéliard*, vol. 41, 1887.

**Lame et Mazimann, 1998** : LAME M., MAZIMANN J.-P., *Un quartier artisanal Gallo-romain (Fours de potiers – silos – caves). Fouille de sauvetage du Champ des Isles à Mathay (25). 4<sup>e</sup> campagne – 1988*. Besançon, SRA Franche-Comté, 1988.

**Laurent et al., 2012** : LAURENT H., LAURENT-CORSINI S., MANGIN M., « La sidérurgie ancienne dans la région de Franche-Comté : trente années de recherches pluridisciplinaires sur la réduction directe dans l'Est de la France (1981-2011) ». *Notizie Archeologiche Bergomensi* 20, Bergamo, 2012.

**Leroy & Cabboi (dir.), 2013** ; LEROY M., CABBOI S. *Les formes d'organisation de la production du fer en métallurgie ancienne. Systèmes de production et chaînes opératoires dans les ateliers de l'est du Bassin parisien de l'âge du fer au haut Moyen Âge*, Projet collectif de recherche, SRA Lorraine, Jarville, 2013.

**Mangin, 2004** : MANGIN M. (dir.), DABOSI F., DOMERGUE C., FLUZIN Ph., LEROY M., MERLUZZO P., PLOQUIN A., SERNEEL V., *Le fer*. Paris, Errance, 2004.

**Mangin et al. (dir.), 2000** : MANGIN M., FLUZIN Ph., COURTADON J.-L., FONTAINE M.-J. *Forgerons et paysans des campagnes d'Alésia, Haut-Auxois, Côte-d'Or : la terre, le fer, la route en pays mandubien : 1<sup>er</sup> siècle avant-viii<sup>e</sup> siècle après J.-C.* Monographies CRA 22, Paris, 2000.

**Mazimann, 1991** : MAZIMANN J.-P., *Mathay. Champ des Isles*. Rapport de fouilles de sauvetage programmées. Besançon, SRA Franche-Comté, 1991.

**Mazimann, 1992** : MAZIMANN J.-P. *Mathay. Champ des Isles*. Rapport de fouilles de sauvetage programmés. Besançon, SRA Franche-Comté, 1992.

**Mazimann (dir.), 1997** : MAZIMANN J.-P. *Mandeure. Cloux du château. Rapport préliminaire*. Besançon, SRA Franche-Comté, 1992.

**Merluzzo & Forrières, 1995** : MERLUZZO P., FORRIÈRES C., « les premières étapes du travail du fer en foyer de forge, selon des procédés traditionnels japonais ». in Benoit P., Fluzin Ph. *Paléoméallurgie du fer et Cultures. Symposium international du comité pour la sidérurgie ancienne*, Sevenans, 1995.

**Mougin et al., 2003** : MOUGIN P. et coll., *Mathay et Mandeure*. Documents d'évaluation du patrimoine archéologique des villes de France [non publié], 2003.

**Munier (dir.), 2017** : MUNIER C., *Besançon, ZAC Pasteur*. Rapport d'opération archéologique préventive, SRA Franche-Comté, Besançon, 2017.

**Schwab & Senn, 2008** : SCHWAB R., SENN M., « Recycling von alteisen ». *Berliner Beiträge zur Archäometrie 21*, Berlin, 2008.





Extrait du Bulletin de la Société d'Émulation de Montbéliard  
N° 140-2017 (publié en 2018)

Document disponible à la Société d'Émulation de Montbéliard  
Hôtel Beurnier-Rossel  
8, place Saint-Martin  
25200 Montbéliard