HAL
open science

# La métallurgie du fer en France méditerranéenne de l'Antiquité au début du Moyen Âge : jalons d'une approche interdisciplinaire

Gaspard Pagès

## To cite this version:

Gaspard Pagès. La métallurgie du fer en France méditerranéenne de l'Antiquité au début du Moyen Âge : jalons d'une approche interdisciplinaire. Histoire. Université Paul Valéry - Montpellier III, 2008. Français. NNT : . tel-00357391

**HAL Id: tel-00357391**

**https://theses.hal.science/tel-00357391**

Submitted on 30 Jan 2009

**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.

**UNIVERSITÉ MONTPELLIER III – PAUL VALÉRY**
Arts et Lettres, Langues et Sciences Humaines et Sociales

(UFR III : Sciences humaines et sciences de l'environnement)

**DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ PAUL VALÉRY – MONTPELLIER III**

Archéologie, spécialité mondes classiques et cultures indigènes

**THÈSE**
présentée et soutenue publiquement par

**PAGÈS Gaspard**

# La métallurgie du fer en France méditerranéenne de l'Antiquité au début du Moyen Âge : jalons d'une approche interdisciplinaire

## Volume III : annexes

Sous la direction de
**SCHMID Stephan**
et la codirection de
**FLUZIN Philippe**

**MEMBRES DU JURY :**
M. FICHES Jean-Luc, Directeur de recherche au C.N.R.S., U.M.R. 5140 (Lattes, 34), Président
M. FLUZIN Philippe, Directeur de recherche au C.N.R.S., U.M.R. 5060 – IRAMAT (Belfort, 90)
M. SABLAYROLLES Robert, Professeur à l'Université Toulouse II – Le Mirail (31), Rapporteur
M. SCHMID Stephan, Professeur à l'Université Montpellier III – Paul Valéry (34)
M. SCHNEIDER Laurent, Chargé de recherche au C.N.R.S., U.M.R. 6572 (Aix-en-Provence, 13)
M. TIZZONI Marco, Professeur à l'Université de Bergame (Lombardie, Italie)
M. VAN OSSEL Paul, Professeur à l'Université Paris X – Nanterre (92), Rapporteur

Décembre 2008

# TABLE DES MATIÈRES

**TABLE DES MATIÈRES** ..... **- 3 -**

**PRÉLIMINAIRE** ..... **- 9 -**

**RÉPERTOIRE DES LIEUX DE RÉDUCTION DIRECTE DES ALPES AUX PYRÉNÉES-ORIENTALES** ..... **- 11 -**

I. LES MOYENS DE PRODUCTION DISPERSÉS ..... - 13 -
*I.1. Les ateliers de réduction isolés* ..... *- 15 -*
Le bois de Peyloubier (Vidauban, 83) ..... - 16 -
Les Espouveriès 1 et 2 (Aups, 83) ..... - 16 -
La Garesse (Sillans-la-Cascade, 83) ..... - 17 -
Les Fabrègues (Sillans-la-Cascade, 83) ..... - 17 -
Les Ferrières 1 et 2 (Pontevès, 83) ..... - 18 -
Les Menques (Esparron, 83) ..... - 18 -
Saint-Laurent (Bargème, 83) ..... - 19 -
Le Sénez (Barême, 04) ..... - 19 -
La Boudure (Châteauredon, 04) ..... - 20 -
L'Aurafrède (Gréoux-les-Bains, 04) ..... - 20 -
Saint-Michel (Lurs, 04) ..... - 21 -
La Grillère (Ongles, 04) ..... - 21 -
Les Espérelles (Martigues, 13) ..... - 22 -
Le col de Montredon (Concoules, 30) ..... - 23 -
La Sanguinède (Montdardier, 30) ..... - 23 -
*I.2. Les petits districts sidérurgiques* ..... *- 25 -*
Fontaine-de-Vaucluse (84) ..... - 26 -
Le Bois des Lens (30) ..... - 27 -
*I.3. Les districts sidérurgiques moyens* ..... *- 29 -*
Le plateau de Canjuers (83) ..... - 30 -
Plateau d'Albion (04, 84) ..... - 31 -
Le Causse de Sauveterre (48) ..... - 32 -
Les Hautes-Corbières (11) ..... - 33 -
*I.4. Les grands districts sidérurgiques* ..... *- 35 -*
Le versant méridional de la Montagne Noire (11) ..... - 36 -
Le massif du Canigou (66) ..... - 38 -
Les Monts du Vaucluse (04, 84) ..... - 40 -

II. LES MOYENS DE PRODUCTION CONCENTRÉS ..... - 43 -
*II.1. Les centres isolés* ..... *- 45 -*
Le col Ferrière (Saint-Dalmas-de-Valdeblore, 06) ..... - 46 -
La cime du Fer (Saint-Etienne-de-Tinée, 06) ..... - 47 -
*II.2. Les centres regroupés en complexes* ..... *- 49 -*
Le Domaine des Forges (Les Martys, 11) ..... - 50 -
Laprade-Basse (11) ..... - 52 -
Co d'Espérou (Saint-Denis, 11) ..... - 53 -
Carreleit (Fontiers, 11) ..... - 54 -
Camp Naout (Saint-Denis, 11) ..... - 55 -

**ARGUMENTAIRES MÉTALLOGRAPHIQUES** - 57 -

I. LES SITES DE RÉDUCTION DIRECTE - 59 -
*I.1. Le bas fourneau des Espérelles (Martigues, 13) au début du IVe siècle* - 61 -
Les scories écoulées non magnétiques - 61 -
Échantillon 18.1 - 61 -
Échantillon 18.2 - 62 -
Échantillon 18.3 - 62 -
Échantillon 18.4 - 63 -
Échantillon 18.6 - 63 -
Une scorie de fond de four - 65 -
Échantillon 18.7 - 65 -
Les *gromps* - 66 -
Échantillon 6.1 - 66 -
Échantillon 18.5 - 67 -
Échantillon 18.8 - 68 -
*I.2. Le bas fourneau du Gravas (Saint-Mamert-du-Gard, 30) à la fin du IVe siècle* - 71 -
Une scorie coulée non magnétique - 71 -
Échantillon 108.1 - 71 -
Les scories de fond de four - 72 -
Échantillon 101S.1 - 72 -
Échantillon 101S.2 - 72 -
Les agglomérations métalliques - 74 -
Échantillon 102.1 - 74 -
Échantillon 102.2 - 75 -

II. LES FORGES D'HABITATS GROUPÉS - 77 -
*II.1. La forge de l'îlot VI d'Olbia à la transition de notre ère (Hyères, Var)* - 79 -
Les culots de forge - 79 -
Échantillon 61148.1 - 79 -
Échantillon 61148.3 - 80 -
Échantillon 61167.1 - 80 -
Échantillon 61167.2 - 81 -
*II.2. La forge de la maison A de Lunel-Viel (34) au milieu du IIe siècle* - 83 -
Les demi-produits - 83 -
Échantillon 2045.8 - 83 -
Échantillon 2045.14 - 84 -
Les culots de forge - 86 -
Échantillon 2045.1 - 86 -
Échantillon 2045.2 - 87 -
Échantillon 2045.3 - 88 -
Échantillon 2045.4 - 89 -
Échantillon 2045.5 - 89 -
Échantillon 2045.6 - 90 -
Échantillon 2045.7 - 91 -
Échantillon 2085.1 - 92 -
Échantillon 2085.2 - 93 -
Échantillon 2085.3 - 94 -
Les objets fabriqués - 95 -
Échantillon 2045.9 (objet indéterminé) - 95 -
Échantillon 2045.10 (plomb de chantier) - 96 -
Échantillon 2045.11 (fragment métallique cémenté) - 97 -
Échantillon 2045.12 (ciseau) - 98 -
Échantillon 2045.13 (outil tranchant) - 99 -
*II.3. La forge du relais routier d'Ambrussum durant le Haut-Empire (zone 9, Villetelle, 34)* - 101 -
Phase D (25-50 ap. J.-C.) : demi-produit et fragment de bandage - 101 -
Échantillon 9799.1 (demi-produit) - 101 -
Échantillon 9504.1 (fragment de bandage) - 102 -
Phase C (50-75 ap. J.-C.) : un demi-produit - 105 -
Échantillon 9797.2 - 105 -
Phase C (50-75 ap. J.-C.) : les culots de forge - 107 -
Échantillon 9754.1 - 107 -
Échantillon 9754.2 - 108 -
Échantillon 9770.1 - 108 -
Échantillon 9773.1 - 109 -

Échantillon 9820.1 ..... - 110 -
Échantillon 9820.2 ..... - 111 -
Échantillon 9820.3 ..... - 112 -
Échantillon 9820.4 ..... - 113 -
Échantillon 9820.5 ..... - 113 -
Échantillon 9820.6 ..... - 114 -
Échantillon 9820.7 ..... - 115 -
Échantillon 9820.8 ..... - 115 -
Phase C (50-75 ap. J.-C.) : les objets fabriqués ..... - 117 -
Échantillon 9797.1 (fragment de bandage) ..... - 117 -
Échantillon 9797.3 (pieu) ..... - 117 -
Échantillon 9806.1 (fragment de bandage) ..... - 118 -
Phase B (75-100 ap. J.-C.) : un culot de forge ..... - 120 -
Échantillon 9255.1 ..... - 120 -
Phase A (125-150 ap. J.-C.) : les culots de forge ..... - 121 -
Échantillon 9081.1 ..... - 121 -
Échantillon 9081.2 ..... - 121 -
Échantillon 9081.3 ..... - 122 -
Échantillon 9513.2 ..... - 123 -
Phase A (125-150 ap. J.-C.) : les objets fabriqués ..... - 125 -
Échantillon 9103.1 (fragment de bandage) ..... - 125 -
Échantillon 9468.1 (rondelle) ..... - 126 -
Échantillon 9513.1 (assemblage de tôle) ..... - 127 -
Échantillon 9513.3 (outil plat tranchant) ..... - 128 -
Échantillon 9513.4 (fragment de bandage) ..... - 129 -
Échantillon 9513.5 (applique ou crochet) ..... - 130 -
Échantillon 9513.6 (ébauche d'un outil tranchant) ..... - 131 -
*II.4. La forge du chantier de construction du bâtiment A de l'îlot 12 d'Ambrussum dans le seconde moitié du II^e^ siècle (Villetelle, 34)* ..... *- 133 -*
Les culots de forge ..... - 133 -
Échantillon 12214.1 ..... - 133 -
Échantillon 12216.1 ..... - 134 -
Échantillon 12216.2 ..... - 135 -
Échantillon 12216.3 ..... - 135 -
Échantillon 12216.4 ..... - 136 -
Échantillon 12216.5 ..... - 137 -
Échantillon 12216.6 ..... - 138 -
Échantillon 12304.1 ..... - 139 -
Échantillon 12304.3 ..... - 139 -
Les objets fabriqués ..... - 141 -
Échantillon 12214.2 (outil tranchant) ..... - 141 -
*II.5. Les forges de l'agglomération perchée du Roc de Pampelune (Argelliers, 34) au VI^e^ siècle* ..... *- 143 -*
Bâtiment 1L : un fragment de loupe en cours de compactage ..... - 143 -
Échantillon 1176-1 ..... - 143 -
Terrasse 1H : les culots de forge ..... - 145 -
Échantillon 1389-1 ..... - 145 -
Échantillon 1389.2 ..... - 145 -
Échantillon 1389.3 ..... - 146 -
Échantillon 1393.2 ..... - 147 -
Échantillon 1393.3 ..... - 148 -
Échantillon 1409.3 ..... - 149 -
Échantillon 1409.4 ..... - 150 -
Bâtiment 2H : un demi-produit ..... - 152 -
Échantillon 2505.1 ..... - 152 -
Terrasse 2L : un demi-produit et un objet métallique ..... - 154 -
Échantillon 2535.1 (demi-produit) ..... - 154 -
Échantillon 2528.1 (assemblage de tôle) ..... - 155 -
Cour 2A3 : un demi-produit ..... - 156 -
Échantillon 2194. 1 ..... - 156 -
Cour 2A3 : les culots de forge ..... - 157 -
Échantillon 2180.1 ..... - 157 -
Échantillon 2180.2 ..... - 158 -
Échantillon 2180.3 ..... - 158 -
Cour 2A3 : les objets fabriqués ..... - 160 -
Échantillon 2194.2 (objet à double tranchant) ..... - 160 -
Échantillon 2194.3 (outil tranchant type « chasse ») ..... - 161 -
Échantillon 2208-1 (couteau) ..... - 162 -

Bâtiment 3D : un culot de forge ..... - 164 -
Échantillon 3348.1 ..... - 164 -
Tour 4G : une matrice ..... - 165 -
Échantillon 4309.1 ..... - 165 -

III. LES FORGES D'HABITATS DISPERSÉS ..... - 167 -
*III.1. Les travaux métallurgiques à l'Auribelle-Basse (Pézenas, 34) au début du II^e siècle ..... - 169 -*
Un demi-produit ..... - 169 -
Échantillon 1230.1 ..... - 169 -
Les culots de forge ..... - 171 -
Échantillon 1151.2 ..... - 171 -
Échantillon 1212.3 ..... - 172 -
Échantillon 1212.4 ..... - 172 -
Échantillon 1212.5 ..... - 173 -
Échantillon 1213.6 ..... - 174 -
Échantillon 1213.7 ..... - 175 -
Les *gromps* et pseudo-*gromps* ..... - 176 -
Échantillon 1212.1 ..... - 176 -
Échantillon 1212.2 ..... - 177 -
Échantillon 1213.1 ..... - 177 -
Échantillon 1213.2 ..... - 178 -
Échantillon 1213.3 ..... - 179 -
Échantillon 1213.4 ..... - 180 -
Des outils ..... - 182 -
Échantillon 1151.1 ..... - 182 -
*III.2. La forge d'un bâtiment isolé à la Madeleine II (Clermont l'Hérault, 34) au IV^e-V^e siècle ..... - 183 -*
Un fragment de loupe ..... - 183 -
Échantillon 3291.2 ..... - 183 -
Un culot de forge d'épuration ..... - 185 -
Échantillon 3291.1 ..... - 185 -
*III.3. Le travail du fer à l'Ermitage (Paulhan, 34) aux VII^e et VIII^e siècles ..... - 187 -*
Les pseudo-*gromps* ..... - 187 -
Échantillon 3408.1 ..... - 187 -
Échantillon 3421.3 ..... - 188 -
Les culots de forge ..... - 189 -
Échantillon 3421.1 ..... - 189 -
Échantillon 3423.1 ..... - 189 -
Échantillon 3423.2 ..... - 190 -

IV. LES DEMI-PRODUITS DES ÉPAVES MÉDITERRANÉENNES ..... - 193 -
*Mentions particulières ..... - 195 -*
*IV.1. Une épave de la transition II^e-I^es. av. J.-C. : Bagaud 2 (Hyères, 83) ..... - 197 -*
Type assimilé 2M ..... - 197 -
Morphologie générale ..... - 197 -
Échantillon BG2.2 ..... - 197 -
Échantillon BG2.3 ..... - 198 -
Échantillon BG2.4 ..... - 199 -
Types assimilés 4C ..... - 200 -
Échantillon BG2.1 ..... - 200 -
Échantillon BG2.5 ..... - 201 -
*IV.2. Les épaves du Haut-Empire des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) ..... - 203 -*
Type 1M ..... - 203 -
Morphologie générale ..... - 203 -
Échantillon SM9.5 ..... - 203 -
Échantillon SM9.6 ..... - 204 -
Échantillon SM9.7 ..... - 205 -
Échantillon SM9.8 ..... - 206 -
Échantillon SM9.9 ..... - 207 -
Échantillon SM9.10 ..... - 208 -
Type 1L ..... - 210 -
Morphologie générale ..... - 210 -
Échantillon SM2.1 ..... - 210 -
Échantillon SM2.2 ..... - 212 -

Échantillon SM2.6 - 214 -
Échantillon SM2.7 - 215 -
Échantillon SM2.8 - 215 -
Échantillon SM10.1 - 216 -
Échantillon SM10.2 - 219 -
Échantillon SM10.3 - 222 -
Échantillon SM10.4 - 222 -
Type 2M - 224 -
Morphologie générale - 224 -
Échantillon SM6.4 - 224 -
Échantillon SM9.1 - 225 -
Échantillon SM9.2 - 226 -
Échantillon SM9.13 - 228 -
Échantillon SM25.1 - 228 -
Échantillon SM25.2 - 230 -
Échantillon SM25.3 - 231 -
Échantillon SM25.4 - 232 -
Échantillon SM25.5 - 232 -
Échantillon SM25.6 - 233 -
Type 3C - 235 -
Morphologie générale - 235 -
Échantillon SM6.3 - 235 -
Type 4C - 236 -
Morphologie générale - 236 -
Échantillon SM2.3 - 236 -
Échantillon SM2.4 - 237 -
Échantillon SM2.5 - 237 -
Échantillon SM6.5 - 239 -
Échantillon SM6.6 - 239 -
Échantillon SM6.7 - 240 -
Échantillon SM9.3 - 241 -
Échantillon SM9.4 - 243 -
Échantillon SM9.11 - 244 -
Échantillon SM9.12 - 245 -
Échantillon SM24.7 - 246 -
Échantillon SM24.8 - 247 -
Type 4L - 248 -
Morphologie générale - 248 -
Échantillon SM24.1 - 248 -
Échantillon SM24.2 - 250 -
Échantillon SM24.3 - 254 -
Échantillon SM24.4 - 254 -
Échantillon SM24.5 - 255 -
Échantillon SM24.6 - 256 -
Type 5C - 258 -
Morphologie générale - 258 -
Échantillon SM6.2 - 258 -
Type 6C - 260 -
Morphologie générale - 260 -
Échantillon SM6.1 - 260 -
Échantillon SM6.8 - 261 -
Échantillon SM6.9 - 261 -
Échantillon SM6.10 - 262 -

# PRÉLIMINAIRE

La structuration du répertoire des lieux de réduction directe et de l'argumentaire métallographique repose sur l'organisation du volume I.

Tous les appels de citation renvoient aux références bibliographies détaillées dans le volume I.

Les unités de mesure sont abrégées selon la terminologie habituelle en vigueur détaillée dans l'avant-propos du volume I.

Dans l'argumentaire métallographique, la dénomination des échantillons est fondée sur le numéro de l'Unité Stratigraphique qui a livré l'objet auquel est couplé un numéro d'identification. Si l'échantillon n'a pas été découvert en contexte stratigraphique, le numéro est remplacé par l'abréviation ou le nom du site archéologique. À la suite, il est parfois ajouté entre parenthèses son identification post-analytique.

Le terme « hydroxydation » ne peut s'appliquer en toute rigueur, qu'à des produits d'oxydation de type hydroxydes tels que la goethite ($\alpha$-FeOOH), la lepidocrocite ($\gamma$-FeOOH) ou l'akaganéite ($\beta$-FeOOH). Or, selon le milieu de l'enfouissement, ce n'est pas forcément ce type de phase qui se développe en surface de l'objet. En effet, en fonction de l'aération et de la composition de l'eau peuvent se former notamment la magnétite (Fe3O4) et la sidérite (FeCO3). Pour plus de détails à ce sujet on pourra consulter Dillmann *et al.* 2007 et Dillmann, L'héritier 2007. L'emploi du terme « hydroxydation » pour désigner toute forme de corrosion aqueuse qui s'est produite lors de l'enfouissement de l'objet est donc abusif. Cependant, par souci de simplification et afin de distinguer ce type de corrosion d'une oxydation à chaud qui pourrait être liée à un travail de forge, nous continuerons à l'utiliser dans ce sens tout au long du texte.

# RÉPERTOIRE DES LIEUX DE RÉDUCTION DIRECTE DES ALPES AUX PYRÉNÉES-ORIENTALES

# I. LES MOYENS DE PRODUCTION DISPERSÉS

## *I.1. Les ateliers de réduction isolés*

## LE BOIS DE PEYLOUBIER (VIDAUBAN, 83)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** Le bois de Peyloubier | **n° inv. :** 1 | **Type :** Atelier de réduction isolé |
| **Commune :** Vidauban | **Département :** Var | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| La présence de fragments de *tegula* scorifiée et rubéfiée sur le lieu de réduction cadre une chronologie de fonctionnement dans une large Antiquité, allant au moins du I^er^ siècle avant notre ère au VI^e^ siècle de notre ère. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| Cet atelier de réduction isolé est signalé au pied du massif des Maures par un épandage de scories denses coulées associées à quelques *tegulae* parfois rubéfiées et scorifiées. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Ce lieu de réduction isolé a été déniché au pied du massif des Maures par Alain Raux (amateur). | | |
| **Bibliographie :** (Onoratini *et al.* 2002, p. 141). | | |

## LES ESPOUVERIÈS 1 ET 2 (AUPS, 83)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** Les Espouveriès 1 et 2 | **n° inv. :** 2 | **Type :** Atelier de réduction isolé |
| **Commune :** Aups | **Département :** Var | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| La présence de fragments de *tegula* scorifiée et rubéfiée sur les deux lieux de réduction cadre une chronologie de fonctionnement dans une large Antiquité, allant au moins du I^er^ siècle avant notre ère au VI^e^ siècle de notre ère. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| Ils se présentent sous la forme de deux petits épandages de grosses scories écoulées et cordées. Leur concentration et leur taux de fragmentation peu élevé indiquent que les deux bas fourneaux n'ont pas fonctionné de nombreuses fois et que ces déchets sont majoritairement restés en position primaire devant l'aménagement de réduction. Ils sont installés à flan de colline dans les sols de calcaires et de dolomies du Jurassique du centre Var. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Ces deux ateliers de réduction du minerai de fer ont été découverts par Jean-Marie Michel (I.N.R.A.P. Méditerranée/C.A.V.) après un incendie. | | |
| **Bibliographie :** (Brun 1999, p. 234). | | |

## LA GARESSE (SILLANS-LA-CASCADE, 83)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** La Garesse | **n° inv. :** 3 | **Type :** Atelier de réduction isolé |
| **Commune :** Sillans-la-Cascade | **Département :** Var | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| La présence de fragments de *tegula* scorifiée et rubéfiée sur le lieu de réduction borne une chronologie de fonctionnement dans une large Antiquité, allant au moins du I^er^ siècle avant notre ère au VI^e^ siècle de notre ère. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| Localisé dans le centre Var, ce lieu de réduction se présentait sous la forme d'un petit ferrier de scories écoulées situé dans des sols de calcaires et de dolomies du Jurassique. Aujourd'hui, le site est pratiquement totalement détruit. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Ce ferrier isolé a également été découvert par Jean-Marie Michel (I.N.R.A.P. Méditerranée/C.A.V.) au cours du terrassement d'un chemin. | | |
| **Bibliographie :** (Brun 1999, p. 725). | | |

## LES FABRÈGUES (SILLANS-LA-CASCADE, 83)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** Les Fabrègues | **n° inv. :** 4 | **Type :** Atelier de réduction isolé |
| **Commune :** Sillans-la-Cascade | **Département :** Var | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| Aucun mobilier ne permet de préciser la période de fonctionnement. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| Cet atelier de réduction isolé est signalé par un ferrier de scories écoulées situé dans les sols de calcaires et de dolomies du Jurassique du centre Var. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Ce ferrier isolé a été localisé dans le cadre du P.C.R. sur les mines et les métallurgies en Provence-Alpes-Côte d'Azur. | | |
| **Bibliographie :** (Morin *et al.* 2002, p. 86, 89). | | |

## LES FERRIÈRES 1 ET 2 (PONTEVÈS, 83)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** Les Ferriers 1 et 2 | **n° inv. :** 5 | **Type :** Atelier de réduction isolé |
| **Commune :** Pontevès | **Département :** Var | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| La présence de fragments de *tegula* scorifiée et rubéfiée sur le lieu de réduction indique un fonctionnement dans une large Antiquité, allant au moins du I^er^ siècle avant notre ère au VI^e^ siècle de notre ère. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| Ces deux lieux de réduction sont matérialisés par deux ferriers de scories écoulées situés à proximité, dans les sols de calcaires et de dolomies du Jurassique du centre Var. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Aucune information. | | |
| **Bibliographie :** (Brun 1999, p. 566-567). | | |

## LES MENQUES (ESPARRON, 83)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** Les Menques | **n° inv. :** 6 | **Type :** Atelier de réduction isolé |
| **Commune :** Esparron | **Département :** Var | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| Aucun mobilier ne permet de préciser la période de fonctionnement. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| Cet atelier de réduction se présente sous la forme d'un ferrier de scories écoulées concentrées sur environ 5 à 7 m de diamètre, au pied de la montagne d'Artigues, dans l'extrémité occidentale du département du Var, derrière le massif de la Sainte-Victoire (13). | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Ce lieu de réduction a été localisé lors de la prospection de la commune par Marc Borréani et V. Raymond en 1995 (C.A.V.). | | |
| **Bibliographie :** (Borréani 1995). | | |

## SAINT-LAURENT (BARGÈME, 83)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** Saint-Laurent | **n° inv. :** 7 | **Type :** Atelier de réduction isolé |
| **Commune :** Bargème | **Département :** Var | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| Des céramiques recueillies à la surface du ferrier témoignent d'un fonctionnement durant les II^e^ et III^e^ siècles. Cependant, cette datation doit être révisée à la lumière des connaissances actuelles sur la céramique. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| Ce ferrier de scories écoulées a été localisé sur plusieurs dizaines de mètres-carrés dans un massif proche des gorges du Verdon. Il est associé à des aménagements indéterminés et à une mine à ciel ouvert dans des lits argileux du barrémien contenant des pisolithes. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Cet atelier de réduction a été découvert lors de prospections réalisées en 1976 par Alain Raux (amateur). | | |
| **Bibliographie :** (Onoratini *et al.* 2002, p. 142). | | |

## LE SÉNEZ (BARÊME, 04)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** Le Sénez | **n° inv. :** 8 | **Type :** Atelier de réduction isolé |
| **Commune :** Barême | **Département :** Alpes de Haute-Provence | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| Aucun mobilier ne permet de préciser la période de fonctionnement. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| Ce ferrier de scories écoulées est isolé à 1026 m d'altitude dans un contexte géologique qui livre des nodules de pyrite. Cette découverte ouvre de nouveaux secteurs à investir, dans les Alpes de Haute-Provence, pour enrichir les connaissances sur les lieux de réduction. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Ce ferrier isolé a été localisé dans le cadre du P.C.R. sur les mines et les métallurgies en Provence-Alpes-Côte d'Azur. | | |
| **Bibliographie :** (Morin *et al.* 2000, p. 380). | | |

## LA BOUDURE (CHÂTEAUREDON, 04)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** La Boudure | **n° inv. :** 9 | **Type :** Atelier de réduction isolé |
| **Commune :** Châteauredon | **Département :** Alpes de Haute-Provence | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| L'existence de fragments de *tegula* scorifiée et rubéfiée dans le ferrier signifie que les réductions ont pu être effectuées dans le courant de l'Antiquité romaine et de l'Antiquité tardive. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| Cet atelier de réduction est formé d'un épandage de scories coulées, à 800 m d'altitude, vers la ruine de la Boudure. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Ce ferrier a été identifié par Stéphane Fournier en 1994. | | |
| **Bibliographie :** (Fournier 1994, p. fiche n°28 ; Bérard 1997, p. 137 ; Rémy *et al.* 2002, p. 118). | | |

## L'AURAFRÈDE (GRÉOUX-LES-BAINS, 04)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** L'Aurafrède | **n° inv. :** 10 | **Type :** Atelier de réduction isolé |
| **Commune :** Gréoux-les-Bains | **Département :** Alpes de Haute-Provence | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| A la lumière des recherches actuelles, la présence de *tegulae* permet d'envisager une datation antique large s'étendant du Ier siècle avant notre ère jusqu'au VI$^{e}$ siècle de notre ère. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| En 1916, Christian Cotte a signalé la présence à l'ouest du ruisseau d'Aurafrède « d'une fonderie gallo-romaine avec des scories et des *tegulae* ». Depuis, aucune vérification n'a été faite sur place, mais il semble bien s'agir d'un atelier de réduction isolé. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Ce ferrier a été signalé en 1916 par Christian Cotte. | | |
| **Bibliographie :** (Cotte 1916, p. 347 ; Bérard 1997, p. 224 ; Rémy *et al.* 2002, p. 118). | | |

## SAINT-MICHEL (LURS, 04)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** Saint-Michel | **n° inv. :** 11 | **Type :** Atelier de réduction isolé |
| **Commune :** Lurs | **Département :** Alpes de Haute-Provence | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| Des tessons de céramiques antiques et médiévales découverts sur place bornent une large chronologie de fonctionnement. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| Ce ferrier est constitué d'un épandage de scories coulées localisé vers la chapelle Saint-Michel, à 530 m d'altitude, sur la bordure sud-est de l'escarpement. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Pierre Martel a indiqué au Service Régional de l'Archéologie de Provence-Alpes-Côte d'Azur l'existence de ce lieu de réduction en 1960 et en 1990. | | |
| **Bibliographie :** (Bérard 1997, p. 256 ; Rémy *et al.* 2002, p. 119). | | |

## LA GRILLÈRE (ONGLES, 04)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** La Grillère | **n° inv. :** 12 | **Type :** Atelier de réduction isolé |
| **Commune :** Ongles | **Département :** Alpes de Haute-Provence | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| En surface, la présence de quelques céramiques « antiques » indéterminées permet d'envisager une datation large de l'Antiquité romaine à l'Antiquité tardive. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| Ce ferrier de scories écoulées est isolé sur le coteau de La Grillère à 636 m d'altitude. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Pierre Martel a signalé l'existence de cet atelier de réduction au Service Régional de l'Archéologie de Provence-Alpes-Côte d'Azur en 1989. | | |
| **Bibliographie :** (Bérard 1997, p. 327 ; Rémy *et al.* 2002, p. 119). | | |

## LES ESPÉRELLES (MARTIGUES, 13)

| *IDENTITÉ* | | |
|---|---|---|
| **Nom/lieu-dit :** Les Espérelles | **n° inv. :** 13 | **Type :** Atelier de réduction isolé |
| **Commune :** Martigues | **Département :** Bouches-du-Rhône | |
| *CHRONOLOGIE* | | |
| A partir des charbons de bois découverts dans les niveaux de fonctionnement du bas fourneau deux datations $^{14}C$ ont été réalisées. Elles indiquent un fonctionnement entre les années 260 et 380, c'est-à-dire autour des années 320 (+/- 60) de notre ère (Référence des échantillons $^{14}C$ : Ly-13400, Ly-13401, Ly-13402). | | |
| *VESTIGES* | | |
| Sous plus de 150 cm d'alluvions, un atelier de réduction a été découvert à l'extrémité sud-occidentale du Massif de la Nerthe, à proximité de Martigues et de l'étang de Berre. Les différents vestiges et leur analyse indiquent qu'il n'a fonctionné qu'une seule fois sur la base d'une technologie perfectionnée. Une description détaillée de cette fouille inédite est présentée dans le volume de synthèse. | | |
| *TRAVAUX* | | |
| **Enquête de terrain :** Ce site a été fouillé dans le cadre d'une fouille préventive par le Service Archéologique de la Ville de Martigues et Gaspard Pagès. | | |
| **Bibliographie :** (Pagès, Rétif 2006). | | |

## LE COL DE MONTREDON (CONCOULES, 30)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** Col de Montredon | **n° inv. :** 14 | **Type :** Atelier de réduction isolé |
| **Commune :** Concoules | **Département :** Gard | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| Si les auteurs successifs font remonter cette activité de réduction à l'Antiquité, cette information est à préciser car aucun mobilier n'est cité en référence. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| Ce lieu de réduction est signalé par une grande quantité de minerai de fer, mais surtout par un épandage de scories coulées de réduction. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Cette signalisation remonte au XIX$^{e}$ siècle. Elle doit être attribuée à Gratien Charvet. | | |
| **Bibliographie :** (Blanchet, Louis 1941, p. 202, n°348 ; Provost 1999, p. 347). | | |

## LA SANGUINÈDE (MONTDARDIER, 30)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** La Sanguinède | **n° inv. :** 15 | **Type :** Atelier de réduction isolé |
| **Commune :** Montdardier | **Département :** Gard | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| Aucun mobilier ne permet de préciser la chronologie, il faut donc rester prudent face à la chronologie du fonctionnement annoncée dans les travaux initiaux. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| Au bord du plateau de La Sanguinède, plusieurs « fours romains à traiter le minerai de fer » ont été repérés dans un contexte où le minerai abonde particulièrement. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Cette découverte a été effectuée par Félix Mazauric au début du XX$^{e}$ siècle. | | |
| **Bibliographie :** (Mazauric 1909, p. 240 ; Blanchet, Louis 1941, p. 215, n°430 ; Provost 1999, p. 464). | | |

## *I.2. Les petits districts sidérurgiques*

# FONTAINE-DE-VAUCLUSE (84)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** Fontaine-de-Vaucluse | **n° inv. :** 16 | **Type :** Petit district sidérurgique |
| Commune : | **Département :** Vaucluse | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| Aucun élément ne permet de préciser la datation des ferriers. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| Le district sidérurgique de Fontaine-de-Vaucluse est établi à la retombée sud-occidentale du massif des Monts du Vaucluse, sur les communes de Gordes, Lagnes et Fontaine-de-Vaucluse. Le minerai est essentiellement du type remplissage karstique dans des calcaires urgoniens. De nombreux travaux miniers plus ou moins profonds sont reconnus, mais les ferriers restent rares dans le secteur qui n'en compte aujourd'hui que trois. | | |
| ***CONTEXTE SIDÉRURGIQUE ENVIRONNANT*** | | |
| **Exploitations contemporains :** Au XIX$^{e}$ siècle, un haut fourneau a été installé à Velleron (84), à quelques kilomètres de là, pour exploiter les mines très rapidement épuisées à cause de la faiblesse naturelle des gisements et/ou des nombreuses exploitations antérieures. Pour palier au manque de matière première, les ferriers de réduction directe ont donc été intensivement exploités jusqu'à ce que l'entreprise fasse faillite, concurrencée par le haut fourneau de Rustrel (04), localisé à l'est, dans le district sidérurgique des Monts du Vaucluse beaucoup plus fourni en minerai de fer. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Sa découverte et les connaissances accumulées rejoignent l'histoire du district sidérurgique des Monts du Vaucluse. Au XIX$^{e}$ siècle, le fonctionnement de deux hauts fourneaux à Rustrel, en partie désireux d'exploiter les anciens ferriers encore très riches en oxyde de fer, a directement influencé la découverte de ce patrimoine. Toutefois, ce n'est que plus tard, dans les années 1960, que ces vestiges ont été réellement étudiés principalement par Pierre Martel au cours de multiples prospections. Récemment, les recherches sur ce district sidérurgique ont été reprises dans le cadre du P.C.R. sur les mines et les métallurgies en Provence-Alpes-Côte d'Azur. Elles ont essentiellement consisté à retrouver les vestiges déjà inventoriés pour les mettre à la lumière des connaissances et des méthodes actuelles. | | |
| **Bibliographie :** (Gras 1840, p. 110 ; Martel 1963, p. 45 ; Martel, Barruol 1968, p. 43 ; Martel 1990, p. 50-52 ; Locci 2001, p. 225-228 ; Morin *et al.* 2002, p. 88-91) | | |
| ***EXPERTISE COMPLÉMENTAIRE OU JUSTIFICATIVE*** | | |
| Il est probable que le nombre de ferriers répertoriés soit sous-estimé notamment à cause de leur intense exploitation au XIX$^{e}$ siècle comme matière première dans le haut fourneau de Velleron. Par ailleurs, si aucune datation n'est ici disponible, il paraît vraisemblable que le petit district sidérurgique de Fontaine-du-Vaucluse soit une extension du grand district sidérurgique des Monts du Vaucluse, à moins de 10 km de là. | | |

# LE BOIS DES LENS (30)

| *IDENTITÉ* | | |
|---|---|---|
| **Nom/lieu-dit :** Bois des Lens | **n° inv. :** 17 | **Type :** Petit district sidérurgique |
| Commune : | **Département :** Gard | |

***CHRONOLOGIE***

A l'origine, ce district sidérurgique était daté de la fin du I^er^ siècle, mais à la lumière des connaissances actuelles, il semble plus probable qu'il fonctionne au IV^e^ siècle ou, si l'on veut être plus prudent, durant le Bas-Empire et l'Antiquité tardive

***VESTIGES***

Le district sidérurgique du Bois des Lens s'étend sur le versant oriental de ce massif qui forme un des premiers contreforts des Cévennes à une vingtaine de kilomètres au Nord-ouest de Nîmes. Il se déploie uniquement dans les calcaires cristallins du Barrémien supérieur à faciès urgonien qui renferme de nombreuses crevasses avec des concrétions pisolithiques ferrugineuses issues probablement du faciès sidérolithique de l'Eocène. Il se compose de dix ferriers et d'une petite mine à ciel ouvert liée à l'extraction des concrétions pisolithiques.

***TRAVAUX***

**Enquête de terrain :** Ce district a été découvert par Jean-Claude Bessac au cours de prospections réalisées en 1976 à la faveur d'un important incendie. Deux bas fourneaux y ont été fouillés : l'un au Dévenau (Montpezat, 30) à la fin des années 1970 par Jean-Claude Bessac et l'autre au Gravas (Saint-Mamert-du-Gard, 30) en 2005 dans le cadre de notre thèse. Cette fouille inédite est présentée dans le volume de synthèse en réintégrant les enquêtes plus anciennes.

**Bibliographie :** (Anonyme 1979 ; Bessac *et al.* 1979, p. 43-50 ; Bessac, Bonnaud 1998 ; Pagès *et al.* 2006).

## *I.3. Les districts sidérurgiques moyens*

# LE PLATEAU DE CANJUERS (83)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** Le plateau de Canjuers | **n° inv. :** 18 | **Type :** District sidérurgique moyen |
| Commune : | **Département :** Var | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| Aucun matériel n'a été découvert en surface lors des prospections, mais une datation $^{14}C$ sur des charbons de bois recueillis dans le sondage d'un des ferriers en urgence montre qu'au moins une partie des entreprises remonte au début du V^e^ siècle de notre ère. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| Dix-sept ferriers de scories écoulées ont été localisés sur les communes de Châteaudouble, Ampus, Montferrat et Bargemon. Le minerai utilisé paraît essentiellement provenir de gîtes karstiques dont des traces d'exploitations anciennes ont été retrouvées en de nombreux endroits sous la forme de petits travaux à ciel ouvert : minières et lapiaz évidés. | | |
| ***CONTEXTE SIDÉRURGIQUE ENVIRONNANT*** | | |
| **Exploitations modernes :** Les sources écrites mentionnent une activité sidérurgique dans le secteur entre le milieu du XV^e^ et le milieu du XVI^e^ siècles, mais elle serait liée à l'expansion du procédé indirect dans cette région. Par conséquent, elle présente des vestiges et des déchets différents qui ne concernent pas le district et les vestiges inventoriés. Au XVIII^e^ et XIX^e^ siècles, une nouvelle phase d'activité est motivée par les débouchés liés au développement de l'arsenal de Toulon. Des hauts fourneaux, encore visibles, sont alors construits notamment pour exploiter les anciens ferriers de réduction directe qui contiennent encore beaucoup de fer. Il semble donc que les dix-sept ferriers soient sous-estimés tant en volume qu'en nombre. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Déjà mentionné au XIX^e^ siècle dans les premiers travaux sur la sidérurgie ancienne, ce district sidérurgique a été redécouvert et documenté dans le cadre du P.C.R. sur les mines et les métallurgies en Provence-Alpes-Côte d'Azur. | | |
| **Bibliographie :** (Daubrée 1881, p. 347 ; Morin *et al.* 2002, p. 86, 89-95). | | |
| ***EXPERTISE COMPLÉMENTAIRE OU JUSTIFICATIVE*** | | |
| Ce district sidérurgique forme un ensemble relativement important dont il s'agit aujourd'hui non seulement d'évaluer le nombre et le volume initial des ferriers, mais aussi de confirmer la chronologie de son exploitation à la transition entre le Bas-Empire et l'Antiquité tardive. | | |

# PLATEAU D'ALBION (04, 84)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** Le plateau d'Albion | **n° inv. :** 19 | **Type :** District sidérurgique moyen |
| **Commune :** Aurel, Revest-du-Bion, Sault | **Département :** Alpes de Haute-Provence, Vaucluse | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| La majorité des seize ferriers inventoriés n'a pas permis de préciser la chronologie. Seuls quelques tessons de la Graufesenque ou de Lezoux ont été découverts en connexion avec les deux bas fourneaux des Eicharettes (Revest-du-Bion, 04) et signalent le fonctionnement de cet atelier au Haut-Empire. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| La majorité des seize ferriers sont des repérages de surface réalisés lors de prospections par H. Chrestian. Seul l'atelier sidérurgique des Eicharettes (Revest-du-Bion, 04) a été documenté Jean Barruol en 1915, juste avant sa destruction. Installé à 1005 m d'altitude, à 2 km au nord-est du village de Revest-du-Bion, deux petits bas fourneaux en forme de cône renversé (diamètre supérieur : 40 cm ; profondeur : 50 cm) renfermaient au fond quelques kilogrammes de scories. Implanté côte à côte, ils étaient fabriqués avec des parois en torchis d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur avec des dégraissants de quartz. | | |
| ***CONTEXTE SIDÉRURGIQUE ENVIRONNANT*** | | |
| **Exploitations modernes :** Au XIX$^{e}$ siècle, deux hauts fourneaux ont fonctionné à Rustrel, au sud du district. S'ils ont exploité massivement le minerai encore présent en grandes quantités, une partie de la production visaient l'exploitation des anciens ferriers encore très riches en oxyde de fer. Il est donc probable que le nombre des ferriers conservés soit sous représenté par rapport à l'état primitif. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Ce district a été mis en évidence par H. Chrestian au XIX$^{e}$ siècle. Ensuite, l'atelier des Eicharettes (Revest-du-Bion, 04) a été documenté par Jean Barruol en 1915. | | |
| **Bibliographie :** (Barruol 1930, p. 482-483 ; Martel 1963, p. 46 ; Bérard 1997, p. 360 ; Baldassari 1999 ; Rémy *et al.* 2002, p. 119 ; Tallah 2004, p. 177, 350-357 ; Chrestian s.d. (XIX$^{e}$ s.)). | | |

# LE CAUSSE DE SAUVETERRE (48)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** Le Causse de Sauveterre | **n° inv. :** 20 | **Type :** District sidérurgique moyen |
| Commune : | **Département :** Lozère | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| La présence de tuile, dans une grande majorité des ferriers prospectés, permet de raccorder cette activité métallurgique à une large fourchette chronologique, entre l'Antiquité romaine et l'Antiquité tardive. Mais, l'existence d'un ferrier en rapport avec un habitat du haut Moyen Âge pourrait également indiquer que ce type d'entreprises fonctionne aussi plus tardivement, durant cette dernière période. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| Le district sidérurgique du Causse de Sauveterre est situé au sud-ouest de la Lozère entre les gorges du Tarn, au sud, et le Lot, au nord. À environ 950 m d'altitude et à la transition entre les garrigues du bas Languedoc et le Massif-Central, il est formé d'un vaste plateau karstique du trias et du Jurassique criblé d'avens et de dolines qui conservent de l'argile rouge détritique contenant beaucoup d'oxydes de fer. Sur la grande commune de La Canourgue, une vingtaine de ferriers a été recensée. Il semble que ce district ne se cantonne pas qu'à cette grande commune. La périphérie d'un autre ferrier a en effet été récemment découverte plus au sud, sur des fouilles d'un habitat rural du haut Moyen Âge (Aouzerals, La Malène, 48). | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Jusqu'alors peu prospecté par rapport aux régions plus méridionales, le Causse de Sauveterre a été documenté en 2005/2006 dans le cadre d'une maîtrise universitaire menée par Audrey Roche avec l'aide d'érudit locaux sur la commune de La Canourgue, qui regroupe depuis 1972 les communes de La Canourgue, La Capelle, Auxillac et Montjézieu. Parallèlement, le sujet est également documenté par Hélène Breichner (S.R.A. Languedoc-Roussillon) qui conduit des fouilles sur un habitat rural du haut Moyen Âge (Aouzerals, La Malène, 48). | | |
| **Bibliographie :** (Roche 2006, p. 167 ; Breichner 2008 ; Pagès 2008). | | |
| ***EXPERTISE COMPLÉMENTAIRE OU JUSTIFICATIVE*** | | |
| L'importance de ce district sidérurgique commence à être mesurée, mais il forme d'hors est déjà un lieu de production de fer non négligeable dont il faut notamment préciser la chronologie. | | |

# LES HAUTES-CORBIÈRES (11)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** Le Hautes-Corbières | **n° inv. :** 21 | **Type :** District sidérurgique moyen |
| Commune : | **Département :** Aude | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| Le matériel découvert en prospection semble appartenir à une large Antiquité pouvant également comprendre l'Antiquité tardive. Quelques prospections plus détaillées indiquent qu'une grande partie de la production se concentre à l'époque romaine. Dans le cadre de prospections, B. et P. Pauc mentionne un lieu de réduction du VI$^{e}$-V$^{e}$ siècle avant notre ère au lieu dit Pe de la Gleizo-Le Village II (Ferrals-les-Corbières,11), dans un *locus* occupé jusqu'à l'Antiquité tardive (Pauc, Pauc 1998, p. 122-125 et 127). Une telle découverte constituerait une des premières de ce type en Gaule, mais étant donné le contexte général du site et le mode d'investigation, il apparaît prématuré de prendre en compte cette datation haute sans arguments supplémentaires. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| Le massif des Corbières forme une partie des contreforts des Pyrénées entre Narbonne et Perpignan. Sans que l'on puisse précisément les dénombrer, les enquêtes successives montrent qu'il existe des ferriers essentiellement dans les Hautes-Corbières, au plus près des gîtes de minerai. | | |
| ***CONTEXTE SIDÉRURGIQUE ENVIRONNANT*** | | |
| **Exploitations modernes :** Les sources écrites mentionnent de nombreuses activités métallurgiques dans les Corbières durant toute la période moderne. Il faut donc envisager de nombreuses reprises et de nombreux recoupements qui polluent la réalité archéologique des entreprises sidérurgiques antiques et médiévales. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Cette zone a principalement été étudiée dans les années 1980 par Chantal Cambon pour l'Antiquité et Gauthier Langlois pour le Moyen Âge et l'époque moderne. | | |
| **Bibliographie :** (Rancoule, Solier 1977 ; Cambon 1989, p. 31-32 ; Langlois 1989, p. 38-39 ; Pauc, Pauc 1998). | | |
| ***EXPERTISE COMPLÉMENTAIRE OU JUSTIFICATIVE*** | | |
| Aujourd'hui, les informations manquent pour être plus précis dans la description de ce district sidérurgique qu'il reste à évaluer, à caractériser et à dater. | | |

## *I.4. Les grands districts sidérurgiques*

# LE VERSANT MÉRIDIONAL DE LA MONTAGNE NOIRE (11)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** Le versant méridional de la Montagne Noire | **n° inv. :** 22 | **Type :** Grand district sidérurgique |
| Commune : | **Département :** Aude | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| Les céramiques découvertes à la surface des ferriers –sur au moins un tiers d'entre eux– déterminent un fonctionnement synchrone au cours du I^er^ siècle avant notre ère. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| Dans la totalité de la haute vallée de la Dure et pour ce qui concerne le type du district sidérurgique, quarante-deux ferriers et vingt-cinq petits épandages ont été répertoriés. Une estimation porte leur volume total de scories à environ 45000 $m^3$. Un deuxième volet d'enquêtes a été conduit sur ce district, dans deux vallées voisines à la Dure, à environ 4 km à l'ouest, dans celles du Limon et de l'Alzeau. Il a permis de mettre au jour plus d'une cinquantaine de ferriers. Si aujourd'hui, aucune publication synthétisant ces données n'est disponible, il semble, d'après des rapports de prospections publiés dans les Bilans Scientifiques Régionaux, que ce grand district sidérurgique soit plus important et s'étende sur une grande partie du versant méridional de la Montagne Noire en comptabilisant près de deux-cents ferriers. Le minerai exploité peut être du type « chapeau de fer » –altération superficielle de gisements de sulfures et de carbonates de fer– et du type filonien ou stratiforme présents sur des failles intra-granitiques ou dans des schistes ou micaschistes. | | |
| ***CONTEXTE SIDÉRURGIQUE ENVIRONNANT*** | | |
| **Centres sidérurgiques postérieurs :** A partir du milieu du I^er^ siècle avant notre ère et du changement d'ère, au moins cinq centres sidérurgiques se développent dans ce district sidérurgique alors que ce dernier mode d'exploitation semble abandonné. Il s'agit du Domaine des Forges (Martys, 11), Laprade-Basse (11), Co d'Espérou (Saint-Denis, 11), Carreleit (Fontiers, 11) et Camp Naout (Saint-Denis, 11). | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Le bassin supérieur de la vallée de la Dure a été largement étudié à partir des années 1970 par Claude Domergue et l'Unité Toulousaine d'Archéologie et d'Histoire (UMR5608), qui ont principalement fouillé le Domaine des Forges (Les Martys, 11), un centre sidérurgique. De nombreuses informations complémentaires ont été recueillies sur le district par Pierre-Michel Decombeix, Jean-Marc Fabre et Christian Rico, membres de cette même équipe, à partir de prospections systématiques engagées en 1998 dans le haut bassin de la Dure. Afin de mieux cerner l'activité sidérurgique de ce district, il faut également considérer les prospections systématiques menées par Robert Sablayrolles, dans les années 1970 et 1980, au sein des vallées voisines à la Dure, du Limon et de l'Alzeau, à environ 4 km à l'ouest. Ici, de la même manière que pour la zone précédente, les études ont débuté sur le très grand ferrier de Co d'Espérou, un centre sidérurgique. | | |
| **Bibliographie :** (Sablayrolles 1989, p. 73 ; Decombeix *et al.* 1998 ; Decombeix *et al.* 2000, p. 29-33 ; Decombeix *et al.* 2001 ; Decombeix *et al.* 2002 ; Decombeix *et al.* 2004). | | |

| *EXPERTISE COMPLÉMENTAIRE OU JUSTIFICATIVE* |
| --- |
| Si l'on ne peut pas exclure que les vallées de la Dure, du Limon et de l'Alzeau aient été exploitées plus tard dans l'Antiquité tardive et le Moyen Âge, il semble que les ferriers inventoriés dans ces différentes enquêtes doivent être associés notamment du fait de leur proximité et de leur synchronie. Une fois unifiées, ces entités forment le grand district sidérurgique du versant méridional de la Montagne Noire exploité, au moins de manière conjoncturelle, durant la fin de la période républicaine et le début de l'Empire romain. |

# LE MASSIF DU CANIGOU (66)

| *IDENTITÉ* | | |
|---|---|---|
| **Nom/lieu-dit :** Le massif du Canigou | **n° inv. :** 23 | **Type :** Grand district sidérurgique |
| Commune : | **Département :** Pyrénées-Orientales | |

*CHRONOLOGIE*

Le massif du Canigou est très riche en minerai de fer avec des formations très variées. Il a été exploité de l'Antiquité au 1er décembre 1987, date à laquelle la Société d'Exploitation Sidérurgique de Decazeville et la Société Anonyme de Batère fermaient officiellement la dernière mine après avoir déposé le bilan. En ce sens, il est certainement le district sidérurgique le plus difficile à appréhender. À cela, vient s'ajouter une importante occupation humaine qui brouille le maillage des exploitations métallurgiques. S'il s'agit sans conteste d'un très important district sidérurgique, il est délicat d'apprécier les périodes de déprise et d'intense exploitation, notamment quant à la réduction directe du minerai en bas fourneau à scories écoulées.

*VESTIGES*

Pour l'Antiquité, une quarantaine de sites sont inventoriés, mais ce chiffre est probablement fortement sous-estimé à cause des reprises et des bouleversements postérieurs. Si la superficie des ferriers n'a pas été relevée, aucun d'entre eux ne paraît être étendu et relever d'un centre sidérurgique. Pour exemple celui de Saint-André de Baillestavy a été estimé à 14400 $m^3$. Le matériel recueilli en surface ou dans quelques sondages permet de dater ces lieux de réduction entre le Ier siècle avant notre ère et le Ier siècle suivant. Certains pourraient être en fonction dès le IIe siècle avant notre ère et quelques-uns semblent perdurer jusqu'au IIIe siècle. Pour la fin de l'Antiquité et tout le haut Moyen Âge, aucune source –textuelle et archéologique– ne signale l'existence de lieux de réduction ni de mines. À partir des XIIe-XIIIe siècles, les sources écrites mentionnent les premières mines et moulines à fer. Leur nombre ne cesse de croître jusqu'à la fin du XVIe siècle, où plus de cinquante forges ou martinets sont mentionnés dans le secteur. Beaucoup d'entre eux sont encore visibles dans le paysage. La raison de cette croissance réside dans la qualité et la disponibilité du minerai, mais également dans le contexte politique stable de l'époque par rapport aux régions voisines. À partir du XVIIe siècle, la forge à la Catalane se développe dans le secteur au même moment où les forêts commencent sérieusement à être dévastées par le charbonnage. Les entreprises sont obligées d'importer du bois ou du charbon de bois de zones éloignées. Le prix du fer augmente et la concurrence avec le fer hollandais fait alors rage et engendre une crise économique importante dans le secteur. Au cours du XIXe et du XXe siècles, les déchets des activités métallurgiques antiques et médiévales ont été exploités par les entreprises sidérurgiques pour extraire, à l'aide de techniques à plus hauts rendements, le fer persistant dans les anciennes scories.

*TRAVAUX*

**Enquête de terrain :** Si ce district sidérurgique n'est pas commode à appréhender notamment à cause de sa très longue période d'exploitation, de l'Antiquité à l'époque contemporaine, deux séries d'enquêtes menées dans des cadres universitaires par Véronique Barrouillet au début des années 1980 et par Véronique Izard dans les années 1990 permettent de dresser un premier panorama sur son exploitation antique et médiévale.

| |
|---|
| **Bibliographie :** (Barrouillet *et al.* 1989, p. 23, 29 ; Izard 1994, p. 117-121, 126 ; Verna 1997, p. 297 ; Izard 1999, p. fig. 3 et 137-143 ; Mut 2001 ; Dabosi 2004 ; Izard, Mut 2007 ; Mut, Kotarba 2007). |
| ***EXPERTISE COMPLÉMENTAIRE OU JUSTIFICATIVE*** |
| Le massif du Canigou forme un très important district sidérurgique durant le bas Moyen Âge et l'époque moderne. Plus anciennement, il a également été exploité durant l'Antiquité, mais l'ampleur et le nombre des entreprises sont ici plus difficiles à évaluer. Le massif du Canigou livre donc un district sidérurgique chronique de l'Antiquité à aujourd'hui. Son exploitation semble connaître une importante déprise entre les III$^{e}$ et le XI$^{e}$ siècles tandis qu'elle atteint son apogée aux XVI$^{e}$-XVII$^{e}$ siècles. |

# LES MONTS DU VAUCLUSE (04, 84)

| *IDENTITÉ* | | |
|---|---|---|
| **Nom/lieu-dit :** Les Monts du Vaucluse | **n° inv. :** 24 | **Type :** Grand district sidérurgique |
| Commune : | **Département :** Alpes de Haute-Provence et Vaucluse | |

*CHRONOLOGIE*

Depuis 1960, les différentes enquêtes conduites sous la forme de prospections ou de fouilles ont permis de recueillir des données chronologiques variées (céramique, $^{14}C$) permettant de raccorder probablement ce district sidérurgique à une large période chronologie allant de la fin du Bas-Empire à l'Antiquité tardive et peut-être au haut Moyen Âge, sans que l'on ne puisse être plus précis.

*VESTIGES*

Le district sidérurgique des Monts du Vaucluse couvre le versant sud-oriental de ce massif. Au minimum, il s'étend sur les communes de Rustrel (84), Gignac (84), Simiane-la-Rotonde (04) et Banon (04). Aujourd'hui, plus de deux-cents sites ont été répertoriés –ou à nouveau inventoriés– dans cette zone très riche en fer sous la forme de minerais gréseux d'altération et de remaniements albo-cénomaniens et de cuirasse ferrugineuse –chapeau de fer– élaborée aux dépens des grès et sables marins à glauconie et continentaux du Crétacé moyen et supérieur. L'un d'eux, fouillé en 1964 et 1965 par Pierre Martel aux Plaines d'Aramelle, à Simiane-la-Rotonde, au lieu dit « le Champ des aspics », aurait fourni plus de 1000 $m^3$ de scories coulées et des céramiques de l'Antiquité tardive et du haut Moyen Âge. En 1963, le bas fourneau de Garant a également été à moitié sondé par Pierre Martel. Récemment, sa fouille a été poursuivie. Ceci a notamment permis d'établir une datation $^{14}C$ calibrée à 239 de notre ère ($^{+}/_{-}150$).

*CONTEXTE SIDÉRURGIQUE ENVIRONNANT*

**Exploitations contemporaines :** Au XIX$^{e}$ siècle, deux hauts fourneaux ont fonctionné à Rustrel. S'ils ont exploité massivement le minerai encore présent en grandes quantités, une partie de la production visaient l'exploitation des anciens ferriers encore très riches en oxyde de fer. Il est donc probable que le nombre des ferriers conservés soit sous représenté par rapport à l'état primitif.

*TRAVAUX*

**Enquête de terrain :** Au XIX$^{e}$ siècle, le fonctionnement de deux hauts fourneaux à Rustrel, en partie désireux d'exploiter les anciens ferriers encore très riches en oxyde de fer, a directement influencé la découverte de ce patrimoine. Toutefois, ce n'est que plus tard, dans les années 1960, que ces vestiges ont été réellement étudiés principalement par Pierre Martel au cours de multiples prospections et de fouilles, en 1963, 1964 et 1965. Récemment, les recherches sur ce district sidérurgique ont été reprises dans le cadre du P.C.R. sur les mines et les métallurgies en Provence-Alpes-Côte d'Azur. Elles ont essentiellement consisté à retrouver les vestiges déjà inventoriés pour les mettre à la lumière des connaissances et des méthodes actuelles. Actuellement, Mathieu Courgey (Professeur des écoles) continue à prospecter et à sonder le terrain pour regrouper des informations plus précises après avoir réalisé une maîtrise universitaire sur cette zone en 2002.

| |
|---|
| **Bibliographie :** (Gras 1840, p. 110 ; Martel 1963, p. 45 ; Martel, Barruol 1968, p. 43 ; Martel 1990, p. 50-52 ; Locci 2001, p. 225-228 ; Courgey 2002a, p. 30 ; Courgey 2002b ; Morin *et al.* 2002, p. 82-94 ; Tallah 2004, p. 367). |
| ***EXPERTISE COMPLÉMENTAIRE OU JUSTIFICATIVE*** |
| Dans le nombre comme dans le volume, ce district sidérurgique apparaît très important. Pour l'heure, son exploitation semble appartenir à la fin de l'Antiquité et au haut Moyen Âge. |

# II. LES MOYENS DE PRODUCTION CONCENTRÉS

# *II.1. Les centres isolés*

# LE COL FERRIÈRE (SAINT-DALMAS-DE-VALDEBLORE, 06)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** Le col Ferrière | **n° inv. :** 25 | **Type :** Centre sidérurgique |
| **Commune :** Saint-Dalmas-de-Valdeblore et Mollières | **Département :** Alpes-Maritimes | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| Une datation $^{14}C$ a été réalisée à partir de charbons de bois prélevés dans un sondage d'un ferrier situé à 2000 m d'altitude sur la rive droite du vallon de Millefonts. Elle fixe le fonctionnement, au moins de ce ferrier, aux III$^{e}$ - IV$^{e}$ siècles de notre ère. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| **Les déchets :** De nombreux ferriers ont été localisés de part et d'autre du col Ferrière – au nord et au sud –, dans les vallons de Millefonts, de Margès et de Mollières ainsi que sur la crête des Faegians, aux alentours de 2000 m d'altitude. Certains forment de grands ferriers comme dans le vallon des Millefonts où les scories s'étendent entre 1200 et 2000 m d'altitude, sur une épaisseur pouvant atteindre 50 cm, d'après les premiers sondages. D'autres sont plus circonscrits et isolés comme dans le vallon de Mollières et de Margès. Le minerai, principalement constitué d'hématite, se trouve sous la forme d'affleurement sur les crêtes environnantes entre 2300 et 2500 m, à proximité du col Ferrière. | | |
| **Les aménagements et constructions associés :** Des vestiges de bas fourneaux ont été localisés en prospections dans les ferriers. Si certains paraissent isolés, quelques-uns semblent regroupés en batterie de deux ou trois. Par ailleurs, des bâtiments et des enclos sont implantés sur des replats aménagés en terrasses dans les ferriers – ou à proximité directe – dans les vallons de Millefonts et de Margès. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Ce lieu de réduction a été récemment étudié dans le cadre du P.C.R. sur les mines et les métallurgies en Provence-Alpes-Côte d'Azur. | | |
| **Bibliographie :** (Morin 2002 ; Morin, Rosenthal 2002 ; Morin, Rosenthal 2003). | | |
| ***EXPERTISE COMPLÉMENTAIRE OU JUSTIFICATIVE*** | | |
| Le centre du col Ferrière est singulier à cause de son installation à haute altitude qui n'autorise qu'une exploitation durant la moitié estivale de l'année. Sans conteste ce lieu de réduction, du reste de grande ampleur, montre l'existence d'entreprises sidérurgiques dans les Alpes du sud, très peu prospectées jusqu'à aujourd'hui, de la même manière que dans les Pyrénées où se trouvent des ateliers importants et isolés en altitude comme celui de Lercoul en Ariège au III$^{e}$ siècle (Dubois 2000). Cette découverte et celle du centre de la cime du Fer ouvrent donc des perspectives fructueuses quant à la découverte d'autres sites sidérurgiques dans un contexte géologique jusqu'alors considéré comme défavorable à l'implantation de telles entreprises notamment par rapport aux Alpes centrales et orientales (Cima 1992, p. 215-223). Enfin, l'existence de bâtiment et d'enclos en rapport avec les travaux métallurgiques mérite d'être confirmée par des fouilles archéologiques car de nombreuses constructions associées au pastoralisme ont été localisées dans les environs (Geist, Henri 2002 ; Geist, H. 2002). | | |

# LA CIME DU FER (SAINT-ETIENNE-DE-TINÉE, 06)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** La cime du Fer | **n° inv. :** 26 | **Type :** Centre sidérurgique |
| **Commune :** Saint-Etienne-de-Tinée | **Département :** Alpes-Maritimes | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| Deux datations $^{14}C$ ont été réalisées à partir de charbons de bois prélevés dans des ferriers du plateau de Morgon, situé vers 2000 m d'altitude. Elle fixe le fonctionnement, au moins de ces ferriers, aux III$^{e}$ - IV$^{e}$ siècles de notre ère. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| **Les déchets :** De nombreux ferriers ont été localisés sur le plateau de Morgon, à 2000 m d'altitude, mais aussi en aval vers le lieu-dit Le Pra ou près des Granges d'Ungruène, vers 1700 m. Les ferriers du plateau de Morgon s'étendent sur 250 m tandis que les autres sont plus localisés. Le minerai, principalement constitué d'hématite, se trouve sous la forme d'affleurement sur les crêtes du versant vers 2600 m, près de la cime du Fer et du pas de Morgon. | | |
| **Les aménagements et constructions associés :** Des vestiges de bas fourneaux ont été localisés en prospections dans les ferriers. Quelques-uns, notamment sur le plateau de Morgon, semblent regroupés en batterie de deux ou de trois. Par ailleurs, sur le plateau de Morgon, des bâtiments et des enclos sont construits dans les ferriers, ou à proximité. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Ce lieu de réduction a été récemment étudié dans le cadre du P.C.R. sur les mines et les métallurgies en Provence-Alpes-Côte d'Azur. | | |
| **Bibliographie :** (Morin, Rosenthal 2004 ; Morin, Rosenthal 2005). | | |
| ***EXPERTISE COMPLÉMENTAIRE OU JUSTIFICATIVE*** | | |
| La particularité du centre sidérurgique de la cime du Fer réside dans le fait que des travaux miniers polymétalliques – cuivre et plomb argentifère – sont aussi reconnus en cinq lieux, au moins, sous la forme d'exploitations superficielles et de petites mines en service durant des périodes anciennes, antérieures à la poudre et probablement circonscrites autour du Moyen Âge centrale selon une datation $^{14}C$. Le centre de la cime du Fer est également singulier à cause de son installation à haute altitude qui n'autorise qu'une exploitation durant la moitié estivale de l'année. Sans conteste ce lieu de réduction, du reste de grande ampleur, montre l'existence d'entreprises sidérurgiques dans les Alpes du sud, très peu prospectées jusqu'à aujourd'hui, de la même manière que dans les Pyrénées où se trouvent des ateliers importants et isolés en altitude comme celui de Lercoul en Ariège au III$^{e}$ siècle (Dubois 2000). Cette découverte et celle du centre du col Ferrière ouvrent donc des perspectives fructueuses quant à la découverte d'autres sites sidérurgiques dans un contexte géologique jusqu'alors considéré comme défavorable à l'implantation de telles entreprises notamment par rapport aux Alpes centrales et orientales (Cima 1992, p. 215-223). Enfin, l'existence de bâtiment et d'enclos en rapport avec les travaux métallurgiques mérite d'être confirmée par des fouilles archéologiques car de nombreuses constructions associées au pastoralisme sont connues en montagne. | | |

# *II.2. Les centres regroupés en complexes*

# LE DOMAINE DES FORGES (LES MARTYS, 11)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** Domaine des Forges | **n° inv. :** 27 | **Type :** Centre d'un complexe |
| **Commune :** Les Martys | **Département :** Aude | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| Le mobilier céramique et monétaire issu du ferrier borne un fonctionnement du Domaine des Forges entre 60/50 avant notre ère et 260/270 de notre ère sauf, peut-être, entre les années 150/170 et 230/240. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| **Les déchets :** Le Domaine des Forges est formé d'un énorme ferrier estimé à environ 110000 $m^3$ qui a été très largement exploité entre 1930 et 1966 pour la production de fonte et dont il ne reste aujourd'hui qu'une infime partie. D'autres ferriers de moindre importance sont également localisés en périphérie, à moins de 300 m, comme les deux de Montrouch qui conservent environ 800 $m^3$ et 3000 $m^3$ de déchets. Au total, ce centre regroupe environ 45 % des déchets recensés dans la vallée supérieure de la Dure. | | |
| **Les produits :** Ce centre sidérurgique a dû produire au minimum 37000 tonnes de fer en plus de trois-cents ans de fonctionnement, entre 60/50 avant notre ère et 260/270 de notre ère. Toutefois, l'essentiel de cette production concerne le I^er^, le II^e^ et le III^e^ siècles puisque le calcul de la masse de fer produite repose principalement sur les déchets qui recouvrent les vestiges sidérurgiques des deux premières phases d'occupation entre 60/50 et 30/20 avant notre ère. | | |
| **Les aménagements et constructions associés :** La singularité de ce lieu de réduction réside particulièrement dans son organisation et dans son ampleur. Structuré autour de bas fourneaux en batterie (de deux à six aménagements de réduction) pour assurer une rotation dans l'utilisation des appareils qui, entre deux opérations, doivent être remis en état, il possède en périphérie des aménagements annexes permanents. On compte en effet un bâtiment et un abri pour stocker le charbon de bois, des foyers d'épuration pour traiter les loupes produites, mais également des constructions et des aménagements pour la vie des occupants estimés à une centaine d'hommes avec leur famille. À ce titre, on mentionnera non seulement les bâtiments pour les activités domestiques quotidiennes avec des meules « pompéiennes » fabriquées au voisinage de *Volsinii*, mais également, à partir du II^e^ siècle, la présence de thermes et de magasins avec un bâtiment à *dolia*. | | |
| ***CONTEXTE SIDÉRURGIQUE ENVIRONNANT*** | | |
| **Centres sidérurgiques proches et synchrones :** Dans un rayon de 4 km autour du Domaine des Forges, au moins quatre autres centres sidérurgiques sensiblement synchrones sont reconnus : Laprade-Basse (11), Co d'Espérou (Saint-Denis, 11), Carreleit (Fontiers, 11) et Camp Naout (Saint-Denis, 11). | | |
| **Substrat sidérurgique antérieur :** Le Domaine des Forges est localisé sur le district sidérurgique du versant méridional de la Montagne Noire, dans le bassin supérieur de la vallée de la Dure, qui fonctionne durant le I^er^ siècle avant notre ère. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Il constitue le centre sidérurgique antique de référence parce qu'il a été abondamment documenté lors des fouilles conduites entre 1972 et 1995 par Claude Domergue. | | |

| |
|---|
| **Bibliographie :** (Domergue 1993, p. 21-23, 123, 127-238 ; Domergue *et al.* 1997, p. 51-53 ; Decombeix *et al.* 1998 ; Decombeix *et al.* 2000, p. 26-31 ; Domergue 2004, p. 185, 201, 209). |
| ***EXPERTISE COMPLÉMENTAIRE OU JUSTIFICATIVE*** |
| Si ce centre sidérurgique naît au milieu du I[er] siècle avant notre ère, la majeur partie de la production se développe à partir du changement d'ère au moment même où les multiples ateliers du district sidérurgique (district sidérurgique du versant méridional de la Montagne Noire) sont abandonnés. |

# LAPRADE-BASSE (11)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| Nom/lieu-dit : | **n° inv. :** 28 | **Type :** Centre d'un complexe |
| **Commune :** Laprade-Basse | **Département :** Aude | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| D'après les céramiques provenant des prospections, la production est en fonction au plus tard à partir du I^er^ siècle de notre ère et abandonnée au III^e^ siècle. Les investigations archéologiques n'ont pas permis de préciser la phase d'installation primitive, ni la dynamique de formation. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| **Les déchets :** Le ferrier couvre une superficie d'environ 4 ha et, selon les estimations, regroupe environ 100000 $m^3$ de scories écoulées. Au total, ce ferrier représente environ 40 % des déchets sidérurgiques recensés dans la vallée supérieure de la Dure. | | |
| **Aménagements et constructions associés :** Des aménagements monumentaux apparaissent par endroits dans le ferrier, mais là encore les enquêtes n'ont pas permis de déterminer plus exhaustivement leur nature. | | |
| ***CONTEXTE SIDÉRURGIQUE ENVIRONNANT*** | | |
| **Centres sidérurgiques proches et synchrones :** Le grand ferrier de Laprade-Basse est localisé à environ 1,5 km, au nord du Domaine des Forges (Martys, 11). Il se trouve à environ 4 km des centres sidérurgiques de Co d'Espérou (Saint-Denis, 11), Carreleit (Fontiers, 11) et Camp Naout (Saint-Denis, 11). | | |
| **Substrat sidérurgique antérieur :** Le centre sidérurgique de Laprade-Basse est localisé dans le district sidérurgique du versant méridional de la Montagne Noire, dans le bassin supérieur de la vallée de la Dure, qui fonctionne durant le I^er^ siècle avant notre ère. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Le bassin supérieur de la vallée de la Dure a été largement étudié à partir des années 1970 par Claude Domergue et l'Unité Toulousaine d'Archéologie et d'Histoire (UMR5608) qui ont principalement fouillé le Domaine des Forges (Les Martys, 11). De nombreuses informations complémentaires ont été recueillies par Pierre-Michel Decombeix, Jean-Marc Fabre et Christian Rico, membres de cette même équipe, à partir de prospections systématiques engagées en 1998 dans le haut bassin de la Dure. | | |
| **Bibliographie :** (Decombeix *et al.* 2000, p. 31 et 33 ; Domergue 2001, p. dossier VI 6B). | | |
| ***EXPERTISE COMPLÉMENTAIRE OU JUSTIFICATIVE*** | | |
| Etant donné la masse de déchets accumulée et la présence d'aménagements monumentaux, le grand ferrier sidérurgique de Laprade-Basse, qui reste à documenter plus précisément, doit être envisagé comme un centre sidérurgique sensiblement comparable à celui du Domaine des Forges, dans une chronologie synchrone entre le I^er^ et le III^e^ siècles. | | |

# CO D'ESPÉROU (SAINT-DENIS, 11)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** Co d'Espérou | **n° inv. :** 29 | **Type :** Centre d'un complexe |
| **Commune :** Saint-Denis | **Département :** Aude | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| Suivant le mobilier archéologique traditionnel recueilli au cours des fouilles, l'activité métallurgique s'échelonne du I^er^ siècle au début du III^e^ siècle. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| **Les déchets :** En surface, le ferrier couvre 5 ha. Selon deux sondages, son épaisseur peut atteindre, par endroits, 4 m. Initialement, l'auteur se refusait à estimer le volume de scories, mais aujourd'hui, d'après ses données et les travaux sur l'estimation des ferriers, on peut raisonnablement considérer son volume entre 50000 $m^3$ et 100000 $m^3$. | | |
| **Les aménagements et constructions associés :** Le ferrier est associé à un grand bâtiment (46 x 15 m) qui sert dans un premier temps, au milieu du I^er^ siècle de notre ère, de magasins ou de réserves – salle à *dolia* et réserve de blé incendiée – et dans un second temps, au début du II^e^ siècle, de lieu de vie luxueux avec une salle chauffée par hypocauste. Suite à un incendie, le bâtiment a été abandonné à la fin du II^e^ siècle un peu avant l'arrêt de l'activité sidérurgique. | | |
| ***CONTEXTE SIDÉRURGIQUE ENVIRONNANT*** | | |
| **Centres sidérurgiques proches et synchrones :** Le grand ferrier de Co d'Espérou se trouve à moins de 2 km des centres sidérurgiques de Carreleit (Fontiers, 11) et de Camp Naout (Saint-Denis, 11). À environ 4 km, on trouve également le centre sidérurgique du Domaine des Forges (Martys, 11) et de Laprade-Basse (11). | | |
| **Substrat sidérurgique antérieur :** Le ferrier de Co d'Espérou est localisé dans le district sidérurgique du versant méridional de la Montagne Noire, dans la vallée voisine de la Dure, où coule l'Alzeau. Ce district a fonctionné dans une période directement antérieure à celle des centres sidérurgiques, au cours du I^er^ siècle avant notre ère. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Dans les années 1970 et 1980, Robert Sablayrolles a réalisé deux sondages dans le ferrier et fouillé en extensif le bâtiment s'y afférent. | | |
| **Bibliographie :** (Sablayrolles 1989, p. 74-76 et 79-81 ; Marty, Maraval 2003). | | |
| ***EXPERTISE COMPLÉMENTAIRE OU JUSTIFICATIVE*** | | |
| Il est certain que l'activité sidérurgique est intimement liée au fonctionnement du bâtiment qui confirme, à côté du très important volume de déchets encore visible, l'existence d'un centre sidérurgique à Co d'Espérou. Celui-ci doit être associé aux centres sidérurgiques synchrones, localisés dans la vallée de la Dure, à quelques kilomètres de là. | | |

# CARRELEIT (FONTIERS, 11)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** Carreleit | **n° inv. :** 30 | **Type :** Centre d'un complexe |
| **Commune :** Fontiers | **Département :** Aude | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| D'après les céramiques provenant des prospections, l'occupation, ou tout du moins les dernières phases de fonctionnement, remonte au Haut-Empire. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| **Les déchets :** Si la seule publication disponible sur le sujet ne mentionne pas précisément la surface du ferrier, une carte publiée dans ce même papier permet d'envisager une superficie de pratiquement 10 ha. | | |
| ***CONTEXTE SIDÉRURGIQUE ENVIRONNANT*** | | |
| **Centres sidérurgiques proches et synchrones :** Le grand ferrier de Carreleit se situe à moins de 2 km des centres sidérurgiques de Co d'Espérou (Saint-Denis, 11) et de Camp Naout (Saint-Denis, 11). À environ 4 km, on trouve également le centre sidérurgique du Domaine des Forges (Martys, 11) et de Laprade-Basse (11). | | |
| **Substrat sidérurgique antérieur :** Le grand ferrier de Carreleit est localisé dans le district sidérurgique du versant méridional de la Montagne Noire, dans la vallée voisine de la Dure, où coule l'Alzeau. Ce district a fonctionné dans une période directement antérieure à celle des centres sidérurgiques, au cours du I^er^ siècle avant notre ère. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Dans le cadre de l'étude du ferrier de Co d'Espérou menée par Robert Sablayrolles dans les années 1970 et 1980 (Cf. *supra*), les deux vallées avoisinantes du Limon et de l'Alzeau ont été prospectées. C'est pendant cette enquête que le grand ferrier de Carreleit a été mis au jour. | | |
| **Bibliographie :** (Sablayrolles 1989, p. 75 et 82). | | |
| ***EXPERTISE COMPLÉMENTAIRE OU JUSTIFICATIVE*** | | |
| Si de nombreuses autres investigations doivent être conduites pour le documenter plus précisément, selon la masse de déchets accumulée, la datation des vestiges et le contexte sidérurgique, il est très probable que le grand ferrier de Carreleit représente un centre sidérurgique sensiblement comparable à celui du Domaine des Forges (Martys, 11), dans une chronologie synchrone entre le I^er^ et le III^e^ siècles. | | |

# CAMP NAOUT (SAINT-DENIS, 11)

| | | |
|---|---|---|
| ***IDENTITÉ*** | | |
| **Nom/lieu-dit :** Camp Naout | **n° inv. :** 31 | **Type :** Centre d'un complexe |
| **Commune :** Saint-Denis | **Département :** Aude | |
| ***CHRONOLOGIE*** | | |
| D'après les céramiques provenant des prospections, l'occupation, ou tout du moins les dernières phases de fonctionnement, remonte au Haut-Empire. | | |
| ***VESTIGES*** | | |
| **Les déchets :** Si la seule publication disponible sur le sujet ne mentionne pas précisément la surface du ferrier, une carte publiée dans ce même papier permet d'envisager une superficie de pratiquement 3 ha. | | |
| ***CONTEXTE SIDÉRURGIQUE ENVIRONNANT*** | | |
| **Centres sidérurgiques proches et synchrones :** Le grand ferrier de Camp Naout se situe à moins de 2 km des centres sidérurgiques de Co d'Espérou (Saint-Denis, 11) et de Carreleit (Fontiers, 11). À environ 4 km, on trouve également le centre sidérurgique du Domaine des Forges (Martys, 11) et de Laprade-Basse (11). | | |
| **Substrat sidérurgique antérieur :** Le grand ferrier de Camp Naout est localisé dans le district sidérurgique du versant méridional de la Montagne Noire, dans la vallée voisine de la Dure, où coule l'Alzeau. Ce district a fonctionné dans une période directement antérieure à celle des centres sidérurgiques, au cours du I^er^ siècle avant notre ère. | | |
| ***TRAVAUX*** | | |
| **Enquête de terrain :** Dans le cadre de l'étude du ferrier de Co d'Espérou menée par Robert Sablayrolles dans les années 1970 et 1980 (Cf. *supra*), les deux vallées avoisinantes du Limon et de l'Alzeau ont été prospectées. C'est pendant cette enquête que le grand ferrier de Camp Naout a été mis au jour. | | |
| **Bibliographie :** (Sablayrolles 1989, p. 75 et 82). | | |
| ***EXPERTISE COMPLÉMENTAIRE OU JUSTIFICATIVE*** | | |
| Si de nombreuses autres investigations doivent être conduites pour le documenter plus précisément, selon la masse de déchets accumulée, la datation des vestiges et le contexte sidérurgique, il est très probable que le grand ferrier de Camp Naout représente un centre sidérurgique sensiblement comparable à celui du Domaine des Forges (Martys, 11), dans une chronologie synchrone entre le I^er^ et le III^e^ siècles. | | |

# ARGUMENTAIRES MÉTALLOGRAPHIQUES

# I. LES SITES DE RÉDUCTION DIRECTE

# *I.1. Le bas fourneau des Espérelles (Martigues, 13) au début du IVe siècle*

## LES SCORIES ÉCOULÉES NON MAGNÉTIQUES

### *Échantillon 18.1*

**Métrologie**

Masse (g) : 180
Longueur (mm) : 73
Largeur (mm) : 63
Épaisseur (mm) : 39

**Morphologie**

Fragment de scorie dense, écoulée et cordée qui conserve de nombreuses incrustations de matières végétales (fig. 16). Les faces principalement lisses et coulées possèdent par endroits des formes anguleuses, négatifs des incrustations de fragments de charbon de bois. Leur couleur vire du verdâtre au jaunâtre. Les porosités sont très peu fréquentes et uniquement millimétriques. La scorie est très peu magnétique.

**Macrographie**

La scorie a été tronçonnée transversalement (fig. 16). Très homogène, la section de cette scorie est uniquement constituée d'une matrice fayalitique vert-jaune à très grandes lattes visibles à l'œil nu (15 mm de long). Quelques porosités toujours ovoïdales (de 1 à 5 mm) s'y développent verticalement.

**Micrographie**

La matrice de l'échantillon est très compacte et très homogène (fig. 16). Entièrement fayalitique, elle est composée de très grandes lattes uniformes qui se sont formées à très haute température et ont refroidi très lentement. Il n'y a pas de wustite, mais quelques billes de métal non réoxydées à chaud sont localisées toujours à proximité des porosités. La configuration structurale est identique à celle de l'échantillon 18.3.

**Conclusion**

Cet échantillon très homogène est uniquement composé de fayalite à très grandes lattes. Il présente des caractéristiques proches d'un laitier, un des produits issus de la réduction du minerai

à haute température dans un bas fourneau à scorie écoulée. Cet échantillon est identique à l'échantillon 18.3. Il ressemble également beaucoup aux échantillons 18.2 et 18.4.

## *Échantillon 18.2*

**Métrologie**

Masse (g) : 118
Longueur (mm) : 58
Largeur (mm) : 55
Épaisseur (mm) : 41

**Morphologie**

Fragment de scorie écoulée, très dense et cordée qui livre une face supérieure avec un aspect déchiqueté. La face inférieure, beaucoup moins accidentée, comprend encore quelques zones avec de l'argile rubéfiée agglomérée, reliquat de la surface où la scorie s'est écoulée. Très peu de porosités sont présentes. La scorie n'est pas magnétique. Cette scorie est sensiblement similaire aux échantillons 18.1, 18.3 et 18.4.

**Conclusion**

A cause des similitudes morphologiques avec les échantillons 18.1 et 3, cet échantillon n'a pas été étudié à l'échelle macroscopique et microscopique. Vu ses caractéristiques morphologique, il doit s'agir d'un laitier, un des produits issus de la réduction du minerai à haute température dans un bas fourneau à scorie écoulée.

## *Échantillon 18.3*

**Métrologie**

Masse (g) : 106
Longueur (mm) : 61
Largeur (mm) : 53
Épaisseur (mm) : 34

**Morphologie**

Fragment de scorie écoulée dense et cordée qui est très peu magnétique. Sa face supérieure présente des petits reliefs aux contours mous sans cavités tandis que sa face inférieure possède des empreintes de matières végétales, type charbon de bois, et de porosités.

**Macrographie**

La scorie a été tronçonnée longitudinalement. Très homogène, la section est uniquement constituée d'une matrice fayalitique à lattes de 15 mm de long. Les porosités, situées uniquement en partie centrale, sont toujours ovoïdales et parfois orientées verticalement indiquant un dégazage. Leur dimension n'excède pas 5 mm.

**Micrographie**

La matrice de l'échantillon est très compacte et très homogène. Entièrement fayalitique, elle est uniquement composée de très grandes lattes qui se sont formées à très haute température et ont

refroidi lentement. Il n'y a pas de wustite, mais quelques billes de métal non réoxydées à chaud sont localisées toujours à proximité des porosités.

**Conclusion**

Cet échantillon très homogène est uniquement constitué de fayalite à très grandes lattes. Il présente des caractéristiques proches d'un laitier, un des produits issus de la réduction du minerai à haute température dans un bas fourneau à scorie écoulée. Cet échantillon est identique à l'échantillon 18.1. Il ressemble également beaucoup aux échantillons 18.2 et 18.4.

## *Échantillon 18.4*

**Métrologie**

Masse (g) : 144
Longueur (mm) : 74
Largeur (mm) : 49
Épaisseur (mm) : 44

**Morphologie**

Fragment de scorie écoulée, dense et cordée comportant des porosités débouchantes uniquement dans les zones fragmentées. La face supérieure possède une morphologie coulée et cordée tandis que la face inférieure est constituée d'un semis d'empreintes très profondes de fragments de charbon de bois. Cette scorie n'est pas magnétique. Cette scorie est sensiblement similaire aux échantillons 18.1, 18.2 et 18.3.

**Conclusion**

A cause des similitudes morphologiques avec les échantillons 18.1 et 3, cette scorie n'a pas été étudié à l'échelle macroscopique et microscopique. Vu ses caractéristiques morphologique, il doit s'agir d'un laitier, un des produits issus de la réduction du minerai à haute température dans un bas fourneau à scorie écoulée.

## *Échantillon 18.6*

**Métrologie**

Masse (g) : 604
Longueur (mm) : 122
Largeur (mm) : 89
Épaisseur (mm) : 92

**Morphologie**

Fragment de scorie écoulée possédant très peu d'incrustations de fragments de charbon de bois. Globalement non magnétique, elle conserve sur une des tranches un morceau de paroi argileuse agglomérée. Sur la face supérieure, la zone coulée n'est pas réellement cordée. La face inférieure plutôt poreuse est couverte de porosités débouchantes généralement millimétriques pouvant atteindre localement 3 mm.

**Conclusion**

A cause des similitudes morphologiques avec les échantillons 18.1 et 3, cet échantillon n'a pas été étudié à l'échelle macroscopique et microscopique. Vu ses caractéristiques morphologique, il doit s'agir d'un laitier, un des produit issu de la réduction du minerai à haute température dans un bas fourneau à scorie écoulée.

## *Échantillon 18.7*

### Métrologie

Masse (g) : 440
Longueur (mm) : 126
Largeur (mm) : 79
Épaisseur (mm) : 50

### Morphologie

Fragment volumineux de scorie écoulée qui conserve une face inférieure plus poreuse (porosités exclusivement millimétriques), moulée sur une surface argileuse parfois encore agglomérée (fig. 18). La face supérieure coulée est extrêmement déchiquetée, mais non cordée. Ponctuellement magnétique, la scorie présente une extrémité avec un petit fragment de paroi aggloméré.

### Macrographie

La scorie a été tronçonnée longitudinalement afin que l'on observe une section importante (fig. 18). Celle-ci est très poreuse et très hétérogène. Elle est formée d'une accumulation d'agrégats ovoïdaux qui baignent dans une matrice fayalitique poreuse (50 % de la section) identique à celle identifiée dans les laitiers 18.1 et 18.3. Les agrégats ovoïdaux (40 % de la section) sont composés d'une agglomération de billes métalliques millimétriques non réoxydées insérées dans une matrice fayalitique sous la forme d'un semis très dense. Il existe également, en moindre quantité, des agglomérations métalliques compactes, soit rondes pour les plus petites (trois d'entre-elles ont un diamètre entre 6 et 10 mm), soit plus ou moins rectangulaires, avec des contours mous pour les plus grosses.

L'attaque au nital détermine que la majorité du métal est formée d'un acier. En revanche, une des grosses billes et toutes les petites billes métalliques, formant les agrégats ovoïdaux, sont uniquement en ferrite.

### Micrographie

La matrice de la section est hétérogène (fig. 18). Elle est essentiellement composée d'un bain de fayalite à grandes lattes identique aux laitiers analysés 18.1 et 18.3 dans lequel se trouvent des concentrations ovoïdales d'une multitude de billes de métal non réoxydées à chaud. Toutes les billes de métal comportent une bonne propreté inclusionnaire. En revanche, les quatre plus grosses agglomérations métalliques plus ou moins rectangulaires ou rondes possèdent davantage un faciès d'éponge avec des inclusions amorphes pour certaines en cours d'écoulement (Cf. échantillon 18.5).

L'attaque au nital permet de voir que toutes les petites billes métalliques sont ferritiques. Dès que les fragments de métal sont plus gros, à l'exception d'une grosse bille, ils sont en revanche composés d'acier eutectoïde et parfois hypereutectoïde avec de la perlite lamellaire généralisée (0,8-0,9 % de carbone). Le plus gros fragment, plus ou moins rectangulaire avec un faciès d'éponge, est en acier hypereutectoïde (entre 0,8 et 1,7 % de carbone) avec une structure proche

de la lédeburite suggérant un reliquat de fonte blanche. La répartition des différentes teneurs en carbone ne permet cependant pas d'attester un phénomène de décarburation, mais indique plutôt un processus de réduction différentiel.

**Conclusion**

Cet échantillon est très certainement un fragment de scorie écoulée à la périphérie de la loupe où le minerai est totalement transformé en métal, mais où l'agglomération métallique et l'évacuation de la scorie résiduelle ne sont pas totalement réalisées. Vu la forme de la face inférieure, il est possible qu'il s'agisse de la scorie de fond de four formée juste sous la loupe.

## LES *GROMPS*

---

### *Échantillon 6.1*

**Métrologie**

Masse (g) : 100
Longueur (mm) : 71
Largeur (mm) : 48
Épaisseur (mm) : 29

**Morphologie**

Petite scorie informe, très dense et très magnétique. Ses faces homogènes sont plutôt compactes. Il s'y trouve uniquement de petites aspérités et un semis de microporosités. De texture rugueuse non coulée, elles conservent ponctuellement quelques traces de fragments de charbons de bois et de matières minérales. Il pourrait s'agir d'un *gromps* ou un pseudo-*gromps*.

**Macrographie**

L'échantillon a été tronçonné longitudinalement afin que l'on observe une section importante. La section est composée d'une gangue de scorie et de sédiments agglomérés dans laquelle se développent deux masses métalliques déchiquetées et quatre gros morceaux de charbon de bois. Les deux fragments métalliques renferment encore de nombreuses inclusions aux contours très écrasés. La section est approximativement composée de 40 % de scorie, 40 % de métal et de 20 % de charbon.

L'attaque au nital montre que toutes les zones métalliques sont composées d'une teneur élevée en carbone.

**Micrographie**

La matrice de la gangue est essentiellement formée de sédiments, de grains de silice et de charbon de bois (parfois très gros) agglomérés par de la scorie. Les zones métalliques présentent des contours déchiquetés et de nombreuses grosses inclusions. Les porosités sont plus rares. Dans celle localisée dans le côté le plus effilé, les inclusions et les porosités ont un faciès d'écrasement tandis que dans l'autre, elles sont plus ovoïdales.

L'attaque au nital permet de discerner de nombreuses battitures lamellaires dans la gangue encaissante. Dans les deux fragments métalliques, elle révèle également une structure dont la teneur en carbone forme un dégradé de 6 % de carbone à 0,9 % avec toutes les phases intermédiaires. En effet, dans l'extrémité du fragment métallique localisé dans le côté le plus

effilé, le métal est composé d'une fonte grise (de 3,5 à 6 % de carbone) qui devient progressivement vers l'intérieur une fonte blanche (2,5 à 3,5 % de carbone) avec de la lédeburite. Toutes les autres zones métalliques, y compris l'autre fragment (85 % des zones métalliques), sont constituées d'acier hypereutectoïde (entre 0,9 et 1,7 % de carbone).

**Conclusion**

La configuration structurale de l'échantillon et les nombreuses battitures lamellaires visibles dans la scorie incitent à considérer cet échantillon comme un *gromps* issu de l'épuration d'une loupe. Dans un même déchet de forge, la présence de fonte grise, de fonte blanche et d'acier hypereutectoïde avec toutes les phases intermédiaires pourrait peut-être signaler des phases de travail liées à la décarburation d'un massiau en partie constitué de fonte. Cette opération pourrait être réalisée dans la perspective de le forger. Cet échantillon est sensiblement équivalent à l'échantillon 18.5.

## *Échantillon 18.5*

**Métrologie**

Masse (g) : 162
Longueur (mm) : 71
Largeur (mm) : 53
Épaisseur (mm) : 41

**Morphologie**

Scorie très dense formée d'un corps ovoïdale et d'un appendice pratiquement circulaire important (fig. 17). Elle est très magnétique notamment dans son appendice. Elle présente des porosités et des aspérités plus ou moins développées dans une structure superficielle, également homogène, plus rugueuse que coulée. Elle possède ponctuellement des empreintes de fragments de charbon de bois. Il pourrait s'agir d'un *gromps* ou d'un pseudo-*gromps*.

**Macrographie**

L'échantillon a été tronçonné longitudinalement afin que l'on observe une section importante comprenant l'appendice très magnétique (fig. 17). La section de l'échantillon est complexe et hétérogène. Elle comporte cinq structures différentes. Deux forment les matrices encaissantes qui enveloppent deux morceaux de métal. À propos de ces matrices, la première est minoritaire (5 % de la section). Elle se situe dans une petite zone périphérique du corps de la scorie. Elle est formée d'une structure argileuse et siliceuse scorifiée où se trouvent des petits fragments épars de métal. La majorité de la matrice encaissante est constituée d'une structure très homogène avec des grandes lattes de fayalite (elles peuvent atteindre 1 cm) qui couvre 50 % de la surface. Elle est sensiblement similaire à celle des « laitiers » examinés (échantillons 18.1 et 18.3). Deux gros fragments métalliques (40 % de la section) sont localisés dans l'appendice et dans le corps de la scorie. Ils comportent encore énormément d'inclusions aux contours déchiquetés et écrasés. Par endroits, entre les fragments de métal et la matrice fayalitique, il existe une autre matrice fayalitique avec de très nombreux globules de wustite sous la forme de battitures lamellaires (5 % de la section). Cette dernière phase est à mettre en relation avec un très long filament d'oxydation lamellaire en cours de détachement le long d'une grande partie des contours métalliques telle une immense battiture plate. Le fragment métallique localisé dans l'appendice présente en coupe deux faces planes opposées qui peuvent être des vestiges de plans de frappe opposés.

L'attaque au nital indique que le fragment de métal, situé dans le corps de la scorie, est constitué d'un acier fortement carburé qui, vers le cœur de la section, devient progressivement uniquement ferrite. Dans l'appendice, l'autre gros fragment métallique est entièrement ferritique.

**Micrographie**

La matrice encaissante est essentiellement composée de fayalitique à lattes et à pavés sans globule ni dendrite de wustite, mais en revanche avec de nombreuses battitures globulaires et lamellaires (fig. 17). À la périphérie des masses métalliques, les battitures sont encore plus fréquentes et exclusivement lamellaires. Elles ceinturent littéralement les masses métalliques et indiquent un séjour prolongé de l'échantillon dans un foyer de forge. La grande majorité des pourtours métalliques est entourée d'un long filament d'oxydation qui témoigne également du passage de la pièce dans un foyer de forge. Le métal comprend de très importantes porosités internes qui possèdent parfois des faciès d'écrasement. Tous les types de replis, du moins écrasé au plus refermé, sont présents et témoignent d'un martelage important d'une matière initialement « sale ». Le fragment métallique localisé dans le corps de la scorie est le moins bien compacté. Il inclut des inclusions essentiellement ovoïdales remplies de fayalite parfois en cours d'écoulement. À la périphérie, ce fragment ressemble à une structure d'éponge. Dans l'appendice, le métal est nettement plus compacté et mieux aggloméré. Les porosités sont plus refermées. Il existe donc une différence très nette d'épuration entre les deux fragments de métal. Dans la matrice fayalitique située entre les deux zones métalliques, des filaments et des îlots de métal forment des reliquats d'agglomération métallique. Le pourtour du fragment métallique de l'appendice conserve une réoxydation à chaud caractéristique d'une « brûlure » réalisée en foyer de forge. La forme de ses contours signale également des plans de frappe. L'autre fragment métallique possède des contours déchiquetés sans plan de frappe.

L'attaque au nital indique que le fragment au faciès d'éponge, localisé à la périphérie du corps de la scorie, est constitué d'un acier eutectoïde à 0,8 % de carbone avec une perlite lamellaire généralisée très fine. Vers le cœur de la section, l'acier se décarbure progressivement (0,3 % de carbone) pour devenir ensuite de la ferrite. Dans l'appendice, le métal est uniquement de ferrite.

**Conclusion**

Cet échantillon présente toutes les caractéristiques d'un *gromps* issu de l'épuration d'un massiau ferritique en partie composé d'acier eutectoïde (0,8 % de carbone). L'assèchement des inclusions est plus développé dans la zone métallique la moins épurée. Ceci pourrait peut-être signifier que l'agglomération du métal au cours de la phase de réduction entraîne un assèchement partiel des porosités qui sont ensuite momentanément remplies au cours des premières phases d'épuration (Cf. échantillon 18.7). Cet échantillon est sensiblement équivalent à l'échantillon 6.1.

---

## *Échantillon 18.8*

**Métrologie**

Masse (g) : 848
Longueur (mm) : 156
Largeur (mm) : 125
Épaisseur (mm) : 87

**Morphologie**

Scorie écoulée et poreuse qui présente de très nombreuses zones avec des fragments de parois agglomérées principalement localisées dans les extrémités et les côtés. La face supérieure possède

une morphologie coulée sans quasiment aucune porosité débouchante. Elle est ponctuellement très magnétique, contrairement à la face inférieure qui ne l'est presque pas. Celle-ci est très poreuse et totalement recouverte de porosités débouchantes principalement millimétriques. Elle conserve de très nombreuses empreintes de fragments de charbon de bois parfois de très grosses dimensions.

**Macrographie**

La scorie a été tronçonnée longitudinalement afin que l'on observe une section importante. Celle-ci est très hétérogène. Elle renferme essentiellement des agrégats ovoïdaux constitués d'une multitude de billes métalliques micrométriques. Plus rarement, il existe deux zones métalliques agglomérées et un fragment de minerai partiellement réduit. Tous ces éléments, essentiellement situés en partie supérieure, baignent dans une matrice fayalitique très poreuse qui comporte des cavités ovoïdales excédant très rarement 8 mm de diamètre. Trois zones en périphérie sont uniquement formées d'argiles rubéfiées.

**Micrographie**

La scorie est constituée d'une matrice fayalitique à lattes et à pavés de grosses dimensions sensiblement identique aux laitiers 18.1 et 18.3. Des billes de métal non réoxydées à chaud sont présentes sous la forme d'îlots principalement dans le haut de la scorie. Il existe aussi quelques alignements de filaments métalliques parfois localisés autour de porosités. Ceci indique la présence de puits de diffusion gazeux réducteurs caractéristiques de la réduction du minerai. À proximité des zones argileuses, la matrice fayalitique possède de la wustite principalement sous la forme de battitures globulaires, lamellaires et en billes. Quelques billes de métal partiellement réoxydées à chaud y sont également visibles. Cette configuration se retrouve également très localement dans le cœur de la section.

**Conclusion**

Cette scorie concentre des caractéristiques physiques et chimiques spécifiques des opérations de réduction de minerai, mais également de celles de forgeage. Elle témoigne donc probablement d'un travail de forge préliminaire réalisé sur un produit directement issu de la réduction. Cet échantillon est donc vraisemblablement un déchet issu de la première phase d'épuration de la loupe de fer sortie du bas fourneau.

# *I.2. Le bas fourneau du Gravas (Saint-Mamert-du-Gard, 30) à la fin du IVe siècle*

## UNE SCORIE COULÉE NON MAGNÉTIQUE

### *Échantillon 108.1*

**Métrologie**

Masse (g) : 738
Longueur (mm) : 140
Largeur (mm) : 110
Épaisseur (mm) : 70

**Morphologie**

Scorie coulée d'aspect blanchâtre et jaunâtre qui conserve une face supérieure de texture coulée avec de nombreuses incrustations de billes magnétiques de métal (fig. 31). Sa face inférieure agglomère un important fragment de paroi rubéfiée. Il pourrait s'agir d'un laitier car elle n'est pas magnétique et très légère malgré son volume. Une cassure naturelle a fractionné la scorie transversalement. La structure interne est très homogène et jaunâtre.

**Conclusion**

Cet échantillon n'a pas été étudié à l'échelle macroscopique et microscopique. Il est certainement uniquement constitué de fayalite. Il pourrait donc s'agir d'un laitier, un des produits issus de la réduction du minerai à haute température dans un bas fourneau à scorie coulée. Cet échantillon est sensiblement similaire aux échantillons 18.1, 18.2, 18.3 et 18.4 du site des Espérelles (Martigues, 13)

## *Échantillon 101S.1*

**Métrologie**

Masse (g) : 886
Longueur (mm) : 120
Largeur (mm) : 110
Épaisseur (mm) : 60

**Morphologie**

Scorie ovoïdale de forme plano-convexe possédant une face supérieure légèrement accidentée, plane et très peu poreuse. Sa face inférieure est essentiellement constituée d'incrustations de matières végétales et minérales. Il pourrait s'agir d'un culot de forge. Toutefois, à proximité d'un lieu de réduction, l'activité préférentielle d'une forge est l'épuration. Cette opération génère souvent de très nombreuses grosses pertes métalliques qui ne semblent pas présentes dans cette scorie peu magnétique. Il doit donc plus certainement s'agir d'une petite scorie de fond de four.

**Conclusion**

Cet échantillon est sensiblement identique à l'échantillon 101S.2, il n'a donc pas été étudié à l'échelle macrographique et micrographique. Il s'agit certainement d'une petite scorie de fond de four, formée dans la fosse à scorie d'un bas fourneau produisant des scories piégées et coulées.

## *Échantillon 101S.2*

**Métrologie**

Masse (g) : 830
Longueur (mm) : 130
Largeur (mm) : 95
Épaisseur (mm) : 58

**Morphologie**

Scorie ovoïdale de forme plano-convexe possédant une face supérieure plane, légèrement accidentée et peu poreuse avec de très nombreuses incrustations de fragments de charbon de bois (fig. 32). Sa face inférieure est essentiellement constituée de matières minérales agglomérées sous la forme de plaques qui recouvrent deux des quatre côtés. Ce sont des fragments de parois de bas fourneau ou de foyer de forge. Il pourrait donc, soit s'agir d'un culot de forge lié à une activité d'épuration, soit d'une scorie de fond de four associée à la réduction du minerai. Cet échantillon est sensiblement identique à l'échantillon 101S.1.

**Macrographie**

La scorie a été tronçonnée dans l'axe longitudinal (fig. 32). La section est hétérogène. Dans la partie basse, de nombreuses porosités ovoïdales sont parfois allongées verticalement. Leur

dimension varie du millimètre au centimètre. En partie centrale, la scorie est très compacte sans pratiquement aucune porosité. Dans la partie haute, la configuration est sensiblement similaire à la partie basse. Ici, en revanche, les porosités sont généralement plus grosses et souvent orientées verticalement. Il s'agit essentiellement de scorie fayalitique. Dans l'extrémité la plus fine, en partie haute, cinq zones livrent du métal plus ou moins aggloméré sous la forme de filaments ou de chapelets. Sur le même côté, mais en partie basse, deux inclusions de matières minérales sont certainement issues des parois encaissantes.

**Micrographie**

La matrice de la scorie est très homogène (fig. 32). Elle est principalement constituée de fayalite à lattes et à pavés dans laquelle se développent beaucoup de dendrites de wustite et de nombreuses billes de métal éparses non réoxydées. Aucune battiture n'est visible. Les lattes de fayalite sont très grandes, elles signalent des cycles thermiques très élevés et un refroidissement lent. En partie supérieure, des fragments de métal toujours ferritiques et parfois légèrement réoxydés signalent la proximité d'un environnement oxydant.

**Conclusion**

L'ensemble des éléments recueillis sur cet échantillon abonde dans le sens d'une petite scorie de fond de four, formée dans la fosse à scorie d'un bas fourneau produisant des scories piégées et coulées. En effet, la légère réoxydation remarquée sur quelques fragments ferritiques n'est pas imputable à une phase de forge qui, vu le contexte, doit être en rapport avec l'épuration de la loupe. Cet environnement oxydant doit être mis en relation avec la proximité de l'arrivée d'air d'une tuyère.

## *Échantillon 102.1*

### Métrologie

Masse (g) : 1308
Longueur (mm) : 122
Largeur (mm) : 100
Épaisseur (mm) : 65

### Morphologie

Élément massif, légèrement allongé et très magnétique qui possède une face plane (5 x 10 cm) pouvant correspondre à une surface de frappe ou une empreinte (fig. 33). À proximité, une autre zone renferme des fragments de parois et de très nombreuses battitures lamellaires agglomérées à l'hydroxyde. La face opposée est relativement peu accidentée et très peu poreuse. Des masses métalliques sous-jacentes font à de multiples endroits éclater l'hydroxyde. Quelques empreintes de charbon de bois sont visibles, mais elles sont principalement localisées dans les deux extrémités de la pièce qui conservent un aspect beaucoup plus accidenté et poreux.

### Macrographie

Pour observer précisément l'échantillon et particulièrement sa face plane, le tronçonnage a été pratiqué transversalement en 3 endroits distincts et parallèles (fig. 33). Sur les 4 sections obtenues, la n°3 a été retenue pour être le support de l'étude micrographique puisqu'elle est la plus volumineuse et qu'elle contient le plus de métal. La description macrographique porte sur les 4 sections qui livrent des caractéristiques semblables. Les sections renferment une matrice de scorie fayalitique dans laquelle sont présents de très nombreux chapelets métalliques concentrés autour des porosités sous la forme filaments. L'agglomération du métal n'est donc pas encore complète. Toutes les sections sont très poreuses. Les cavités ont des dimensions variant du millimètre au centimètre. Tout concourt à les identifier comme des puits de diffusion gazeux réducteurs. Dans les quatre sections, les porosités localisées à proximité de la face plane sont écrasées et partiellement refermées. Une des sections (n°2), à proximité de la face plane, est pratiquement compacte. La scorie encaissante est très peu fissurée. Ceci montre clairement que la face plane est consécutive à un martelage à chaud et non à une empreinte. Le métal couvre environ 30 % de la section.

### Micrographie

La section micrographique est la n°3. La matrice de la section est constituée de fayalite à lattes et à pavés et de très nombreux globules de wustite (fig. 33). À proximité des porosités, il se développe un semis très important de métal sous la forme de filaments et de billes. Bien souvent, le contour de ces porosités est formé d'un grand filament métallique. Les cavités forment donc des puits de diffusion gazeux très réducteurs. L'ensemble est très homogène.

L'attaque au nital montre que le métal se trouve sous la forme de ferrite.

**Conclusion**

L'ensemble des informations recueillies sur cet échantillon indique qu'il s'agit vraisemblablement d'un fragment de fond de four offrant de très nombreux témoins de réduction et d'agglomération métallique. Il pourrait donc s'agir d'une scorie située à la périphérie de la loupe. Les métallurgistes-forgerons l'ont martelée à chaud sur une face, mais ils l'ont ensuite rapidement abandonnée certainement parce que le métal n'était pas assez aggloméré.

---

## *Échantillon 102.2*

**Métrologie**

Masse (g) : 134
Longueur (mm) : 95
Largeur (mm) : 47
Épaisseur (mm) : 25

**Morphologie**

Élément métallique très magnétique et très compacte qui conserve un aspect coulé sur toutes ses faces (fig. 34). Il comprend un appendice circulaire (7 mm de diamètre) de 4 cm de long qui accentue son aspect coulé. Aucun plan de frappe n'est visible.

**Macrographie**

La pièce a été tronçonnée longitudinalement dans la partie la plus massive afin que l'on observe une section importante (fig. 34). Celle-ci s'avère entièrement métallique. Il subsiste très peu d'inclusions uniquement inférieures au millimètre. En revanche, de grosses porosités ovoïdales (parfois centimétriques) se trouvent principalement dans le cœur du métal. *A contrario*, dans les deux extrémités, les porosités sont beaucoup plus petites (de l'ordre du millimètre) et possèdent parfois des formes écrasées. Plus rarement, elles sont pratiquement refermées.

L'attaque au nital révèle une section entièrement carburée. D'après les analyses microscopiques, il s'agit essentiellement de fonte blanche. Plus localement dans le cœur de la section, il existe de la de fonte grise.

**Micrographie**

Avant l'attaque au nital, il est déjà possible d'observer les faciès sous-jacents de lédeburite ou de fonte grise qui sont généralisés dans toute la section (fig. 34). La forme écrasée et parfois totalement refermée des micro-inclusions et des micro-porosités signale un martelage important de la pièce tandis que le fort taux d'écoulement de la majorité des inclusions montre bien que l'objet a été asséché de sa scorie résiduelle de réduction. D'ailleurs, par rapport au nombre de porosités, les inclusions sont minoritaires. En périphérie, des fragments de charbon de bois et de scorie sont agglomérés à la masse métallique.

L'attaque au nital confirme que toute la section est formée d'une matrice lédeburitique caractéristique d'une fonte blanche (entre 2,5 et 3,5 % de carbone). Par endroits, mais toujours dans le cœur de la section, des zones de fonte grise (entre 3,5 et 6 % de carbone) sont regroupés sous la forme d'îlots circulaires. En périphérie ou autour des grosses porosités, il y a toujours de la lédeburite ou des aciers hypereutectoïdes (entre 0,8 et 1,7 % de carbone) qui témoignent de décarburations locales.

**Conclusion**

Cet échantillon est un fragment de loupe exclusivement constitué de fonte. Celle-ci est principalement blanche et localement grise. Le faciès écrasé d'une majorité des porosités, le petit nombre d'inclusions et les différentes décarburations locales indiquent que la pièce a fait l'objet de tentatives de travail en contexte de forge. Elle a été ensuite abandonnée dans le même contexte certainement à cause des problèmes techniques posés par le traitement d'une masse de fonte, trop dure et non malléable sans une décarburation poussée.

# II. LES FORGES D'HABITATS GROUPÉS

# *II.1. La forge de l'îlot VI d'*Olbia *à la transition de notre ère (Hyères, Var)*

## LES CULOTS DE FORGE

### *Échantillon 61148.1*

**Métrologie**

Masse (g) : 180
Longueur (mm) : 100
Largeur (mm) : 70
Épaisseur (mm) : 26

**Morphologie**

Culot plat de forme légèrement oblongue. Il est très dense, mais relativement peu magnétique. Les surfaces sont très peu poreuses. Si la face supérieure est très régulière et plane, la face inférieure est légèrement plus accidentée et conserve encore quelques incrustations de sable plus ou moins gros.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement. La section est constituée d'une structure homogène principalement fayalitique. La répartition des porosités est relativement équilibrée. Principalement millimétriques et ovoïdales, quatre d'entres elles atteignent, en partie centrale, le centimètre sous des formes anguleuses. Celles-ci se développent préférentiellement verticalement, ce qui indique un dégazage important. À cette échelle, aucune masse métallique n'est visible dans la scorie.

**Micrographie**

La matrice fayalitique est homogène et principalement pavimenteuse. Des battitures billes et globulaires sont visibles, mais ce sont principalement les lamellaires qui ont fourni à la scorie son semis épars de globules et de dendrites de wustite. Les billes de métal sont très peu nombreuses et généralement faiblement réoxydées à chaud.

**Conclusion**

Ce culot illustre de longs cycles de chauffe homogènes réalisés à moyenne et haute température. Les pertes engendrées par cette activité de forge sont essentiellement des battitures lamellaires. Ceci est caractéristique d'un forgeage standard et maitrisé, fondé sur la chauffe et la mise en

forme de fragments métalliques, déjà bien épurés, et possédant des faces planes. Ce culot est sensiblement similaire aux échantillons 61148.3 et 61167.1.

## *Échantillon 61148.3*

### Métrologie

Masse (g) : 104
Longueur (mm) : 63
Largeur (mm) : 43
Épaisseur (mm) : 24

### Morphologie

Culot plano-convexe oblong et peu magnétique (fig. 48). Une des extrémités présente un flanc abrupt qui pourrait être la zone d'accroche avec la paroi du foyer de forge. Sa face inférieure est très peu poreuse et ne possède pas d'incrustation. Très peu accidentée, elle comporte une texture rugueuse sensiblement similaire à la face supérieure qui est très dense et sans relief.

### Macrographie

Le culot a été tronçonné longitudinalement. La section comporte une structure fayalitique très homogène (fig. 48). De petites porosités millimétriques déchiquetées se développent en partie centrale tandis que d'autres un peu plus grosses et verticales sont présentes en partie inférieure. La partie supérieure est exempte de cavité. À cette échelle, aucune masse métallique n'est visible dans la scorie.

### Micrographie

La matrice fayalitique de l'échantillon est principalement à lattes, mais elle peut être localement pavimenteuse (fig. 48). La wustite, en proportion importante, s'y trouve sous forme dendritique et globulaire. Très peu de pertes en métal sont observées. Elles sont pour la plupart non réoxydées à chaud. Les battitures, souvent dissoutes dans la scorie, sont, en partie haute, lamellaires et, en partie basse, globulaires. De la magnétite ou de l'hercynite est présente du côté de la section où le flanc de la scorie est abrupt. Elles indiquent l'endroit le plus chaud et le plus oxydant de la scorie qui est par conséquent le lieu où débouche l'air de la tuyère. Ceci confirme que le flanc abrupt du culot était certainement accroché à la paroi du foyer.

### Conclusion

Ce culot illustre de longs cycles de chauffe homogènes réalisés à moyenne et haute température. Les pertes engendrées par cette activité de forge sont essentiellement des battitures lamellaires et globulaires. Ceci est caractéristique d'un forgeage standard et maîtrisé fondé sur la chauffe et la mise en forme de fragments métalliques déjà bien épurés et possédant des faces planes. Ce culot est sensiblement similaire aux échantillons 61148.1 et 61167.1.

## *Échantillon 61167.1*

### Métrologie

Masse (g) : 230
Longueur (mm) : 97

Largeur (mm) : 75
Épaisseur (mm) : 24

**Morphologie**

Culot plano-convexe de forme ronde. Très dense, il n'est pratiquement pas magnétique. Sa face inférieure possède très peu de porosités et de nombreuses agglomérations d'argile rubéfiée. La face supérieure, également dense, dispose sur un de ses côtés d'une forte densité de porosités centimétriques pouvant indiquer le lieu où débouchait l'air de la tuyère. Le reste de la surface très peu accidenté et très peu poreux dénote un contexte thermique élevé.

**Macrographie**

La section du culot comporte une matrice fayalitique très homogènes. Les porosités sont principalement grandes. Elles peuvent atteindre 2 cm de long. De formes plutôt ovoïdales, elles s'étendent préférentiellement horizontalement en partie basse, mais une d'entre elles tend à être verticale en partie centrale (dégazage). De plus fines cavités ovoïdes, inférieures au millimètre, sont présentes uniquement en partie supérieure. À cette échelle, aucune masse métallique n'est visible dans la scorie.

**Micrographie**

La matrice fayalitique essentiellement à lattes est très homogène, mais elle conserve également quelques petites zones pavimenteuses. La wustite, présente en grande proportion, existe principalement sous la forme globulaire. La section conserve très peu de pertes en métal pour la plupart non réoxydées à chaud, mais elle renferme beaucoup de battitures globulaires plus ou moins dissoutes dans le bain. Quelques battitures billes sont également visibles.

**Conclusion**

Ce culot illustre de longs cycles de chauffe homogènes réalisés à moyenne température. Les pertes engendrées par cette activité de forge sont essentiellement des battitures globulaires. Ceci est caractéristique d'un forgeage standard et maîtrisé fondé sur la chauffe de fragments métalliques déjà bien épurés. La présence de battitures billes peut indiquer que des phases de soudures étaient mises en œuvre. Ce culot est sensiblement similaire aux échantillons 61148.1 et 61148.3.

---

## *Échantillon 61167.2*

**Métrologie**

Masse (g) : 178
Longueur (mm) : 79
Largeur (mm) : 78
Épaisseur (mm) : 31

**Morphologie**

Culot plano-convexe de forme légèrement oblongue. Très dense, il est principalement magnétique sur sa face inférieure. Celle-ci est pratiquement entièrement recouverte d'une agglomération d'argile rubéfiée. La face supérieure est beaucoup plus accidentée, notamment en partie centrale où une grosse dépression se développe et indique le lieu où l'air de la tuyère débouchait. Cette surface est cependant très peu poreuse et tapissée de matières végétales et minérales.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement. La section comporte une structure fayalitique qui s'étend dans tout le corps du culot, mais qui prend en surface inférieure et supérieure une forme beaucoup plus fibreuse avec des restes de matières minérales et organiques. D'une manière générale, la section est très poreuse et plus hétérogène que dans les autres culots. Elle livre des cavités majoritairement millimétriques qui peuvent atteindre marginalement 5 mm et s'étendre verticalement. Une très grosse battiture lamellaire (5 mm) est présente dans la zone fibreuse inférieure. À cette échelle, aucune masse métallique n'est visible dans la scorie.

**Micrographie**

De manière générale, la configuration hétérogène de la section indique que les cycles de chauffe étaient courts, mais homogènes. Ce culot diffère donc des autres échantillons qui matérialisent des cycles thermiques identiques, mais plus longs. La matrice fayalitique du culot est principalement à lattes de petites dimensions. Beaucoup de battitures globulaires sont présentes à côté de quelques autres en billes. Plus ou moins dissoutes dans le bain de scorie, elles ont fourni un nombre important de wustite sous les formes de globule et de dendrite. Il existe également quelques rares fragments métalliques plus ou moins réoxydés à chaud. Dans le pourtour de la scorie, essentiellement composé de sédiments agglomérés, se trouvent de nombreuses battitures lamellaires parfois très épaisses (400 microns).

**Conclusion**

Ce culot illustre de multiples cycles de chauffe courts et homogènes réalisés à moyenne température. Les pertes engendrées par cette activité de forge sont essentiellement des battitures globulaires. Ceci est caractéristique d'un forgeage standard et maîtrisé fondé sur la chauffe de fragments métalliques déjà bien épurés. La présence de battitures billes peut indiquer que des phases de soudures étaient mises en œuvre.

# *II.2. La forge de la maison A de Lunel-Viel (34) au milieu du IIe siècle*

## LES DEMI-PRODUITS

### *Échantillon 2045.8*

**Métrologie**

Masse (g) : 736
Longueur (mm) : 180
Diamètre (mm) : 28

**Morphologie**

Pièce métallique allongée, de section carrée localement circulaire, qui présente sur une de ses extrémités un faciès de tranchage à chaud réalisé à partir des deux côtés opposés (fig. 61). L'autre extrémité est plus ou moins aplatie. Il pourrait s'agir d'un demi-produit type barre dont une partie a déjà été débitée.

**Macrographie**

Pour étudier précisément la barre, elle a été tronçonnée sur la moitié de sa longueur à partir de l'extrémité tranchée à chaud et transversalement à la proximité de l'autre extrémité (fig. 61).

***Section longitudinale***

La section dispose d'une bonne propreté inclusionnaire, mais elle renferme de très nombreuses porosités souvent encore largement ouvertes qui s'étendent de préférence longitudinalement (fig. 61). Elles sont plus fréquentes vers le cœur de la pièce, ce qui montre bien un gradient d'épuration. La masse de métal a donc été asséchée de la scorie de réduction résiduelle et largement étirée.

L'attaque au nital révèle une structure entièrement ferritique.

***Section transversale***

La section transversale offre un meilleur taux de compactage que la section précédente. Aucun gradient d'épuration n'est visible. Si les porosités sont pratiquement absentes, cette section renferme encore quelques inclusions fayalitiques au multiples faciès d'écrasement.

L'attaque au nital indique que la section est essentiellement ferritique. Une petite zone aciérée se trouve au cœur du métal (5 % de la section).

**Micrographie**

***Section longitudinale***

La périphérie de la section est exempte de cavité, mais le centre de la pièce comprend de nombreuses porosités pour la plupart vides de scorie primaire (fig. 61). Leur nature et leur répartition montrent un gradient d'épuration visible jusque dans l'assèchement de la scorie résiduelle. Les porosités sont alignées dans le sens longitudinal, mais elles demeurent parfois encore très ouvertes. Il ne subsiste pas de repli. La présence de quelques décohésions intergranulaires et de scories primaires fissurées témoigne d'un martelage à basse température. L'extrémité de la barre comporte des alignements d'inclusions qui convergent vers l'extrémité effilée. Ceci indique que l'opération de tranche a été réalisée à chaud.

L'attaque au nital révèle une section entièrement ferritique avec des tailles de grains qui diminuent vers la périphérie. Ceci est synonyme d'un martelage important. À l'extrémité effilée, les grains de ferrite conservent un reliquat d'écrouissage légèrement recristallisé, ce qui confirme que le tranchage a été réalisé à chaud.

***Section transversale***

Si aucun gradient d'épuration n'est visible, la majorité des porosités a disparu. En revanche, il existe un nombre important d'inclusions fayalitiques pour certaines en cours d'écoulement, ce qui dénote une épuration incomplète. Des reliquats d'agglomérations métalliques incomplètes sont d'ailleurs encore visibles, mais il n'y a pas de repli. Contrairement à la section longitudinale, aucune décohésion intergranulaire et aucune fissure de la matrice fayalitique ne sont visibles, ce qui témoigne d'un martelage préférentiellement réalisé à chaud.

L'attaque au nital révèle une section essentiellement ferritique sans écrouissage. Au milieu, une petite zone aciérée forme un dégradé du cœur vers la périphérie de 0,7 à 0,3 % de carbone avec de la perlite lamellaire et globulaire. Ceci pourrait traduire une décarburation importante de la masse métallique au cours des phases d'épuration. La grosseur des grains de ferrite forme également un dégradé. Ils sont de plus en plus petits à mesure que l'on s'approche des surfaces. Ceci indique un martelage soutenu.

**Conclusion**

Cette pièce est donc proche d'un demi-produit ferreux de type barre qui conserve un débitage de matière par tranchage à chaud. Ce demi-produit est essentiellement ferritique. Une petite zone aciérée située dans le cœur pourrait montrer que la loupe initiale était au moins en partie aciérée. Une décarburation progressive a certainement eu lieu au cours des phases d'épuration qui sont également visibles dans l'assèchement des porosités et dans le gradient d'épuration.

---

## *Échantillon 2045.14*

**Métrologie**

Masse (g) : 32
Longueur (mm) : 30
Largeur (mm) : 17
Épaisseur (mm) : 11

**Morphologie**

Petite pièce métallique de forme parallélépipédique (fig. 62). Une de ses extrémités présente un faciès de tranche à chaud qui pourrait être considéré comme un débitage. Il pourrait donc s'agir d'un petit demi-produit.

**Macrographie**

La pièce a été tronçonnée longitudinalement. La section offre une propreté inclusionnaire moyenne à bonne (fig. 62). Il subsiste en effet de nombreuses soudures longitudinales de corroyage localement mal assemblées. L'une d'elles n'est pas soudée sur les 2/3 de sa longueur et renferme beaucoup d'hydroxydes. Des lignes de soudure convergent vers la pointe de la tranche qui a dû être réalisée à chaud.

La pièce est constituée de sept feuilles majoritairement ferritiques assemblées les unes sur les autres longitudinalement (corroyage). L'une d'elles est plus aciérée. Elle forme un des bords de la section.

**Micrographie**

De manière générale, l'échantillon possède une bonne propreté inclusionnaire avec, par endroits, quelques inclusions soit amorphes soit remplies de fayalite et de dendrites de wustite (fig. 62). De nombreuses lignes de corroyage sont visibles dans leur alignement longitudinal. Certaines d'entre-elles convergent vers la pointe de la tranche et confirme sa réalisation à chaud. Aux deux tiers de la hauteur de la section, une soudure est hydroxydée sur les deux tiers de sa longueur. Ceci occasionne des décohésions intergranulaires. Dans le tiers correctement soudé, il existe des inclusions amorphes alignées qui peuvent correspondre à des grains de sable jetés pour limiter la formation d'oxydes sur les surfaces à assembler. Il n'y a pas de repli ni de zone d'agglomération métallique incomplète. Dans le sédiment aggloméré à l'hydroxyde, il y a des fragments de charbon de bois, des grains de silice et quelques battitures lamellaires.

L'attaque au nital indique que la majorité de l'échantillon est composé d'une succession de feuilles de composition différentes soudées ensemble. Il existe essentiellement des feuilles ferritiques mais quelques-unes sont plus aciérées (0,1 % de carbone) avec un très petit grain. L'attaque confirme que la grande ligne hydroxydée est une soudure d'une feuille à gros grains de ferrite sur une autre à petits grains. À proximité du bec résiduel de la tranche, il existe un écrouissage important. L'opération a donc été réalisée à relativement basse température et la pièce n'a pas été réchauffée par la suite.

**Conclusion**

La morphologie et le tranchage à chaud indique que cette pièce peut être considérée comme un petit demi-produit formé par l'accumulation de petites feuilles de différentes natures. Cet échantillon pose donc le problème du recyclage du métal et de sa réintroduction dans le circuit de production.

## *Échantillon 2045.1*

### Métrologie

Masse (g) : 330
Longueur (mm) : 122
Largeur (mm) : 68
Épaisseur (mm) : 45
Rayon de courbure (mm) : 130

### Morphologie

Scorie constituée d'un petit et d'un gros culots relativement peu magnétiques et présentant une structure similaires. Ils sont disposés l'un à côté de l'autre sur le même plan. La face inférieure, convexe, est très accidentée et possède de nombreuses incrustations de fragments de charbon de bois et de matières minérales. La face supérieure est particulièrement homogène et très peu accidentée. Les porosités sont rares mis à part trois cavités de 4 mm de diamètre. L'axe de la tuyère n'est pas déterminable, mais la morphologie générale de la surface supérieure témoigne d'un coup de chaud en fin de cycle de forge.

### Macrographie

La scorie a été tronçonnée transversalement. L'étude macroscopique et microscopique porte donc uniquement sur le gros culot. Sa section hétérogène présente une stratification en quatre étapes. La strate inférieure se développe sur 15 mm de haut. Elle est caractérisée par de très nombreuses cavités principalement rondes pour les plus petites et plus anguleuses pour les plus grandes qui peuvent atteindre 10 mm. Au-dessus, se trouve une strate de 18 mm, très fibreuse, avec de nombreux fragments de charbon de bois. Les porosités y sont également très petites et rondes. Au-dessus, une fine strate homogène et dense couvre au maximum de 8 mm de la hauteur. Les cavités y sont très peu fréquentes et toujours petites et rondes. Sous la surface supérieure, une strate fibreuse s'étend sur environ 10 mm de haut. Elle est ponctuée uniquement de quatre grosses cavités parfois débouchantes pouvant atteindre plus de 10 mm. À cette échelle, aucun fragment métallique n'est visible.

### Micrographie

La section possède une matrice fayalitique à lattes avec une très grande densité de wustite sous forme globulaire et dendritique et un semis épars de billes de métal éclatées (six observées). Mis à part quelques filaments ou fragments de métal réoxydés à chaud en limite inférieure, la majorité des pertes en métal est non réoxydée. Ceci pourrait suggérer que le travail s'effectuait dans une atmosphère réductrice ou en anaérobie. La présence de fragments de charbon de bois au milieu de la scorie confirme d'ailleurs cette hypothèse à moins que celle-ci ne soit due à l'existence de deux recharges en cours d'opération. Très peu de battitures globulaires sont visibles, elles sont pour une grande majorité dissoutes dans la scorie sous la forme de wustite. Une zone livre un cercle fin et parfait de wustite dont le cœur est constitué de fayalite comme dans l'échantillon 2045.4. Cette observation est anecdotique, mais elle révèle un caractère métallographique inconnu.

**Conclusion**

Ce culot représente un travail de forge à moyenne température caractérisé par d'importantes pertes en battitures globulaires et par des chutes métalliques relativement faibles. Il indique par conséquent un travail maîtrisé et standardisé de chauffes successives. Toutefois, sa stratification témoigne de plusieurs phases de travail sans chauffage prolongé qui aurait homogénéisé le bain de scorie. Au milieu de la section, la présence de billes de fer éclatées non réoxydées et de fragments de charbon de bois (comme dans les échantillons 2045.2 et 2045.4) indique le travail d'objets en acier, mais elle pourrait illustrer une phase de cémentation d'ailleurs observée sur certains objets en fer du site étudiés (échantillons 2045.11 et 2045.13). Ce culot de forge ressemble aux échantillons 2045.2, 2045.3, 2045.4, 2045.6, 2085.2 et 2085.3.

## *Échantillon 2045.2*

**Métrologie**

Masse (g) : 402
Longueur (mm) : 109
Largeur (mm) : 96
Épaisseur (mm) : 37
Rayon de courbure (mm) : 13

**Morphologie**

Culot oblong et magnétique. Sa face inférieure convexe et peu accidentée dispose de quelques porosités pouvant atteindre 3 mm de diamètre et de quelques incrustations de fragments de charbon de bois ou de matières minérales. La face supérieure, légèrement concave, est peu accidentée et très peu poreuse sous une structure fibreuse. La périphérie de cette face, en revanche très accidentée, renferme de nombreuses incrustations de fragments de charbon de bois mêlées à des matières minérales.

**Macrographie**

La scorie a été tronçonnée transversalement. La section livre une matrice très homogène hormis à la limite supérieure où se développe une zone plus fibreuse. En revanche, la répartition des cavités dénote une stratification. Dans la partie inférieure, de grosses cavités rondes sont situées à côté de trois fragments de charbon de bois tandis que dans la partie supérieure, les cavités parfois plus anguleuses sont toujours beaucoup plus étirées horizontalement. À cette échelle, aucun fragment métallique n'est visible.

**Micrographie**

Au niveau micrographique, la section renferme une matrice fayalitique homogène à lattes avec beaucoup de wustite sous forme globulaire et dendritique. Les pertes en métal sont relativement faibles notamment par rapport au culot 2045.1 qui conserve plus de billes de métal non réoxydées. La limite supérieure du culot est plus visqueuse, ce qui manifeste un environnement thermique moins élevé en fin de cycle. Quelques battitures lamellaires sont présentes dans le sédiment aggloméré à la scorie.

**Conclusion**

Ce culot de forge caractérise un forgeage à moyenne température générant d'importantes pertes en battitures globulaires et peu de chutes métalliques. Il détermine donc un travail maîtrisé et standardisé de chauffe. Au milieu de la section, la présence de billes de fer éclatées non réoxydées

et de fragments de charbon de bois (comme dans les échantillons 2045.1 et 2045.4) indique le travail d'objets en acier, mais elle pourrait illustrer une phase de cémentation, d'ailleurs observée sur certains objets en fer étudiés du site (échantillons 2045.11 et 2045.13). Ce culot de forge ressemble aux échantillons 2045.1, 2045.3, 2045.4, 2045.6, 2085.2 et 2085.3.

## *Échantillon 2045.3*

### Métrologie

Masse (g) : 210
Longueur (mm) : 82
Largeur (mm) : 64
Épaisseur (mm) : 33
Rayon de courbure (mm) : indéterminé

### Morphologie

Culot magnétique uniquement sur la face inférieure. Celle-ci peu convexe comporte peu de porosités, du reste millimétriques, et quelques incrustations de fragments de charbon de bois et de matières minérales. La face supérieure pratiquement plane est formée de deux strates différentes. La première est peu poreuse et peu accidentée. La deuxième, localisée à la périphérie par-dessus la précédente, est matérialisée par une fine pellicule poreuse avec des incrustations de matières végétales.

### Macrographie

La scorie a été tronçonnée longitudinalement. La section est homogène, hormis en partie centrale où se développe une zone fibreuse avec deux grosses cavités supérieures à 5 mm de diamètre. Le reste de la section est poreux, mais homogène avec des cavités ne dépassant jamais les 2 mm de diamètre et prenant des formes étirées ou, pour les plus petites, ovoïdales. Deux zones fibreuses sont agglomérées aux faces inférieure et supérieure. À cette échelle, aucun fragment métallique n'est visible.

### Micrographie

La section comporte une matrice fayalitique à lattes homogène renfermant un nombre très important de wustite sous forme globulaire et dendritique. Le culot présente une configuration similaire aux échantillons 2045.1, 2045.2, 2045.4 et 2045.6. Des fragments de charbon de bois sont visibles au milieu de la scorie, mais aucune bille de métal éclatée non réoxydée n'a été observée. D'une manière générale, le culot de forge concentre très peu de perte en métal, ce qui caractérise un travail standard de forge parfaitement maîtrisé.

### Conclusion

Cet échantillon témoigne d'un travail de forge maîtrisée et standardisé, axé sur la chauffe dans un environnement thermique moyen dont l'amplitude est petite. La présence de fragments de charbon de bois au centre du culot pourrait à nouveau signifier l'existence de phase de cémentation, mais l'absence de billes de métal éclatées non réoxydées tend à écarter cette hypothèse et à considérer plutôt une stratification associée à deux cycles distincts de forge. Ce culot ressemble aux échantillons 2045.1, 2045.2, 2045.4, 2045.6, 2085.2 et 2085.3.

## *Échantillon 2045.4*

### Métrologie

Masse (g) : 322
Longueur (mm) : 134
Largeur (mm) : 79
Épaisseur (mm) : 35
Rayon de courbure (mm) : 100

### Morphologie

Culot plano-convexe à la forme oblongue prononcée. Sa face inférieure peu magnétique possède quelques rares porosités millimétriques et des incrustations de fragments de charbon de bois et de matières minérales. Sa face supérieure, beaucoup plus magnétique, est formée à la périphérie et dans la partie effilée d'une zone poreuse et déchiquetée, avec quelques rares fragments de charbon de bois incrustés. La zone centrale est la plus magnétique. Elle est déchiquetée, à la limite de la morphologie coulée. Elle doit matérialiser l'endroit où débouchait l'air de la tuyère.

### Macrographie

La scorie a été tronçonnée longitudinalement. La section offre une grande homogénéité hormis en limite supérieure où la matrice est pratiquement fibreuse. La section plutôt poreuse concentre des cavités de formes variées : les plus petites sont rondes tandis que les plus allongées sont irrégulières. Deux cavités au milieu de la section se distinguent par leur grosseur (5 et 11 mm de long) et par leur orientation verticale qui indique un dégazage localisé. À la limite des faces inférieure et supérieure, les cavités allongées sont préférentiellement horizontales. À cette échelle, aucun fragment métallique n'est visible.

### Micrographie

Ce culot présente une matrice fayalitique à lattes homogène livrant beaucoup de wustite sous forme dendritique et globulaire. La configuration structurale est similaire aux échantillons 2045.3, 2045.6, 2085.2 et 2085.3, et tout particulièrement aux échantillons 2045.1 et 2045.2 puisqu'il renferme un nombre non négligeable de billes de métal éclatées non réoxydées (6 individus observés). Une zone livre également un cercle fin et parfait de wustite dont le cœur est constitué de fayalite comme dans l'échantillon 2045.1. Cette observation est anecdotique, mais elle révèle un caractère métallographique inconnu.

### Conclusion

Ce culot témoigne d'un travail de forge axé sur des cycles de chauffe maîtrisés et standardisés effectués sous des températures moyennes avec de petites amplitudes. La présence d'un nombre non négligeable de billes de métal éclatées non réoxydées indique le travail d'objets en acier, mais elle soulève également à nouveau le problème de l'existence de phases de cémentation, même si aucun fragment de charbon de bois n'a été observé dans la section. Ce culot ressemble aux échantillons 2045.3, 2045.4, 2085.2 et 2085.3 et plus particulièrement aux échantillons 2045.1 et 2045.2.

## *Échantillon 2045.5*

### Métrologie

Masse (g) : 204

Longueur (mm) : 74
Largeur (mm) : 65
Épaisseur (mm) : 25
Rayon de courbure (mm) : 90

**Morphologie**

Culot plano-convexe légèrement fragmentaire et peu magnétique (fig. 57). Sa face inférieure, peu accidentée, se caractérise par un semis de cavités d'environ 3 mm de diamètre principalement localisé à sa périphérie. La face supérieure est déchiquetée et très poreuse avec des cavités pouvant atteindre 5 mm de diamètre. L'axe de la tuyère ne peut pas être déterminé.

**Macrographie**

La scorie a été tronçonnée transversalement. La section s'organise en trois zones (fig. 57). Sur environ 1 cm, le bas du culot réunit de grandes lattes de fayalite verticales et enchevêtrées qui forment des cavités anguleuses, fines et verticales. Au milieu, une zone très homogène existe avec des porosités, soit rondes, soit allongées verticalement, ce qui indique un dégazage localisé. En limite supérieure, une zone plus poreuse est présente avec cinq porosités supérieures à 5 mm de côté, disposées plus ou moins horizontalement. À cette échelle, aucun fragment métallique n'est visible.

**Micrographie**

Ce culot est constitué d'une matrice fayalitique à pavés, en partie haute, et à lattes, en partie basse (fig. 57). La très grande dimension de ces dernières témoigne de phases de chauffe soutenues et élevées et d'un lent refroidissement. Les dendrites et les globules de wustite sont très peu nombreux, de la même manière que les pertes métallique qui sont pour la plupart non réoxydées, même en partie interne (anaérobiose). Il n'y a pas de battitures.

**Conclusion**

Ce culot se distingue de la majorité des échantillons par sa composition essentiellement fayalitique. Il présente très peu de wustite et aucune battiture. Toutefois, à la manière des échantillons 2085.1, 2085.2 et 2085.4, il contient des billes de métal éclatées non réoxydées. Sa composition majoritairement fayalitique pose le problème de l'utilisation d'ajouts siliceux et organiques, notamment dans la réalisation des soudures.

---

## *Échantillon 2045.6*

**Métrologie**

Masse (g) : 274
Longueur (mm) : 74
Largeur (mm) : 59
Épaisseur (mm) : 35
Rayon de courbure (mm) : 120

**Morphologie**

Culot plano-convexe épais qui dispose d'une face supérieure très magnétique. Elle est très peu poreuse et possède un aspect rugueux peu déchiqueté avec quelques rares incrustations de fragments de charbon de bois. Sa face inférieure très convexe n'est pas poreuse. Elle ne conserve pas d'incrustation particulière. Elle présente une surface très régulière et compacte.

**Macrographie**

La scorie a été tronçonnée longitudinalement. La section est très homogène mis à part en limite supérieure où se développe une zone plus fibreuse et compacte. Tout le reste est en revanche plutôt poreux avec des cavités, très fines ou très grosses (6 mm de diamètre) essentiellement rondes, localisées sans zonage particulier. À cette échelle, aucun fragment métallique n'est visible.

**Micrographie**

Au sein de la matrice fayalitique à lattes, la densité en globule et en dendrite de wustite est très importante, mais aucune perte en métal n'est visible. Tous les oxydes de fer proviennent des nombreuses pertes en battitures globulaires.

**Conclusion**

Cet échantillon témoigne d'un travail de forge maîtrisé et standardisé essentiellement axé sur la chauffe à des températures moyennes. Si on exclut l'absence de chutes métalliques, ce culot est très proche des échantillons 2045.1, 2045.2, 2045.3, 2045.4, 2085.2 et 2085.3.

---

## *Échantillon 2045.7*

**Métrologie**

Masse (g) : 144
Longueur (mm) : 92
Largeur (mm) : 80
Épaisseur (mm) : 34
Rayon de courbure (mm) : 100

**Morphologie**

Culot plano-convexe très peu magnétique. Une stratification est conservée sur ses côtés. Sa face inférieure est poreuse. Elle comporte beaucoup de cavités millimétriques et d'autres plus rares qui atteignent le centimètre. Toute la périphérie de cette face possède une morphologie coulée déchiquetée sans porosité. Celle-ci se retrouve également sur toute la surface supérieure.

**Macrographie**

La scorie a été tronçonnée longitudinalement. La matrice de la section est essentiellement constituée de matières minérales scorifiées. Cette structure, pratiquement amorphe et relativement homogène, est parsemée de cavités rondes pouvant atteindre 2 mm de diamètre. En partie basse, quatre porosités essentiellement horizontales se distinguent par leur grosseur (de 4 à 15 mm de côté). À cette échelle, aucun fragment métallique n'est visible.

**Micrographie**

Le culot est essentiellement constitué d'une matrice siliceuse hétérogène formée d'agrégats d'argile et de silice proche de l'amorphe. Il existe de très rares zones silicatées avec de la fayalite toujours sans wustite. Le métal se trouve sous la forme d'un semis épars de fragments et de billes non réoxydés (anaérobiose).

**Conclusion**

La structure essentiellement fayalitique de ce culot de forge pose la question de l'utilisation importante des ajouts minéraux dans les phases de soudure ou de trempe. La présence de

fragments et de billes non réoxydés sous-entend qu'il ne s'agit pas d'un fragment de paroi de forge détérioré et tombé dans le foyer.

## *Échantillon 2085.1*

### Métrologie

Masse (g) : 340
Longueur (mm) : 97
Largeur (mm) : 80
Épaisseur (mm) : 50
Rayon de courbure (mm) : 50

### Morphologie

Culot peu magnétique avec une face inférieure caractéristique couverte d'incrustations de fragments de charbon de bois. Sur un côté, un fragment de la paroi du foyer y est aggloméré. Sa face supérieure est concave. Elle renferme au centre une zone déchiquetée et coulée très dense. En périphérie la surface est moins accidentée, mais plus poreuse avec des cavités millimétriques. Le faciès de la partie centrale pourrait indiquer le lieu où débouchait l'air de la tuyère.

### Macrographie

Le culot a été tronçonné transversalement. Hormis quelques petites zones fibreuses en périphérie, la section du culot est hétérogène. Elle renferme deux parties différentes. La première s'étend en travers au milieu de la section et sur une petite partie de la surface supérieure. Elle est très dense. Il existe uniquement une porosité verticale de 13 mm qui indique un dégazage local important. La seconde concerne le reste du culot, c'est-à-dire quasiment toute la périphérie. Elle est beaucoup plus poreuse avec des cavités de formes généralement ovoïdales qui sont parfois plus anguleuses et plus allongées horizontalement. Dans cette zone se trouvent également quelques charbons de bois. Le fragment de paroi aggloméré à la scorie est visible en coupe à proximité de la zone compacte. À cette échelle, aucun fragment métallique n'est visible.

### Micrographie

Le culot possède un mélange de deux matrices distinctes isolées dans la description macrographique. La première correspond à la partie dense en macrographie. Elle est presque uniquement constituée de fayalite à lattes et à pavés de grandes dimensions, ce qui dénote une température élevée et un refroidissement lent avec faibles pertes en métal et en oxyde. Tout le reste correspond à la partie poreuse en macrographie. Il est constitué d'une matrice fayalitique plus hétérogène avec de la wustite sous forme dendritique en quantité moyenne. Des battitures en billes et globulaires y sont présentes à côté d'un semis métallique très épars et de rares chapelets métalliques plus fréquents en surface supérieure. Des fragments de charbon de bois sont également visibles dans cette matrice

### Conclusion

Ce culot caractérise un travail de forge avec peu de pertes en métal et en oxyde. Il montre donc l'importance des ajouts siliceux notamment dans les phases de soudure qui peuvent être associées à la présence de battitures billes. Ce culot ressemble beaucoup à l'échantillon 2045.5.

## *Échantillon 2085.2*

### Métrologie

Masse (g) : 364
Longueur (mm) : 100
Largeur (mm) : 95
Épaisseur (mm) : 62
Rayon de courbure (mm) : 50

### Morphologie

Culot possédant une face inférieure très convexe, magnétique et poreuse avec de nombreuses cavités millimétriques. De nombreuses incrustations de matières végétales et minérales y sont également présentes. La face supérieure, très peu concave, est très accidentée. Sur une moitié, la surface est essentiellement constituée d'incrustations de fragments de charbon de bois et de nombreuses petites porosités. De l'autre côté, la surface est totalement déchiquetée par les perturbations de l'air insufflé par la tuyère. La face supérieure est magnétique, uniquement en périphérie.

### Macrographie

Le culot a été tronçonné longitudinalement. La section est très hétérogène. Mis à part des fragments de paroi agglomérés à la surface inférieure, trois zones se distinguent de bas en haut. La première s'étend sur 15 mm de haut. Elle renferme une multitude de porosités de formes ovoïdales ne dépassant jamais 2 mm de diamètre dans une zone légèrement fibreuse. La seconde couvre tout le cœur du culot sur près de 2 cm. Plus dense et moins fibreuse que la précédente, elle renferme en revanche de très nombreux gros fragments de charbon de bois de 2 à 10 mm. La troisième zone forme une bande d'1 cm à la limite supérieure et le côté droit de la section où la tuyère débouche. Beaucoup plus poreuse et beaucoup plus fibreuse, elle concentre six grosses cavités de 10 à 40 mm formées par l'air de la tuyère au cours du dernier cycle de chauffe. Elle conserve également deux gros fragments de charbon de bois de 10 mm. À cette échelle, aucun fragment métallique n'est visible.

### Micrographie

La matrice fayalitique pavimenteuse est plutôt hétérogène, indépendamment du nombre de porosités et des zones distinguées en macrographie. Elle est constituée d'une très forte densité de globules de wustite principalement née de la dissolution de nombreuses grosses battitures globulaires dont certaines sont encore visibles. Le semis métallique partiellement ou totalement réoxydé à chaud est très épars. À côté des nombreux fragments de charbon de bois se concentrent des fibres végétales.

### Conclusion

Le culot est formé d'une succession de cycles thermiques sensiblement similaires, mais relativement peu élevés. Les travaux homogènes, mais fragmentés, sont caractérisés par de faibles chutes métalliques et de très nombreuses pertes en grosses battitures globulaires. Ce culot ressemble aux échantillons 2045.1, 2045.2, 2045.3, 2045.4, et 2045.6 et de 2085.3.

## *Échantillon 2085.3*

### Métrologie

Masse (g) : 140
Longueur (mm) : 75
Largeur (mm) : 56
Épaisseur (mm) : 30
Rayon de courbure (mm) : indéterminé

### Morphologie

Culot plutôt plat et très magnétique sur la face supérieure (fig. 58). Très homogène, il présente le faciès d'un « coup de chaud » en fin de cycle de forge, mais l'axe de la tuyère n'est pas déterminable. Sa face inférieure a un aspect coulé très déchiqueté sans porosité ni incrustation. Une légère stratification est visible sur un côté.

### Macrographie

La section du culot livre deux zones différentes. La zone inférieure est la plus poreuse sur une strate de 17 mm de haut (fig. 58). Elle concentre de nombreuses cavités millimétriques généralement ovoïdales et quelques-unes plus grosses et plus irrégulières. La seconde partie couvre toute la strate supérieure. Elle est très compacte, mais elle conserve localement quelques très fines porosités rondes et d'autres plus grosses toujours inférieures à 5 mm de diamètre. À cette échelle, aucun fragment métallique n'est visible.

### Micrographie

La matrice fayalitique à lattes est homogène. Elle contient des battitures globulaires véritablement énormes (supérieures à 1 mm) plus ou moins dissoutes dans la scorie sous la forme de globules de wustite (fig. 58). La frange supérieure possède uniquement des dendrites de wustite qu'il faut mettre en relation avec le faciès de « coup de chaud » observé. Les pertes en métal sont mineures et très peu réoxydées.

### Conclusion

Ce culot est issu d'un travail de forge axé sur la chauffe régulière et continue d'objets à moyenne température. Ces travaux occasionnent des pertes en métal mineures. Ce culot ressemble aux échantillons 2045.1, 2045.2, 2045.3, 2045.4, et 2045.6 et de 2085.2.

## *Échantillon 2045.9 (objet indéterminé)*

**Métrologie**

Masse (g) : 490
Longueur (mm) : 68
Largeur (mm) : 67
Épaisseur (mm) : 26

**Morphologie**

Élément métallique massif pratiquement carré qui présente un orifice circulaire de 9 mm de diamètre en son centre. Son épaisseur est régulière et importante. Toutes ses faces sont martelées et planes.

**Macrographie**

L'échantillon a été directement poli à partir d'une de ses grandes faces. Mis à part deux petites zones où se concentrent des porosités et des inclusions, le métal est très correctement aggloméré.

L'attaque au nital montre une structure hétérogène. Un quart de la section est constitué d'acier trempé à 0,7 % de carbone (martensite, bainite, troostite) à très gros et à très petits grains. Le reste est formé de ferrite. Entre ces deux structures, il existe par endroits une zone de transition avec un acier 0,4 % de carbone.

**Micrographie**

Mis à part 2 zones qui se distinguent par des porosités et des inclusions plus fréquentes, la propreté inclusionnaire de l'échantillon est très élevée et bien souvent équivalente à l'échantillon 2045.10. Ceci traduit une excellente épuration vu le volume de l'objet. Pourtant, l'observation porte sur la face la plus large qui conserve certainement le taux de compactage le moins élevé. Il ne subsiste pas de repli. La première zone, moins bien épurée, renferme des inclusions presque amorphes de formes plutôt anguleuses alignées le long de porosités. Elles pourraient être le reliquat de grains de sable jetés sur la pièce lors du forgeage pour limiter la formation d'oxyde. La seconde zone est caractérisée par des inclusions de formes plus rondes remplies de fayalite avec des globules de wustite qui pourrait correspondre à des reliquats de scorie de réduction. Il est difficile de déceler un sens de corroyage. Dans l'hydroxyde et dans le sédiment aggloméré, il existe des battitures lamellaires, globulaires et en billes et des fragments de charbon de bois.

L'attaque au nital permet de révéler une composition complexe composée de ferrite (environ 50 %) et d'acier plus ou moins carburé. Deux zones d'acier doivent être distinguées : l'une à 0,3 % et l'autre à 0,7 % de carbone entièrement trempée (martensite, bainite et troostite) où coexistent, de manière contiguë, des zones à très gros et à très petits grains. La zone trempée à très gros grains possède de nombreuses inclusions qui ont engendré un phénomène de précipitation. La zone à 0,3 % de carbone livre des structures la trempe qui indique que celle-ci a concerné tout l'objet. La limite entre les zones aciérées et ferritiques est douce. Ceci pourrait indiquer une décarburation périphérique importante, mais partielle car des zones carburées sont encore visibles en périphérie. Aucun écrouissage n'est présent.

**Conclusion**

Les analyses métallographiques ne permettent pas de préciser la fonction de la pièce qui se distingue par sa morphologie particulière : élément massif et carré percé à chaud en son centre. Elle est formée d'une masse de métal remarquablement épurée vu le volume de métal et la surface des zones carburées qui couvrent la moitié de la section. Un soin particulier a donc été apporté à son élaboration, ce qui sous-entend une utilisation particulière encore indéterminée.

---

## *Échantillon 2045.10 (plomb de chantier)*

**Métrologie**

Masse (g) : 54
Longueur (mm) : 36
Diamètre max (mm) : 26

**Morphologie**

Élément métallique bitronconique (fig. 60). L'une des extrémités est très effilée tandis que l'autre est plus trapue.

**Macrographie**

La pièce a été tronçonnée longitudinalement (fig. 60). La section révèle un métal parfaitement épuré et très homogène. Il ne subsiste à cette échelle aucune porosité ni aucune inclusion.

L'attaque au nital montre que la pièce est essentiellement ferritique. Il existe uniquement une fine zone aciérée qui couvre l'ensemble de la pointe effilée. Ceci semble être une cémentation volontaire.

**Micrographie**

La section de l'échantillon possède une qualité d'épuration réellement exceptionnelle (fig. 60). Une seule zone de très petite dimension concentre quelques petites inclusions fayalitiques alignées pouvant peut-être indiquer une soudure. Tout le reste de la section ne contient aucune porosité, aucune inclusion et aucun repli.

La section est principalement composée d'une structure très homogène de ferrite à petits grains, ce qui témoigne d'un martelage intensif. Aucun écrouissage n'est visible. Toutefois, la bordure de la pointe effilée présente une fine zone carburée à 0,1 % de carbone à laquelle est associée une zone de ferrite à gros grains. La recristallisation importante signifie certainement que la zone carburée est consécutive à une cémentation qui paraît volontaire et sélective. Les seules inclusions observées semblent liées davantage à des reliquats d'épuration qu'à une soudure.

**Conclusion**

La pièce jouit d'une épuration de qualité exceptionnelle alors que sa pointe la plus effilée a été légèrement cémentée pour lui conférer une plus grande dureté. C'est donc un objet de précision particulièrement soigné. Vu sa morphologie bitronconique, il pourrait peut-être s'agir d'un plomb utilisé avec un fil pour apprécier la verticalité notamment au cours des activités de construction. L'anneau ou le percement pour le fil a disparu avec la corrosion ou n'a pas encore été fabriqué.

## *Échantillon 2045.11 (fragment métallique cémenté)*

**Métrologie**

Masse (g) : 74
Longueur (mm) : 55
Largeur (mm) : 19
Épaisseur (mm) : 17

**Morphologie**

Pièce métallique en forme de léger croissant avec une épaisseur constante. Sa section centrale est pratiquement carrée. Elle s'amincit aux deux extrémités pour former de part et d'autre une sorte de biseau.

**Macrographie**

La pièce a été directement polie du côté où la forme en croissant se ferme afin que l'on puisse observer les extrémités biseautées. La section est donc composée de deux parties métalliques séparées au milieu par une zone hydroxydée. Celles-ci affichent des caractéristiques proches, mais la plus grosse conserve dans le cœur des inclusions plus importantes et plus nombreuses. Elles sont très écrasées horizontalement dans le sens du martelage.

L'attaque au nital détermine que la pièce est principalement constituée de ferrite, à l'exception d'une fine bande localisée dans chaque partie métallique du bord d'une des faces principales. Cette organisation atteste probablement un processus de cémentation volontaire. De part et d'autre de la zone hydroxydée, le métal ne montre aucune trace associée à la mise en forme.

**Micrographie**

La propreté inclusionnaire de l'échantillon est généralement très bonne. Deux types de zones peuvent être distingués. L'une est réellement d'une qualité d'épuration exceptionnelle équivalente à celle observée dans l'échantillon 2045.10. Elle couvre la majeure partie de la petite partie métallique et une importante surface de la plus grosse. L'autre zone comprend une plus faible propreté inclusionnaire avec des petites inclusions ovoïdes, de plus grosses écrasées avec ou sans wustite, et des micro-fissures pouvant être des décohésions intergranulaires. Il n'y a pas de repli. L'orientation des inclusions dans la partie métallique la plus grosse indique une direction préférentielle de corroyage dans le sens longitudinal. Le pourtour hydroxydé contient des agrégats argilo-sableux et quelques fragments de charbon de bois.

L'attaque au nital montre que la quasi-totalité de l'échantillon est constituée de ferrite équiaxe non écrouie. Une fine bande (1 mm maximum) localisée dans chaque partie métallique du bord d'une des faces principales est légèrement carburée (0,3 - 0,4 % de carbone). Sa position atteste un phénomène de cémentation. De chaque côté de la zone hydroxydée, aucune trace associée à la mise en forme (écrouissage, fibrage) n'est visible.

**Conclusion**

La fonction de la pièce ne peut pas être déterminée grâce aux analyses métallographiques qui, cependant, soulignent une nouvelle fois la qualité technique des forgerons autant dans les traitements mécaniques (épuration, mise en forme) du métal que dans leur traitement chimique (cémentation).

## *Échantillon 2045.12 (ciseau)*

### Métrologie

Masse (g) : 64
Longueur (mm) : 79
Largeur (mm) : 15
Épaisseur (mm) : 16

### Morphologie

Pièce métallique allongée dont la section parallélépipédique s'amincit progressivement d'une extrémité à une autre pour former un long biseau aigu (fig. 59). La pièce pourrait être un outil de taille type ciseau. Sa tête n'a pas d'écrasement consécutif au martelage.

### Macrographie

L'objet tranchant a été tronçonné longitudinalement de manière à ce que l'on observe le biseau. La section est très homogène (fig. 59). Elle livre une qualité d'épuration remarquable. Il subsiste uniquement quelques rares fines lignes d'inclusion.

L'attaque au nital révèle une structure homogène d'acier trempée sur un tiers de la longueur à partir de l'extrémité biseautée. Plusieurs soudures de corroyage sont visibles à proximité d'une soudure en gueule de loup dans le cœur de l'objet. Ce montage a été consolidé par l'assemblage de deux nouvelles fines feuilles par-dessus et par-dessous.

### Micrographie

L'échantillon possède une bonne qualité inclusionnaire. Il existe néanmoins quelques inclusions écrasées dans le sens longitudinal du corroyage remplies de fayalite et de globules de wustite (fig. 59). Deux replis, pratiquement fermés, sont également identifiés dans le cœur de l'objet. Des inclusions totalement amorphes et rectangulaires, forment une ligne discontinue ; elles sont vraisemblablement le reliquat de grains de sable ajoutés pour limiter la formation d'oxyde au niveau des soudures. Aucun vestige particulier n'est visible dans l'hydroxyde.

L'attaque au nital montre que l'objet est totalement constitué d'acier à très petits grains homogènes. Cette grande finesse structurale relève d'un martelage violent et intensif. Il n'y a pas d'écrouissage, ce qui indique une recristallisation finale. Sa composition chimique est homogène avec un acier entre 0,6 et 0,7 % de carbone localement eutectoïde vers l'extrémité de la tête. Par ailleurs, le tiers de l'extrémité biseautée est trempé (troostite). La limite est très nette, ceci suggère une trempe volontaire et sélective. Toutes les soudures, qu'elles soient de corroyage ou d'assemblage, sont de grande qualité. L'une d'elles forme d'ailleurs une double gueule de loup. Tous ces éléments abondent dans le sens d'un outil de haute qualité, aux propretés mécaniques exceptionnelles, réalisé avec une grande maîtrise technique.

### Conclusion

Cet outil dispose de qualités mécaniques réellement exceptionnelle (finesse des grains d'un acier fortement carburé, qualité et forme des soudures, homogénéité, trempe sélective du biseau). Elles permettent de suggérer que la pièce est un outil tranchant pratiquement terminé, de type ciseau. Il met aussi en évidence la qualité technique des forgerons autant dans les traitements mécaniques du métal (épuration, mise en forme) que dans les traitements thermiques (trempe) et l'utilisation d'ajouts (jet de sable).

## *Échantillon 2045.13 (outil tranchant)*

### Métrologie

Masse (g) : 66
Longueur (mm) : 55
Largeur (mm) : 24
Épaisseur (mm) : 18

### Morphologie

Pièce métallique allongée avec un côté élargi et biseauté. L'autre flanc est plat, la pièce possède donc un profil trapézoïdal. Il s'agit probablement d'un outil avec un large biseau évasé.

### Macrographie

La pièce a été tronçonnée transversalement de manière à ce que l'on observe le biseau. Il existe une très grosse inclusion (4x2 mm) au centre de la section. Elle est reliée à la pointe du biseau par une longue ligne d'inclusions et d'hydroxydes. Ceci signifie certainement que l'objet est formé d'une feuille repliée et soudée sur elle-même à l'aide d'ajouts siliceux destinés à limiter la formation d'oxyde.

L'attaque au nital indique que la section est principalement ferritique mis à part dans un angle de la « tête » de l'objet et localement le long d'une soudure de corroyage.

### Micrographie

La propreté inclusionnaire de l'échantillon est très moyenne et très inégale suivant les zones. Les inclusions peuvent être remplies de fayalite avec des globules et des dendrites de wustite ou conserver la forme et la structure amorphe du grain de sable. Il n'y a pas de repli. Le sens du corroyage est lié à la mise en forme de l'objet qui est fabriqué à partir d'une feuille repliée et soudée sur elle-même. L'inclusion centrale renferme plusieurs phases chimiques dont de l'amorphe issu des ajouts sableux.

L'attaque au nital montre que l'échantillon est majoritairement ferritique et non écroui. Il existe cependant deux petites zones aciérées. L'une se trouve dans un angle de la « tête » de l'outil. L'autre est localisée au milieu de l'échantillon le long d'une soudure de corroyage. Dans chacune de ces zones, l'acier forme un dégradé jusqu'à 0,6 % de carbone avec de la perlite globulaire. Il n'y a aucun traitement thermochimique du tranchant. De nombreuses lignes de corroyage sont visibles et confirment l'hypothèse selon laquelle l'outil est fabriqué à partir d'une feuille repliée et soudée sur elle-même. Cette soudure est visible de l'inclusion centrale à la pointe du biseau. Elle est localement mal assemblée

### Conclusion

Cet échantillon est un outil en cours de fabrication au large tranchant de type chasse (outil destiné à équarrir les blocs de pierre). Ses qualités mécaniques ne sont pas particulièrement élevées. Les soudures sont en effet localement mal réalisées alors que le tranchant est constitué d'un métal (ferrite) ductile et malléable qui s'émousse facilement sous les chocs. Néanmoins, il met en évidence la qualité technique des forgerons dans les traitements mécaniques (épuration, mise en forme) et l'utilisation d'ajouts (jet de sable).

# *II.3. La forge du relais routier d'*Ambrussum *durant le Haut-Empire (zone 9, Villetelle, 34)*

## PHASE D (25-50 AP. J.-C.) : DEMI-PRODUIT ET FRAGMENT DE BANDAGE

### *Échantillon 9799.1 (demi-produit)*

**Localisation**

Secteur : 12

**Métrologie**

Masse (g) : 404
Longueur (mm) : 110 à 118
Largeur (mm) : 20 à 55
Épaisseur (mm) : 14 à 20

**Morphologie**

Plaque métallique trapézoïdale avec une partie distale carrée de 12 mm de côté (fig. 70). L'autre extrémité est légèrement plus fine et beaucoup plus large. Il pourrait s'agir d'un demi-produit.

**Macrographie**

La plaque a été tronçonnée longitudinalement. La section s'affine progressivement vers l'extrémité la plus large (fig. 70). Sa majorité est homogène, mais l'extrémité qui forme la partie distale épaisse, possède de nombreuses porosités et/ou inclusions encore importantes aux multiples faciès d'écrasement. De l'autre côté, une soudure associée au repli de l'extrémité est présente.

L'attaque au nital indique que la majorité de la section est ferritique (75 %). Les zones aciérées se trouvent dans les deux extrémités et principalement dans celle ayant une propreté inclusionnaire médiocre.

**Micrographie**

L'échantillon livre une très bonne propreté inclusionnaire hormis dans l'extrémité la plus épaisse (fig. 70). Ici, les porosités sont nombreuses et les inclusions fayalitique plus rares. Certaines

présentent une légère réoxydation interne. Cette extrémité possède également de nombreux replis dont la morphologie témoigne d'un martelage important. Il existe donc un gradient d'épuration de la section la plus fine à la plus épaisse. Le pourtour oxydé comporte de probables battitures globulaires, un léger nappage de scorie et quelques charbons de bois. Ils font le lien entre le lieu d'enfouissement et le contexte de forge.

L'attaque au nital permet d'observer un beau phénomène d'écrouissage croissant vers l'extrémité de la section la plus fine qui est composée d'un acier à 0,2 %-0,3 % de carbone (10 % de la section). Aucune trace de tranchage à chaud ni de traitement thermique n'y est visible. La partie centrale de l'objet est majoritairement ferritique (75 % de la section). Toutefois, à la périphérie, quelques îlots épars plus carburés montrent une légère cémentation. La zone en cours d'épuration (dans l'extrémité la plus épaisse de la section) possède un acier à 0,8 % de carbone (15 % de la section) associée à la zone ferritique par une transition douce. Dans cette zone, la mauvaise épuration doit être mise en relation avec la présence d'acier eutectoïde très dur.

**Conclusion**

Le gradient d'épuration couplé à l'écrouissage du métal tend à prouver que le travail d'épuration et de mise en forme de la pièce est en cours d'achèvement et que les replis et les porosités de la partie la plus sale ne sont pas consécutifs à un réchauffement ou à un recyclage. Cette plaque est vraisemblablement issue d'un demi-produit en cours d'épuration issu d'un fragment de loupe.

## *Échantillon 9504.1 (fragment de bandage)*

**Localisation**

Secteur : 8

**Métrologie**

Masse (g) : 568
Longueur (mm) : 225
Largeur (mm) : 50 à 45
Épaisseur (mm) : 11 à 23

**Morphologie**

Plaque en fer allongée et massive avec un profil en demi-lune. Une des deux extrémités se termine en biseau simple (fig. 71). Il s'agit davantage d'une mise en forme par martelage que d'une tranche à chaud. Le tronçonnage de la pièce a révélé un œil de 13 mm de diamètre, percé en partie médiane à 3 cm de l'extrémité non biseautée.

**Macrographie**

Deux sections ont été prélevées. L'une longitudinale concerne l'extrémité biseautée sur 10 cm de profondeur, l'autre transversale a été prélevée à 3 cm de l'extrémité opposée (fig. 71).

***Section transversale du milieu de la barre***

La section en demi-lune est formée de deux parties métalliques séparées au milieu par un œil de 13 mm de diamètre légèrement évasé vers la face constituant la base de la demi-lune. Les deux parties métalliques ont une bonne propreté inclusionnaire. La plus grosse possède cependant une importante ligne d'hydroxyde qui doit probablement correspondre à une soudure mal réalisés.

De part et d'autre de l'œil, l'attaque au nital montre que la section est constituée d'au moins deux feuilles soudées l'une sur l'autre, notamment au niveau de la ligne hydroxydée qui correspond à une soudure mal assemblée. La feuille qui constitue la base de la demi-lune est aciérée tandis que l'autre est ferritique.

***Section longitudinale de l'extrémité biseautée***

A cette échelle, cette section possède une très bonne qualité inclusionnaire. Il subsiste uniquement une petite fissure périphérique qui doit probablement correspondre à une décohésion intergranulaire.

L'attaque au nital montre que la grande majorité de la section est ferritique. Elle est constituée d'au moins quatre feuilles soudées longitudinalement les unes sur les autres. Celle qui forme une partie de la base du biseau est carburée. Le biseau est également aciéré sur un peu moins d'un centimètre de profondeur, mais il semble s'agir ici d'une cémentation. La répartition structurale est donc identique à l'autre section.

**Micrographie**

***Section transversale du milieu de la barre***

Le métal possède une bonne propreté inclusionnaire, seul subsiste un semis de minuscules inclusions ovoïdales de 1 à 2 µm de diamètre (fig. 71). Il n'y a aucun repli. Dans une zone de soudure très hydroxydée, il existe de nombreux grains de sable, probablement jetés sur les surfaces à assembler pour limiter la formation d'oxydes. Aucun élément n'est présent dans l'hydroxyde périphérique.

L'attaque au nital indique que la section est majoritairement ferritique. Une feuille aciérée à 0,2 % de carbone constitue la base de la demi-lune de part et d'autre de l'œil. Elle est soudée à une feuille ferritique plus épaisse. D'un côté, la soudure est mal réalisée et renferme par conséquent une importante zone hydroxydée.

***Section longitudinale de l'extrémité biseautée***

Mis à part une zone de soudure centrale, la propreté inclusionnaire de la section est excellente (fig. 71). Il n'y a pas de repli. Il subsiste uniquement quelques micro-inclusions et micro-porosités. Une petite zone de décohésions intergranulaires est également visible en périphérie au milieu de la section. Dans la partie hydroxydée, il n'y a pas de nappage de scorie ni de battiture.

L'attaque au nital révèle une section essentiellement ferritique. Elle est formée d'un assemblage de plusieurs feuilles qui révèlent un corroyage important. Une feuille aciérée à 0,2 % de carbone forme une partie de la base du biseau. Ici, localement l'acier peut atteindre 0,3 % de carbone. Le biseau est également carburé avec 0,1 % de carbone, mais il semble s'agir ici d'un processus de cémentation. Le biseau possède aussi un léger écrouissage au niveau de la pointe.

**Conclusion**

Cette plaque métallique est probablement un fragment de bandage de roue. Le biseau semble avoir été réalisé pour préparer la soudure avec un autre morceau de bandage. La cémentation de cette zone pourrait alors être destinée à abaisser la température de fusion et ainsi faciliter l'assemblage. De l'autre côté, l'œil paraît être percé pour assurer le maintient de l'extrémité opposée. Le métal utilisé est de bonne qualité et les soudures relativement bien maîtrisées avec notamment l'utilisation de la technique du « jet de sable ». Le profil en demi-lune montre que la face qui forme de la base du biseau est vraisemblablement la partie interne du bandage. Dans ce

cas, les feuilles aciérées ne forment pas la bande de roulement. Cette échantillon se rapproche beaucoup des échantillons 9806.1 (phase C) et 9468.1 (phase A).

## PHASE C (50-75 AP. J.-C.) : UN DEMI-PRODUIT

### *Échantillon 9797.2*

**Localisation**

Secteur : 29

**Métrologie**

Masse (g) : 173
Longueur (mm) : 75
Largeur (mm) : 40
Épaisseur (mm) : 10

**Morphologie**

Petite plaque métallique parallélépipédique dont la périphérie hydroxydée ne permet pas l'observation précise des surfaces (fig. 84). Sa morphologie et sa masse pourraient évoquer un demi-produit.

**Macrographie**

La pièce a été tronçonnée longitudinalement (fig. 84). La section est essentiellement métallique. Une des faces est plus profondément attaquée par la corrosion. Elle pourrait être constituée d'acier. L'une des extrémités présente un effilement qui correspond probablement à une tranche à chaud suivie d'une rupture par pliage et torsion. De ce même côté, une petite échancrure témoigne probablement d'une soudure. À cette échelle, l'ensemble de la section possède une propreté inclusionnaire élevée.

L'attaque au nital indique que l'objet est constitué d'au moins six feuilles soudées les unes sur les autres. Comme cela a été suggéré avant l'attaque, la zone fortement pénétrée par la corrosion est une feuille d'acier, et l'échancrure remarquée à une extrémité correspond à une soudure mal réalisée. C'est cette feuille aciérée qui forme l'appendice résiduel de la tranche à chaud qui a ensuite été tordu et plié pour achever la séparation. C'est donc la présence d'acier plus dur qui semble avoir engendré ce problème de découpe.

**Micrographie**

La section présente une excellente propreté inclusionnaire (fig. 84). Dans le cœur, il subsiste uniquement quelques décohésions intergranulaires qui proviennent probablement d'une épuration incomplète. Des inclusions soit longitudinales soit ovoïdales sont remplies d'une matrice fayalitique avec des dendrites de wustite. Il n'y a pas de repli et, les battitures comme la scorie sont absentes de la zone hydroxydée périphérique.

L'attaque au nital révèle un métal hétérogène constitué de nombreuses feuilles. La majorité est formée de ferrite, mais l'une d'elle est aciérée à 0,5-0,6 % de carbone et localement à 0,8 %. Une cémentation volontaire ou involontaire est par ailleurs observable au niveau des soudures toujours parfaitement réalisées. L'extrémité effilée ne possède pas de trace d'écrouissage. Ceci confirme un débitage à chaud.

**Conclusion**

Cette petite plaque de métal a été débitée à chaud. Elle a donc été vraisemblablement utilisée comme demi-produit. Celui-ci n'est pas directement issu d'une loupe, mais il est formé de six feuilles dont l'une est aciérée. Cette composition a déjà été observée sur des fragments de bandage de roue. Par analogie, cette plaque pourrait donc être utilisée comme demi-produit dans la fabrication de fragment de bandage de roue.

## PHASE C (50-75 AP. J.-C.) : LES CULOTS DE FORGE

### *Échantillon 9754.1*

**Localisation**

Secteur : 25

**Métrologie**

Masse (g) : 78
Longueur (mm) : 58
Largeur (mm) : 48
Épaisseur (mm) : 24
Rayon de courbure (mm) : 28

**Morphologie**

Petit culot plano-convexe de forme oblongue. Il est surtout magnétique sur sa face supérieure qui est caractérisée par une surface dense et accidentée. Elle réunit uniquement trois porosités débouchantes. La face inférieure est sensiblement équivalente, mais les porosités y sont plus nombreuses et de manière générale plus petites.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné transversalement. La section est très hétérogène. Au centre et en haut, une large zone fibreuse renferme une inclusion de matières végétales et une grosse porosité horizontale (9 x 2 mm). Sur une bande de 8 mm de haut, la partie inférieure forme la zone la plus homogène avec des cavités ovoïdales de l'ordre du millimètre. Il n'y a pas de perte en métal visible à cette échelle.

**Micrographie**

En partie basse, la matrice fayalitique homogène possède davantage de globules de wustite que de dendrites. Quelques rares billes de métal forment un semis très épars plus ou moins réoxydé à chaud. Le petit nombre de battitures essentiellement globulaires est partiellement ou totalement dissout dans la scorie. Dans les ¾ hauts de la section, la structure est très hétérogène. Elle est formée d'une mélasse de fayalite et de matières végétales.

**Conclusion**

Si la première phase de forge que renferme ce culot traduit des cycles thermiques réguliers à basse température avec peu de pertes en métal et en oxyde, la seconde phase (plus importante) témoigne davantage de travaux hétérogènes associés à de nombreux ajouts organiques. Ces deux phases témoignent de travaux de forge de finition où parfois de nombreux ajouts sont utilisés.

## *Échantillon 9754.2*

**Localisation**

Secteur : 25

**Métrologie**

Masse (g) : 73
Longueur (mm) : 59
Largeur (mm) : 55
Épaisseur (mm) : 23
Rayon de courbure (mm) : 37

**Morphologie**

Petit culot plat de forme pratiquement ronde (fig. 81). Il est surtout magnétique sur sa face supérieure qui possède un aspect déchiqueté pratiquement coulé ne contenant que quelques minuscules porosités. Au centre, une cavité de 3 mm de diamètre se distingue. Elle indique le lieu où la tuyère débouchait. La face inférieure homogène est formée de trois grosses excroissances. Elle conserve du côté de la tuyère un gros fragment de paroi aggloméré. De l'autre côté, elle est largement poreuse avec des cavités de 2 à 3 mm.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement (fig. 81). Au centre, sur toute la longueur, il existe une longue porosité de 1 à 4 mm de haut qui divise le culot en deux phases distinctes, cependant homogènes et pratiquement similaires. Elles sont composées de porosités de 1 à 3 mm. Les petites sont toujours ovoïdes tandis que les plus grosses (moins nombreuses) prennent des formes déchiquetées. Parallèlement, la densité en porosité est plus importante dans la première phase. Il n'y a pas de perte en métal visible à cette échelle.

**Micrographie**

La matrice fayalitique est très homogène (fig. 81). Elle révèle une température de travail et de refroidissement très régulière. Elle contient beaucoup de globules et de dendrites de wustite ainsi qu'un très léger semis métallique peu réoxydé. Les battitures présentes sont essentiellement globulaires. En périphérie quelques fragments de charbon de bois sont visibles.

**Conclusion**

Ce culot est issu de deux phases de forge identiques espacées par un court intervalle. Elles sont caractérisées par des cycles thermiques moyennement élevés et homogènes où les pertes en oxyde sont relativement importantes par rapport aux chutes métalliques. Ce culot est très proche de l'échantillon 9754.1. Il caractérise une activité de forge de finition.

## *Échantillon 9770.1*

**Localisation**

Secteur : 13

**Métrologie**

Masse (g) : 195
Longueur (mm) : 73

Largeur (mm) : 70
Épaisseur (mm) : 30
Rayon de courbure (mm) : 43

**Morphologie**

Scorie en culot plano-convexe de forme ronde. La face supérieure est peu accidentée et très peu poreuse. Elle réunit cinq importantes porosités qui ne permettent pas de déterminer l'axe de la tuyère. La face inférieure possède sensiblement les mêmes caractéristiques. Elle présente néanmoins quelques cailloutis et quelques fragments de charbon de bois incrustés. Si la scorie est très dense, sa sensibilité magnétique se trouve principalement en périphérie.

**Macrographie**

Après tronçonnage, la section apparaît très homogène et assez peu poreuse. Les cavités sont pour la plupart ovoïdales et comprises entre 1 et 7 mm. Les plus grandes sont essentiellement verticales (dégazage). Il n'y a pas de perte en métal visible à cette échelle.

**Micrographie**

Le culot est composé d'une matrice fayalitique homogène avec de très nombreux globules et dendrites de wustite assez uniformément répartis. Il contient beaucoup de battitures globulaires et un semis métallique très épars parfois légèrement réoxydés à chaud. Quelques fragments de charbon de bois sont présents le long de la face inférieure.

**Conclusion**

Ce culot de forge est caractérisé par une succession rapide de cycles thermiques homogènes moyennement élevés où les pertes en oxyde sont relativement importantes par rapport aux chutes métalliques. Il est issu d'une activité de forge de finition.

---

## *Échantillon 9773.1*

**Localisation**

Secteur : 13

**Métrologie**

Masse (g) : 230
Longueur (mm) : 97
Largeur (mm) : 90
Épaisseur (mm) : 27
Rayon de courbure (mm) : 114

**Morphologie**

Culot très plat de forme pratiquement ronde. Sa face supérieure présente deux cavités allongées à angle droit qui indiquent la possible utilisation d'un double soufflet ou plus vraisemblablement un changement d'orientation du culot. Cette face possède un aspect pratiquement coulé, légèrement accidenté et très peu poreux. La face inférieure est également très peu poreuse et très peu accidentée. Du côté des tuyères, elle possède de nombreuses incrustations de fragments de charbon de bois. De l'autre côté, un fragment de paroi de forge est aggloméré à la scorie. D'une manière générale, ce culot est peu magnétique.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement. La section est hétérogène. Elle renferme notamment une cavité horizontale de 16 mm et d'autres grosses de 5 à 6 mm de côté très anguleuses et alignées horizontalement sur la précédente. Le reste est composé de porosités ovoïdales de l'ordre du millimètre. Il n'y a pas de perte en métal visible à cette échelle.

**Micrographie**

La matrice fayalitique est relativement hétérogène. Elle contient peu de wustite essentiellement sous la forme de dendrite. Elle renferme également un petit semis métallique peu réoxydé avec de nombreuses battitures globulaires et quelques autres lamellaires. Au centre de la section, le culot est très poreux et très hétérogène avec des vestiges de matières organiques.

**Conclusion**

La présence de deux axes de tuyère et de grosses porosités remplies de matières organiques au milieu de la scorie indiquent très probablement la présence de deux phases de travail espacées d'un court intervalle. Celles-ci sont caractérisées par une succession rapide de cycles thermiques homogènes et élevés où les pertes en oxyde sont relativement importantes par rapport aux chutes métalliques. Elles illustrent un travail de forge de finition.

---

## *Échantillon 9820.1*

**Localisation**

Secteur : 29

**Métrologie**

Masse (g) : 275
Longueur (mm) : 108
Largeur (mm) : 100
Épaisseur (mm) : 32
Rayon de courbure (mm) : 110

**Morphologie**

Culot convexe et concave possédant une forme pratiquement ronde. D'un côté, il dispose d'une petite excroissance triangulaire associée à des fragments de calcaire indiquant la zone de liaison avec la paroi du foyer. À cet endroit, un léger bourrelet révèle d'une part l'axe de la tuyère et d'autre part une scorification locale plus importante en fin de chauffe. La face supérieure est dense et peu accidentée. Une empreinte d'un élément plat de 4 mm d'épaisseur est visible sur cette face à côté d'incrustations métalliques. Un très net effilement de la scorie existe à l'opposé de la liaison avec la paroi du foyer. La face inférieure est très régulière et lisse. Il n'y a pas d'empreintes de fragments de charbon de bois. Le culot est fortement magnétique.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné dans le sens transversal. La section est peu poreuse et plutôt homogène. Les cavités se développent principalement en périphérie et dans la partie inférieure. Elles sont majoritairement ovoïdales et inférieures au millimètre. Si les plus petites sont principalement verticales (dégazage), les plus grosses (4 mm) sont plutôt horizontales. Il n'y a pas de perte en métal visible à cette échelle.

**Micrographie**

La section possède une structure fayalitique à lattes homogène avec des dendrites et des globules de wustite issus de nombreuses battitures globulaires. Les pertes en métal sont pratiquement inexistantes.

**Conclusion**

Ce culot est issu de cycles de forge homogènes réalisés à moyenne température. Ils ont engendré de très nombreuses pertes en oxyde, mais les chutes métalliques sont pratiquement inexistantes. Il est donc associé à des travaux de forge de finition.

---

## *Échantillon 9820.2*

**Localisation**

Secteur : 29

**Métrologie**

Masse (g) : 253
Longueur (mm) : 80
Largeur (mm) : 80
Épaisseur (mm) : 25
Rayon de courbure (mm) : 85

**Morphologie**

Culot pratiquement plat de forme ronde. Il est très dense et très magnétique. Sur sa face supérieure, une dépression de la périphérie vers le centre indique l'axe de la tuyère. Cette même face est par ailleurs très compacte, homogène et pratiquement plane. La face inférieure dispose des mêmes caractéristiques, mais elle possède en plus du côté de la tuyère des incrustations de matières végétales. Le reste possède localement des incrustations d'argile rubéfiée.

**Macrographie**

La section est stratifiée. À partir du fond, une strate très peu poreuse s'étend sur 7 mm haut avec de très petites cavités ovoïdes, verticales et millimétriques. Elles dénotent un dégazage important du bain de scorie liquide. Le haut de la section est formé d'une strate de 13 mm de haut, caractérisée par une forte densité de porosités avec des cavités plus grosses (de 1 à 12 mm de côté) et plus anguleuses, orientées de préférence horizontalement. Il n'y a pas de perte en métal visible à cette échelle. L'échantillon n'a pas été étudié à l'échelle microscopique car il ressemble beaucoup aux culots de la phase C déjà analysés.

**Conclusion**

Ce culot de forge est vraisemblablement très proche des autres culots de la phase C étudiés (9770-1, 9820-1, 9820-3, 9820-4 et de 9773-1). Il évoque au moins deux phases de travail en contexte de forge réalisées avec des températures relativement basses même si le dernier cycle paraît plus élevé.

## *Échantillon 9820.3*

**Localisation**

Secteur : 29

**Métrologie**

Masse (g) : 208
Longueur (mm) : 100
Largeur (mm) : 80
Épaisseur (mm) : 25
Rayon de courbure (mm) : 110

**Morphologie**

Culot plat de forme oblongue. Sa face supérieure est très accidentée, voir déchiquetée, avec de nombreux faciès coulés. Les quelques rares cavités sont supérieures à 5 mm de diamètre. Une grande dépression oblongue et longitudinale indique l'axe de la tuyère. Cette face est très peu magnétique. La face inférieure présente une sensibilité magnétique plus importante avec un aspect moins déchiqueté. Elle livre également quelques petites cavités et quelques incrustations de matières minérales et végétales.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné transversalement. La section est hétérogène, poreuse et stratifiée. Le bas du culot comprend de très nombreuses cavités ovoïdales d'environ 1 mm de diamètre. Le milieu et le haut de la section renferment de plus grosses cavités très anguleuses et irrégulières, parfois supérieures à 10 mm de côté, qui se développent de préférence horizontalement. Sur une fine épaisseur ne dépassant pas 4 mm, la surface supérieure apparaît en revanche très dense. Ceci est à mettre en relation avec la morphologie de cette face qui suggère un « coup de chaud » en fin de travail. Il n'y a pas de perte en métal visible à cette échelle.

**Micrographie**

La section possède une matrice fayalitique à petites lattes très homogène avec de nombreuses dendrites de wustite, pour certaines de tailles importantes, et quelques rares billes de métal isolées avec une faible réoxydation à chaud. Ces observations dénotent un travail générant de très faibles pertes en métal sous une température relativement élevée. La scorie étant liquéfiée, l'oxydation du métal est limitée par l'anaérobiose du milieu. Quelques battitures sous forme de billes sont présentes. Des fragments de charbon de bois sont localisés uniquement sur les bords.

**Conclusion**

Les observations macroscopiques et microscopiques indiquent un travail de forge très proche de ceux illustrés par les échantillons 9770.1, 9820.1, 9820.4 et 9773.1. Toutefois, les cycles thermiques sont ici plus élevés en température. Ceci n'a pas pour autant engendré des pertes métalliques ou des brûlures du métal importantes. Il faut noter la présence de battitures billes en nombre qui témoigne probablement de nombreuses phases de soudure. Ce culot ressemble particulièrement l'échantillon 9820.8.

## *Échantillon 9820.4*

**Localisation**

Secteur : 29

**Métrologie**

Masse g) : 264
Longueur mm) : 100
Largeur mm) : 85
Épaisseur mm) : 30
Rayon de courbure (mm) : 81

**Morphologie**

Culot pratiquement plat de forme oblongue. Sa face supérieure est en grande partie composée de cavités ovoïdales alignées sur l'axe longitudinal de la scorie (fig. 80). Ceci indique la direction de la tuyère. En périphérie, la scorie est poreuse avec des cavités de 1 à 3 mm. Cette face est relativement peu magnétique. La face inférieure est homogène, peu accidentée, mais poreuse. Elle possède quelques rares incrustations et de très petites cavités inférieures au millimètre. Elle est magnétique, surtout sur les bords.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné transversalement. La section est peu poreuse et homogène (fig. 80). Elle contient essentiellement des porosités ovoïdales millimétriques. Quelques-unes d'entre elles sont plus longues et verticales (dégazage). Les seules cavités importantes (11 x 5 mm) sont horizontales et se situent, en partie supérieure, juste sous la surface. Il n'y a pas de métal visible à cette échelle.

**Micrographie**

La matrice fayalitique à petites lattes du culot est homogène (fig. 80). Elle contient uniquement des petites dendrites de wustite, du reste en petit nombre. Les battitures majoritairement globulaires sont présentes essentiellement dans la partie supérieure et au centre du culot. Il n'y a pas de perte en métal.

**Conclusion**

Ce culot est issu de cycles thermiques très homogènes réalisés à moyenne température. Au cours des phases de chauffe les pertes en métal sont pratiquement inexistantes et les pertes en oxyde très peu nombreuses.

## *Échantillon 9820.5*

**Localisation**

Secteur : 29

**Métrologie**

Masse (g) : 133
Longueur (mm) : 75
Largeur (mm) : 72
Épaisseur (mm) : 35

Rayon de courbure (mm) : 60

**Morphologie**

Culot plano-convexe de forme triangulaire. Sa face supérieure est peu accidentée, très peu poreuse et très homogène. Elle est très peu magnétique contrairement à la face inférieure. Celle-ci est plutôt accidentée. Elle conserve en effet quelques cavités supérieures à 5 mm et quelques incrustations végétales et minérales.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement. La section est plutôt hétérogène et poreuse. Il existe en effet au centre une grosse cavité (32 x 11 mm) remplie de matières organiques qui signale probablement l'existence de deux phases espacées par un court intervalle. Ces deux phases sont sensiblement identiques. La phase inférieure contient de grosses cavités anguleuses (jusqu'à 6 mm de côté) qui se développent majoritairement verticalement (dégazage). La phase supérieure conserve des cavités ovoïdales généralement plus petites (de 1 à 6 mm). Il n'y a pas de perte en métal visible à cette échelle. L'échantillon n'a pas été étudié à l'échelle microscopique car il ressemble beaucoup aux culots de la phase C déjà analysés.

**Conclusion**

Ce culot évoque un travail de forge standard déjà mis en évidence dans les autres culots de la phase C étudiés. Il se distingue par sa constitution en deux phases sensiblement identiques espacées par un court intervalle.

---

## *Échantillon 9820.6*

**Localisation**

Secteur : 29

**Métrologie**

Masse (g) : 254
Longueur (mm) : 100
Largeur (mm) : 81
Épaisseur (mm) : 32
Rayon de courbure (mm) : 63

**Morphologie**

Culot pratiquement plat et très dense qui possède une forme oblongue. Sa face supérieure est relativement plane, peu accidentée et peu poreuse. Dans une extrémité, une zone perturbée à la morphologie coulée indique probablement le débouché de la tuyère. Ici, la scorie est plus épaisse. La surface est magnétique avec un point fort proche de l'arrivée de la tuyère. La face inférieure est peu poreuse. Elle possède des incrustations de matières végétales et quelques porosités millimétriques. En périphérie la surface est plus lisse avec quelques points de vitrification. Elle est globalement magnétique.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné transversalement. La section est homogène. Seule une grosse cavité (29 x 6 mm) horizontale et anguleuse se distingue en partie supérieure de l'ensemble. Les autres porosités sont rondes et millimétriques. Elles couvrent la totalité de la section. Il n'y a pas de

perte en métal visible à cette échelle. L'échantillon n'a pas été étudié à l'échelle microscopique car il ressemble beaucoup aux culots de la phase C déjà analysés.

**Conclusion**

La morphologie et la macrographique de ce culot n'ont pas de caractère discriminant susceptible de le différencier des autres culots de la phase C. Elles témoignent donc probablement d'un travail de forge standard et homogène, identique à celui observé dans la majorité des culots de la phase C.

---

## *Échantillon 9820.7*

**Localisation**

Secteur : 29

**Métrologie**

Masse (g) : 159
Longueur (mm) : 91
Largeur (mm) : 86
Épaisseur (mm) : 20

**Morphologie**

Culot plat et peu épais possédant une forme circulaire. Sa face supérieure est magnétique. Elle est en majorité constituée d'une morphologie coulée qui livre très peu d'aspérités et de porosités. Sa face inférieure est accidentée avec quelques cavités millimétriques. Elle possède de rares incrustations à l'exclusion d'une grosse empreinte de fragments de charbon de bois dans le fond. Cette face est également magnétique.

**Conclusion**

Le culot n'a pas été tronçonné. Il présente une morphologie très plate caractéristique de l'ensemble des culots répertoriés et étudiés appartenant à la phase C.

---

## *Échantillon 9820.8*

**Localisation**

Secteur : 29

**Métrologie**

Masse (g) : 182
Longueur (mm) : 83
Largeur (mm) : 80
Épaisseur (mm) : 60
Rayon de courbure (mm) : 68

**Morphologie**

Scorie plate constituée de deux culots distincts, légèrement décentrés. Le culot inférieur est très petit (42 x 30 x 16 mm), non magnétique et d'aspect coulé. Au-dessus, le second se développe de

manière décentré sous une forme beaucoup plus importante (84 x 76 x 30 mm). La jonction des deux culots est caractérisée par une grosse cavité transversale supérieure à 15 mm. La face supérieure du second culot est très accidentée. Elle renferme trois grosses cavités, supérieures au centimètre, situées dans une zone dense et perturbée. L'ensemble n'est pratiquement pas magnétique. Les faces inférieures du premier et du second culots sont très peu poreuses. Elles livrent quelques incrustations de matières végétales et minérales. Ces faces sont plus magnétiques.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné transversalement. La section révèle deux stratifications homogènes et similaires disposées côte à côte. Elles sont très denses. Il existe uniquement un semis épars de petites cavités ovoïdes. Le culot inférieur possède en partie supérieure une grosse porosité de 14 mm qui doit être associée à la jonction entre les deux culots, le deuxième venant localement recouvrir la première. Il n'y a pas de perte en métal visible à cette échelle. Le culot n'a pas été étudié à l'échelle microscopique étant donné qu'il est très proche de la majorité des scories étudiées pour la phase C.

**Conclusion**

L'aspect compact et dense du culot indique certainement une température élevée dans les deux phases constitutives de ce culot qui ressemble fortement aux autres scories étudiées de la phase C.

## PHASE C (50-75 AP. J.-C.) : LES OBJETS FABRIQUÉS

### *Échantillon 9797.1 (fragment de bandage)*

**Localisation**

Secteur : 29

**Métrologie**

Masse (g) : 68
Longueur (mm) : 105
Largeur (mm) : 25
Épaisseur (mm) : 8

**Morphologie**

Plaque régulière et allongée qui s'évase légèrement vers une extrémité arrondie. L'autre extrémité est rectiligne, sans marque de découpe. Les faces possèdent de nombreuses incrustations de cailloutis liées ponctuellement à de l'argile cuite.

**Macrographie**

La plaque a été tronçonnée longitudinalement. La section est totalement oxydée, elle n'a donc pas pu être étudiée.

**Conclusion**

Si cette plaque est totalement oxydée, dans le contexte du site, sa morphologie la rapproche d'un fragment de bandage de roue. Elle est sensiblement identique aux échantillons 9504.1 et 9806.1.

### *Échantillon 9797.3 (pieu)*

**Localisation**

Secteur : 29

**Métrologie**

Masse (g) : 182
Longueur (mm) : 140
Diamètre max. (mm) : 50
Diamètre min. (mm) : 5 à 10

**Morphologie**

Pieu massif de section circulaire. La tête forme un couronnement sur les trois-quarts de son pourtour, mais elle ne présente pas un faciès martelé. Elle possède plutôt un aspect brûlé avec une légère vitrification (abandon de la pièce dans le foyer ?).

**Macrographie**

Le pieu a été tronçonné transversalement au milieu de la tige. La section est totalement hydroxydée. Elle n'a donc pas pu être étudiée plus en avant. Néanmoins, la zone hydroxydée forme un cercle composé de porosités concentriques avec un noyau vide. Ceci suggère une fabrication par enroulement d'une feuille sur elle-même.

**Conclusion**

Pieu massif fabriqué par enroulement d'une feuille sur elle-même. Malgré sa grosseur, il avait donc un cœur vide relativement faible qui est à prendre en compte pour connaître son utilisation précise.

---

## *Échantillon 9806.1 (fragment de bandage)*

**Localisation**

Secteur : 29

**Métrologie**

Masse (g) : 113
Longueur (mm) : 113
Largeur (mm) : 29
Épaisseur (mm) : 11

**Morphologie**

Plaque métallique rectangulaire qui s'amincit progressivement vers une extrémité très légèrement plus large et arrondie (fig. 82). Les faces hydroxydées ne permettent pas l'observation précise des surfaces.

**Macrographie**

La plaque a été tronçonnée longitudinalement (fig. 82). La section est essentiellement métallique. Elle possède une propreté inclusionnaire élevée. Dans l'extrémité la plus mince, il existe une soudure longitudinale mal réalisée entre deux feuilles. Dans l'autre extrémité, proche d'une des surfaces, il existe une zone très localisée avec des inclusions fayalitiques dont une est très grosse et très écrasée. Le tronçonnage a révélé la présence d'un œil de 12 mm de diamètre sur l'axe médian à 22 mm de l'extrémité la plus épaisse. Il a ensuite été détruit par le polissage, il ne peut donc pas être observé à l'échelle micrographique.

L'attaque au nital révèle une constitution complexe d'au moins quatre feuilles superposées et soudées (fig. 82). Celles-ci sont essentiellement ferritique, mais l'une d'elles localisée au milieu est aciérée. C'est celle-ci qui est mal soudée à une autre ferritique dans l'extrémité amincie.

**Micrographie**

Le métal possède une très bonne propreté inclusionnaire et aucun repli (fig. 82). Il subsiste uniquement quelques micro-porosités et micro-inclusions fayalitiques. Quelques battitures plates sont présentes dans l'hydroxyde périphérique, mais il n'y a pas de scorie.

L'attaque au nital met en évidence plusieurs feuilles longitudinales soudées les unes sur les autres. L'essentiel de ces feuilles est constitué de ferrite, mais l'une d'elles localisée au milieu de cet assemblage est formée d'un acier à 0,3 % de carbone. D'une manière générale, les soudures sont

de très bonne qualité et correspondent probablement au corroyage initial du métal avant sa mise en forme.

**Conclusion**

Cette plaque percée d'un œil sur l'axe médian parait être un fragment de bandage de roue. L'amincissement d'une des extrémités pourrait être réalisé pour faciliter l'assemblage avec un autre fragment de bandage tandis que l'œil semble destiné à recevoir un clou ou un rivet pour maintenir l'autre extrémité comme dans l'échantillon 9504.1. Il faut noter que la feuille aciérée ne forme pas la bande de roulement, mais le cœur du bandage comme dans le demi-produit 9797.2. Cet échantillon ressemble également beaucoup aux échantillons 9504.1 (phase D) et 9468.1 (phase A).

## PHASE B (75-100 AP. J.-C.) : UN CULOT DE FORGE

### *Échantillon 9255.1*

**Localisation**

Secteur : 11

**Métrologie**

Masse (g) : 108
Longueur (mm) : 65
Largeur (mm) : 60
Épaisseur (mm) : 30
Rayon de courbure (mm) : 39

**Morphologie**

Culot plano-convexe pratiquement rond. La face supérieure est très perturbée. Elle comporte de nombreuses coulées de scorie parfois sous forme de grosses « bulles » vitrifiées et quelques grosses porosités débouchantes supérieures à 5 mm qui indiquent probablement le débouché de la tuyère. Elle est localement magnétique. La face inférieure est très peu magnétique. Elle a un aspect de scorie pratiquement coulée. Elle possède principalement des cavités d'environ 4 mm diamètre. Aucune incrustation n'est visible.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement. La section est hétérogène et poreuse. Elle renferme une majorité de petites cavités anguleuses de 2 mm de diamètre et, au milieu, six grosses porosités verticales d'une dimension variant entre 3 et 11 mm de côté. Ceci traduit un dégazage important dans une scorie à l'état liquide. Il n'y a pas de perte en métal visible à cette échelle.

**Micrographie**

La section possède une matrice fayalitique hétérogène à lattes et à pavés. Elle renferme uniquement des grandes dendrites de wustite issues de la dissolution d'une partie des nombreuses battitures globulaires encore visibles et de l'oxydation d'une partie d'un semis métallique épars.

**Conclusion**

Le culot de forge est très proche des échantillons étudiés pour les phases A et C. Il s'en démarque néanmoins par une présence plus importante de pertes métalliques et par l'existence de dendrites de wustite, corrélée à un abondant dégazage, qui suggère une température élevée. L'échantillon témoigne cependant d'un travail de forge relativement standard.

# PHASE A (125-150 AP. J.-C.) : LES CULOTS DE FORGE

## *Échantillon 9081.1*

**Localisation**

Secteur : 6-7

**Métrologie**

Masse (g) : 140
Longueur (mm) : 80
Largeur (mm) : 55
Épaisseur (mm) : 35
Rayon de courbure (mm) : 38

**Morphologie**

Culot plano-convexe de forme plutôt oblongue. L'une de ses extrémités possède une ancienne rupture qui pourrait correspondre à la zone de jonction avec la paroi du foyer. Aucune trace significative ne permet de déterminer l'axe de la tuyère. La face supérieure est accidentée et très dense. Il existe uniquement quelques porosités millimétriques et, au milieu, une cavité de 5 mm de diamètre. La face inférieure possède un aspect granuleux faiblement poreux. Elle comporte de nombreuses incrustations de fragments de charbon et d'argile rubéfiée. Ce culot est faiblement magnétique.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement. La section est homogène mis à part en limite supérieure où existe une zone légèrement plus fibreuse. Il existe d'ailleurs dans cette zone une grosse inclusion de charbon de bois et quelques autres minérales. Le reste de la section renferme de nombreuses porosités essentiellement ovoïdales et millimétriques. Au milieu, certaines d'entres elles sont verticales tandis qu'en partie supérieure, elles sont horizontales. Il n'y a pas de perte en métal visible à cette échelle.

**Micrographie**

La section renferme une structure fayalitique à lattes très homogène. La wustite existe essentiellement sous forme de dendrites. Elle est issue d'un semis métallique épars peu réoxydé, et de nombreuses battitures globulaires parfois dissoutes dans le bain de la scorie.

**Conclusion**

Ce culot témoigne de cycles de forge homogènes et standardisés réalisés sous des températures relativement élevées. Le travail est très proche de celui observé pour la phase C, à l'exception des pertes en métal ici légèrement plus importantes.

## *Échantillon 9081.2*

**Localisation**

Secteur : 6-7

**Métrologie**

Masse (g) : 148
Longueur (mm) : 75
Largeur (mm) : 70
Épaisseur (mm) : 35
Rayon de courbure (mm) : 36

**Morphologie**

Culot plano-convexe de forme plutôt oblongue. Sur la face supérieure une longue dépression se développe longitudinalement et indique l'axe de la tuyère. Cette face est par ailleurs très perturbée et très peu poreuse. La zone magnétique concerne surtout l'axe de la tuyère. La face inférieure est également peu poreuse, mais elle présente de multiples micro-reliefs qui lui confèrent un aspect granuleux. Aucune incrustation de fragment de charbon de bois ni de matière minérale n'est visible.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné transversalement. Deux parties distinctes sont observées dans la section. La première s'étend sur tout le pourtour inférieur de la scorie. Elle est constituée d'un semis très dispersé de porosités ovoïdales de 1 à 2 mm de diamètre. La seconde se trouve au centre de la scorie. Elle possède une structure très fibreuse et très poreuse avec de nombreuses grosses cavités anguleuses qui peuvent atteindre 20 mm de côté. Il n'y a pas de perte en métal visible à cette échelle. Vu les affinités morphologique et macrographique que ce culot possède avec les autres de la phase A et notamment avec le culot 9081.3, il n'a pas été étudié à l'échelle microscopique.

**Conclusion**

Ce culot témoigne de phases de forge hétérogènes conduites sous des températures peu élevées. D'après les éléments à notre disposition, cet échantillon trouve de nombreux points de comparaison avec l'échantillon 9081.3.

---

## *Échantillon 9081.3*

**Localisation**

Secteur : 6-7

**Métrologie**

Masse (g) : 167
Longueur (mm) : 80
Largeur (mm) : 55
Épaisseur (mm) : 25
Rayon de courbure (mm) : 99

**Morphologie**

Culot plat de forme oblongue. Son extrémité la plus épaisse a une ancienne cassure qui pourrait correspondre à la zone d'accroche avec la paroi du foyer de forge. Sa face supérieure est peu poreuse et peu accidentée. Elle dispose de quelques incrustations de cailloutis et de fragments de charbon de bois. Très peu magnétique, elle présente au centre une empreinte triangulaire isocèle (40 mm à la base et 40 mm de hauteur) qui pourrait être liée à un objet incrusté. La face inférieure est granuleuse, légèrement magnétique et un aspect sensiblement similaire à la surface opposée.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement. La section du culot est hétérogène. Localement, quelques zones plus denses présentent uniquement des petites porosités ovoïdales inférieures au millimètre, mais la majeure partie de la section est constituée d'une structure parfois fibreuse avec des grosses cavités horizontales (10 mm de longueur), le plus souvent anguleuses. Deux fragments de charbon de bois sont incrustés dans la surface inférieure. Il n'y a pas de perte de métal visible à cette échelle.

**Micrographie**

La matrice fayalitique à lattes et à pavés est hétérogène. Elle est nettement plus poreuse que dans les autres échantillons étudiés de la même phase. Elle contient de la wustite essentiellement sous forme de globules. Des battitures lamellaires et globulaires sont dispersées à côté d'un semis métallique épars en partie réoxydé.

**Conclusion**

Ce culot de forge propose des similitudes importantes avec l'échantillon 9081.2. Il représente des cycles thermiques hétérogènes peu élevés qui engendrent peu de pertes en oxyde et en métal.

---

## *Échantillon 9513.2*

**Localisation**

Secteur : 17

**Métrologie**

Masse (g) : 208
Longueur (mm) : 90
Largeur (mm) : 85
Épaisseur (mm) : 29
Rayon de courbure (mm) : 96

**Morphologie**

Culot plutôt plat de forme légèrement oblongue. Si la face supérieure est perturbée, il n'y a pas de trace évidente de la tuyère. Relativement plate, elle comporte de nombreuses porosités débouchantes, et quelques coulures de scorie en périphérie. La face inférieure est classique. Elle conserve une surface moulée légèrement convexe avec de nombreuses incrustions de matières minérales. La sensibilité magnétique du culot est plus importante sur la face inférieure.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement. La section est plutôt homogène. Des petites porosités ovoïdales et millimétriques sont très localement présentent dans la scorie. L'aspect poreux de la section provient uniquement de trois grosses cavités centimétriques horizontales localisées au centre de la section. Il n'y a pas de perte de métal visible à cette échelle.

**Micrographie**

A l'échelle microscopique, la scorie paraît plutôt homogène. La matrice fayalitique à lattes et à pavés contient peu de globules et de dendrites de wustite. Ils sont associés à un semis métalliques très épars partiellement réoxydés et à quelques battitures globulaires localisées sans zonage particulier.

**Conclusion**

Ce culot représente un travail de forge homogène réalisé sous des cycles thermiques moyennement élevés engendrant très peu de pertes en oxyde et en métal.

# PHASE A (125-150 AP. J.-C.) : LES OBJETS FABRIQUÉS

## *Échantillon 9103.1 (fragment de bandage)*

**Localisation**

Secteur : 7

**Métrologie**

Masse (g) : 311
Longueur (mm) : 135
Largeur (mm) : 40 à 65
Épaisseur (mm) : 12

**Morphologie**

Plaque métallique massive qui s'évase progressivement vers une extrémité biseautée (fig. 94). Un orifice quadrangulaire (œil) est percé dans la partie médiane de la pièce à 35 mm de l'extrémité opposée. Les deux faces sont sensiblement parallèles.

**Macrographie**

La plaque a été tronçonnée longitudinalement (fig. 94). La section présente deux zones métalliques séparées par un œil de 14 mm de côté qui a été percé à 35 mm de l'extrémité. Les deux parties métalliques offrent une très bonne propreté inclusionnaire à cette échelle. Il subsiste uniquement dans la grande partie métallique quelques lignes hydroxydées qui sont certainement des soudures localement mal assemblées. L'extrémité biseautée est très effilée. Elle semble avoir été mise en forme plus par martelage que par tranchage à chaud.

L'attaque au nital révèle 4 soudures longitudinales. La section est donc constituée de 5 feuilles assemblées les unes sur les autres. Si l'ensemble est essentiellement ferritique (70 % de la section), la section présente des zones aciérées qui couvrent la petite partie métallique présente d'un côté de l'œil et le bord de l'autre.

**Micrographie**

Globalement, il subsiste uniquement quelques rares porosités ovoïdales de 20 µm de diamètre et quelques inclusions contenant une matrice fayalitique avec des globules et des dendrites de wustite (fig. 94). Il est surprenant que celles-ci ne soient pas déformées alors que le métal est parfaitement épuré. Il pourrait s'agir d'un phénomène de corrosion postmoderne. Il n'existe pas de repli. Vu la morphologie des contours métalliques de l'œil, un double percement a été probablement effectué de part et d'autre de la pièce. Dans l'œil, beaucoup de petits fragments de silice sont présents. La pièce est fortement hydroxydée. Il n'y a pas d'enrobage de scories ni de battitures.

L'attaque au nital montre que la pièce est formée d'une accumulation de feuilles. La majorité de la partie métallique à l'extrémité biseautée est constituée de ferrite non écrouie avec quelques petites parties plus aciérées à 0,2 à 0,3 % de carbone notamment localisé à proximité de l'œil. Une très belle soudure de ferrite sur ferrite est présente au centre de la pièce. De l'autre côté de l'œil, où la petite section métallique est entièrement aciérée à 0,3 à 0,4 % de carbone. Les zones aciérées ne

correspondent pas à l'organisation en feuilles. Elles sont donc issues d'un processus de cémentation dont il est difficile d'attester qu'il soit volontaire. Aucun écrouissage n'est présent dans la pièce, ce qui indique une recristallisation après la mise en forme.

**Conclusion**

Cette plaque métallique est probablement un fragment de bandage de roue. Le biseau semble être réalisé pour préparer la soudure avec un autre morceau de bandage. De l'autre côté, l'œil semble être effectué pour assurer le maintien de l'extrémité opposée. Le métal utilisé est de très bonne qualité et les soudures sont très correctement maîtrisées. Si le métal est constitué d'un assemblage de feuilles, aucune d'elles n'est aciérée et ne forme une bande roulement plus dure. En revanche, la pièce a été localement cémentée. Le processus n'a pas gagné l'ensemble de la pièce comme cela était peut-être envisagé. Cette pièce ressemble beaucoup aux échantillons 9504.1 (phase D) et 9468.1 (phase A).

---

## *Échantillon 9468.1 (rondelle)*

**Localisation**

Secteur : 8

**Métrologie**

Masse (g) : 118
Diamètre (mm) : 50
Épaisseur (mm) : 6

**Morphologie**

Rondelle métallique de 50 mm de diamètre avec un œil central circulaire de 28 mm de diamètre.

**Macrographie**

La rondelle a été tronçonnée diamétralement. Les deux sections métalliques possèdent une bonne propreté inclusionnaire. Il subsiste uniquement des lignes hydroxydées longitudinales qui témoignent probablement de l'existence de soudures.

L'attaque au nital confirme que les lignes hydroxydées longitudinales sont des soudures. Des deux côtés, il existe en effet quatre feuilles assemblées les unes sur les autres. Toutes n'ont pas la même épaisseur. Une des feuilles centrales est très fine. Mis à part une feuille périphérique aciérée, les trois autres feuilles sont ferritiques.

**Micrographie**

La propreté inclusionnaire des deux sections métalliques est légèrement moins bonne que dans les autres échantillons examinés, mais elle demeure néanmoins correcte. Il n'y a pas de repli. Une zone présente des grosses inclusions fayalitiques avec des globules et des dendrites de wustite qui se retrouvent dans le reste des sections sous des formes globulaires plus petites. Des inclusions anguleuses, amorphes et alignées, témoignent d'ajouts sableux lors de la réalisation des soudures. Dans le pourtour hydroxydé des deux sections métalliques, il n'y a pas de vestige de battiture, ni de scorie ni de fragments de charbon de bois.

L'attaque au nital révèle des soudures de grande qualité réalisées par endroits avec des ajouts siliceux. Sur les quatre feuilles, trois sont ferritiques et non écrouies. La quatrième feuille est

constituée d'un acier à 0,3 % de carbone. Elle est localisée sur la même face de chaque côté de la section. La rondelle est, soit fabriquée par emboutissage d'une large plaque, soit construite par enroulement d'une fine plaque autour d'un mandrin. Vu la largeur de l'œil central et l'absence de déformation des lignes de soudure et des inclusions, il paraît probable qu'on employa la deuxième technique.

**Conclusion**

Rondelle métallique vraisemblablement fabriquée par enroulement d'une tôle autour d'un mandrin. Elle est constituée de quatre feuilles soudées les unes sur les autres à l'aide d'ajouts sableux. Une des feuilles périphériques à l'assemblage est aciérée peut-être pour durcir intentionnellement l'une des faces.

---

## *Échantillon 9513.1 (assemblage de tôle)*

**Localisation**

Secteur : 17

**Métrologie**

Masse (g) : 305
Longueur (mm) : 100
Largeur (mm) : 75
Épaisseur (mm) : 2 tôles de 5 mm

**Morphologie**

Large tôle métallique de 5 mm d'épaisseur ne présentant qu'un seul côté rectiligne. Le pourtour est très hydroxydé et renferme de nombreuses incrustations de battitures lamellaires, de matières minérales et végétales.

**Macrographie**

La tôle a été tronçonnée longitudinalement. La section est très hydroxydée. La partie métallique est donc très fine. Elle présente une bonne propreté inclusionnaire. Il subsiste uniquement des lignes hydroxydées longitudinales qui pourraient indiquer des soudures.

L'attaque au nital confirme que ces lignes hydroxydées sont des soudures longitudinales. Cette tôle est formée de deux feuilles ; dans un premier temps, repliées et soudées sur elle-même et, dans un deuxième temps, soudées l'une sur l'autre. L'une des deux feuilles est entièrement aciérée. Elle est d'ailleurs largement plus hydroxydée.

**Micrographie**

La propreté inclusionnaire est légèrement moins élevée que dans les autres échantillons étudiés, mais elle reste globalement correcte avec des inclusions allongées très déformées montrant l'intensité du corroyage. Il n'y a pas de repli. Dans les parties très oxydées, il existe de très nombreuses battitures majoritairement lamellaires. Elles sont associées à quelques rares zones de scorie et à de nombreux fragments de charbons de bois.

L'attaque au nital révèle une section constituée de deux structures différentes assemblées par une soudure longitudinale centrale. D'un côté, il existe une tôle ferritique non écrouie repliée et soudée sur elle-même. De l'autre côté de la soudure centrale, il existe une tôle également repliée

et soudée sur elle-même, mais qui possède une structure aciérée à 0,4 % de carbone. Les soudures ne sont largement hydroxydées.

**Conclusion**

Il s'agit d'un assemblage de tôles abandonné dans un contexte de forge. La mauvaise qualité des soudures a peut-être favorisé son abandon. Ceci ne peut être en aucun cas utilisé comme argument à l'encontre de la qualité du travail des forgerons car ce type de soudure est très difficile à réaliser, notamment sur des feuilles aussi fines qui peuvent très facilement brûler au feu. Même si cet assemblage de tôle ne correspond pas à un bandage de roue, il est intéressant de constater que des assemblages de feuille sensiblement identiques sont employés dans la construction de ces bandages.

---

## *Échantillon 9513.3 (outil plat tranchant)*

**Localisation**

Secteur : 17

**Métrologie**

Masse (g) : 202
Longueur (mm) : 113
Largeur (mm) : 90
Épaisseur (mm) : 11

**Morphologie**

Fine plaque métallique trapézoïdale possédant une grande extrémité droite et une petite extrémité légèrement arrondie.

**Macrographie**

La tôle a été tronçonnée longitudinalement. La section est très hydroxydée. La partie métallique est donc très fine (2 à 3 mm d'épaisseur). Elle s'amincit progressivement et légèrement vers le côté de l'extrémité rectiligne. Elles présentent une bonne propreté inclusionnaire. Il subsiste uniquement vers le milieu de la section une ligne hydroxydée quasi transversale qui pourrait indiquer une soudure.

L'attaque au nital confirme que cette ligne hydroxydée est une soudure en biseau entre une feuille aciérée et une feuille ferritique. Celle aciérée forme le côté de l'extrémité rectiligne sur 4 cm de profondeur.

**Micrographie**

D'une manière générale, la propreté inclusionnaire de l'échantillon est excellente hormis à l'approche des soudures de corroyage alignées dans le sens longitudinal où il existe quelques rares inclusions remplies de fayalite et de wustite. Dans les parties très hydroxydées périphériques, il existe de nombreux fragments de charbon de bois.

L'attaque au nital révèle une section constituée de deux feuilles différentes assemblées par une soudure en biseau vers le milieu de la section. Le côté à l'extrémité rectiligne est constitué d'une feuille aciérée entre 0,3 et 0,8 % de carbone. L'enrichissement en carbone est progressif, de la soudure à l'extrémité où l'acier est eutectoïde. Ceci pourrait correspondre à une cémentation

d'une feuille déjà en partie carburée. Les très petits grains présents dans l'extrémité montrent l'intensité du martelage. L'autre côté est formé d'une feuille ferritique très homogène à petits, gros et très gros grains équiaxes pouvant indiquer localement une chauffe à température élevée. L'assemblage par une soudure en biseau entre la tôle aciérée et celle ferritique n'est pas correctement réalisé.

**Conclusion**

La fabrication de cet objet témoigne de savoir-faire de grandes qualités. Il nécessite en effet une grande maîtrise pour épurer parfaitement la matière et pour mettre en forme cette fine plaque sur une épaisseur constante. Lors de l'amincissement d'une tôle, les inclusions peuvent fragiliser le métal et le casser. Le passage au feu est également délicat car les risques de brûlure sont très importants pour une aussi fine épaisseur. La mauvaise réalisation de la soudure en biseau entre les feuilles aciérée et ferritique a peut-être engendré l'abandon de la pièce. Ceci ne peut être en aucun cas utilisé comme argument à l'encontre de la qualité du travail des forgerons car ce type de soudure est très difficile à réaliser. Vu ses caractéristiques morphologiques et métallographiques, l'objet peut-être interprété comme un outil en cours de fabrication avec un tranchant droit et dur.

## *Échantillon 9513.4 (fragment de bandage)*

**Localisation**

Secteur : 17

**Métrologie**

Masse (g) : 149
Longueur (mm) : 173
Largeur (mm) : 42
Épaisseur (mm) : 15

**Morphologie**

Barre métallique peu épaisse très largement corrodée notamment en partie centrale. En 2001, elle avait été identifiée comme un fragment de bandage de roue.

**Macrographie**

La plaque a été tronçonnée longitudinalement. Une partie de l'échantillon a été détruit durant cette opération. L'observation porte uniquement sur la moitié la plus large de la barre. La section présente une partie métallique largement hydroxydée notamment sur un côté qui pourrait être de l'acier. La propreté inclusionnaire des zones métalliques est élevée.

L'attaque au nital confirme que le côté plus attaqué par l'hydroxyde est une feuille d'acier largement corrodée. Elle est soudée à trois autres feuilles ferritiques. La section est donc formée de quatre feuilles assemblées les unes sur les autres.

**Micrographie**

La propreté inclusionnaire de l'échantillon est élevée, mais il persiste le long des lignes de corroyage de très fines inclusions remplies de fayalite et de globules de wustite qui sont parfois en cours d'écoulement. Dans l'hydroxyde périphérique, il existe des grains de sables, des fragments de charbon de bois et des battitures principalement lamellaires, mais également globulaires.

L'attaque au nital montre que la section est constituée d'une superposition de quatre feuilles. Trois d'entres-elles sont ferritiques avec un grain équiaxe homogène, mais l'une d'elles, localisée en périphérie, est constituée d'un acier homogène à 0,5 % de carbone.

**Conclusion**

Si l'on considère l'identification de l'année 2001, il s'agit d'un fragment de bandage de roue. Cette caractérisation s'avère toujours d'actualité. Elle est corroborée par sa constitution de quatre feuilles superposées que l'on retrouve dans tous les autres fragments de bandage analysés. Il faut noter qu'ici la seule feuille aciérée forme une face du bandage, peut-être pour durcir la bande de roulement.

---

## *Échantillon 9513.5 (applique ou crochet)*

**Localisation**

Secteur : 17

**Métrologie**

Masse (g) : 102
Longueur (mm) : 139
Largeur (mm) : 14
Épaisseur (mm) : 11

**Morphologie**

Petite barre de fer de section rectangulaire recourbée à 90° sur une de ses extrémités. L'autre extrémité est légèrement effilée et forme une pointe.

**Macrographie**

La barre n'a pas été tronçonnée, elle a été directement polie à partir d'une des faces principales. La section ne possède pas une bonne propreté inclusionnaire. Il subsiste de très nombreuses inclusions écrasées longitudinalement. Leur alignement peut indiquer la présence de très nombreuses soudures de corroyage.

L'attaque au nital révèle une section uniquement ferritique, constituée d'une multitude de soudures longitudinales de corroyage.

**Micrographie**

La section présente une densité importante de grosses et de petites inclusions remplies d'une matrice fayalitique avec des globules et des dendrites de wustite. De petits replis sont également encore visibles. La qualité inclusionnaire de la section est donc médiocre. Dans l'hydroxyde périphérique, il existe des fragments de charbon de bois et quelques battitures.

L'attaque au nital révèle une section ferritique à grains de tailles très variables. D'une manière générale, au centre les grains sont plus petits qu'en périphérie. Il n'y a pas véritablement d'écrouissage, mais il est clair que la recristallisation de la ferrite n'est pas complète notamment en périphérie. Cette attaque dévoile également de très nombreuses lignes de soudure longitudinales de corroyage.

**Conclusion**

Cette petite barre métallique recourbée se distingue particulièrement du lot étudié par la qualité inclusionnaire très médiocre de son métal et par sa composition uniquement ferritique. S'il s'agit vraisemblablement d'un crochet ou d'une applique utilisée dans la construction ou dans les aménagements plus ou moins domestiques, il ne nécessite pas d'un métal de qualité.

## *Échantillon 9513.6 (ébauche d'un outil tranchant)*

**Localisation**

Secteur : 17

**Métrologie**

Masse (g) : 20
Longueur (mm) : 56
Largeur (mm) : 27
Épaisseur (mm) : 10

**Morphologie**

Petit barreau métallique (22 mm de long) de section rectangulaire (27 x 10 mm) qui présente une longue soie (34 mm de long) de section carrée (9 x 9 mm) qui se termine en pointe. L'ensemble est très corrodé. Les surfaces ne sont donc pas visibles.

**Macrographie**

La pièce n'a pas été tronçonnée. Elle a été directement polie à partir d'une des faces principales. La section est très largement corrodée. Les deux zones métalliques restantes possèdent une propreté inclusionnaire homogène de bonne qualité sans inclusion ni porosité.

L'attaque au nital révèle une section entièrement aciérée.

**Micrographie**

La propreté inclusionnaire des deux parties métalliques est globalement très élevée. Il persiste uniquement quelques rares alignements d'inclusions constituées de fayalite avec des globules et des dendrites de wustite. Dans l'oxyde périphérique de la section, il existe de nombreux fragments de charbon de bois et quelques battitures préférentiellement lamellaires.

L'attaque au nital montre que la section est constituée d'un acier à 0,3 % de carbone qui atteint progressivement en périphérie 0,6 % de carbone (ferrite aciculaire et perlite lamellaire et globulaire). Cette configuration indique qu'il s'agit probablement d'une cémentation volontaire ou involontaire. L'acier est toujours constitué de très petits grains, reliquats d'un martelage intensif.

**Conclusion**

La morphologie de la pièce et la qualité de la propreté inclusionnaire et de l'acier (petits grains d'acier entre 0,3 et 0,6 %) semblent indiquer qu'il s'agit d'un objet aux qualités mécaniques élevées, peut-être tranchant, qui pourrait probablement être emmanché.

# *II.4. La forge du chantier de construction du bâtiment A de l'îlot 12 d'*Ambrussum *dans le seconde moitié du IIe siècle (Villetelle, 34)*

## LES CULOTS DE FORGE

### *Échantillon 12214.1*

**Métrologie**

Masse (g) :106
Longueur (mm) : 54
Largeur (mm) : 52
Épaisseur (mm) : 30
Rayon de courbure (mm) : 27

**Morphologie**

Culot plano-convexe, de forme oblongue, surtout magnétique sur la face supérieure qui conserve un aspect peu accidenté et coulé avec quelques rares cavités débouchantes de l'ordre du millimètre. Une grosse porosité est localisée au milieu de cette face et indique probablement le lieu où la tuyère débouchait. La face inférieure est également peu accidentée. Elle a une empreinte de charbon de bois et quelques incrustations de matières minérales.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné transversalement. La section est plutôt homogène et dense à l'exclusion d'une grosse porosité débouchante d'1 cm de côté qui perturbe le milieu de la surface supérieure. Le reste de la section est très compacte. Quelques très fines porosités essentiellement verticales sont situées en partie inférieure tandis que sous la surface supérieure on trouve uniquement deux cavités horizontales de 5 mm. À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

**Micrographie**

Le culot possède une matrice homogène à grandes lattes de fayalite avec de la wustite uniquement sous forme dendritique. De très nombreuses petites battitures lamellaires et globulaires sont partiellement dissoutes dans la scorie. Quelques très grosses battitures globulaires possèdent encore la trace des plans de frappe sur un de leur côté. Le métal, principalement sous forme de

bille, est en revanche assez rare. De la magnétite ou de l'hercynite se trouvent dans l'extrémité la plus effilée de la section. Ces deux formes présentent le même aspect structural, mais elles ont des atomes en substitution de nature différente. Seule une micro-analyse permet bien souvent de lever le doute. Sa localisation en périphérie du culot dans un environnement riche en dendrites de wustite pourrait privilégier magnétite.

**Conclusion**

Ce culot est issu de cycles de chauffe élevés et homogènes qui sont associés à des phases de martelage de masses métalliques compactes déjà épurées. Cet échantillon ressemble beaucoup aux culots 12216.1 (première recharge), 12216.2, 12216.5, 12216.6 et 12304.3.

---

## *Échantillon 12216.1*

**Métrologie**

Masse (g) :1468
Longueur (mm) : 173
Largeur (mm) : 135
Épaisseur (mm) : 83
Rayon de courbure (mm) : 222

**Morphologie**

Très gros culot de forme oblongue. Sa face inférieure n'est pas magnétique. Elle est essentiellement constituée d'agglomérations et/ou d'incrustations de matières organiques et minérales. La face supérieure est beaucoup plus magnétique. Elle est très concave dans la moitié la plus large. Son aspect est peu poreux et peu accidenté. Les cavités (de 1 à 5 mm) se concentrent uniquement dans l'axe longitudinal de la scorie et indiquent la direction et le sens de la tuyère. Des fragments de charbon de bois recouvrent sporadiquement toute cette face, mais ils deviennent beaucoup plus fréquents vers l'extrémité la plus effilée.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné transversalement. La section est très hétérogène, mais une stratigraphie peut être dégagée de bas en haut. Au contact de la surface inférieure, des matières végétales et minérales s'étendent autour d'un gros caillou sur 1 à 2 cm. Ceci correspond certainement à un fragment de paroi aggloméré sous l'action de la chaleur. Le tiers inférieur de la section est formée d'une zone fayalitique très poreuse avec des cavités millimétriques et d'autres, plus rares, centimétriques, déchiquetées et horizontales. Les deux tiers supérieurs sont constitués d'une zone fibreuse, très poreuse, avec des cavités pouvant dépasser 25 mm, toujours irrégulières et parfois partiellement remplies de matières organiques. À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

**Micrographie**

A cette échelle, la section est également très hétérogène. La matrice fayalitique à pavés se trouve essentiellement dans le bas du culot. Elle réunit quelques dendrites de wustite et un semis métallique très épars. Les deux tiers supérieurs sont constitués d'une mélasse où sont principalement mélangés de la fayalite, des fragments charbon de bois et de l'argile rubéfiée. À la jonction de ces deux zones, on trouve de nombreux fragments de charbon de bois et quelques battitures lamellaires et globulaires.

**Conclusion**

Ce culot est issu de deux phases de forge distinctes et séparées par une interruption plutôt important. La première traduit un cycle de chauffe élevé associé à des travaux de martelage sensiblement identiques à ceux identifiés dans les autres culots étudiés. Dans un second temps, l'activité se tourne vers de nombreux cycles de chauffe à basses températures qui sont accompagnés d'importants ajouts organiques et minérales. La première phase de travail de ce culot ressemble beaucoup aux échantillons 12214.1, 12216.2, 12216.5, 12216.6 et 12304.3.

## *Échantillon 12216.2*

**Métrologie**

Masse (g) :228
Longueur (mm) : 91
Largeur (mm) : 78
Épaisseur (mm) : 25
Rayon de courbure (mm) : 100

**Morphologie**

Culot plano-convexe fragmentaire qui est surtout magnétique sur sa face inférieure. Globalement peu accidentée, celle-ci comporte des porosités millimétriques et de nombreuses incrustations de fragments de charbon de bois et de matière minérale. La face supérieure est pratiquement coulée. L'organisation du relief et la répartition des cavités montrent que la tuyère débouchait sur une des extrémités qui conserve un flanc abrupt ; la face d'accroche avec la paroi du foyer.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement. La section est très homogène. Les porosités sont peu nombreuses, toujours petites, ovoïdales et parfois verticales (dégazage). Elles sont plus fréquentes à l'extrémité où la tuyère débouchait. À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

**Micrographie**

La matrice fayalitique à petites lattes est très homogène. Elle comprend beaucoup de dendrites de wustite et de battitures globulaires essentiellement de petites tailles. Le semis métallique, parfois partiellement réoxydé à chaud, est surtout présent à la lisière de la surface supérieure. Les pertes ont donc eu lieu en fin d'opération. Deux fragments de charbon de bois se trouvent au milieu de la section.

**Conclusion**

Ce culot présente des cycles thermiques élevés, réguliers et homogènes qui s'accompagnent de nombreuses pertes en petite battiture globulaire, mais de très peu de chutes métalliques. Cet échantillon ressemble beaucoup aux culots 12214.1, 12216.1 (première recharge), 12216.5, 12216.6 et 12304.3.

## *Échantillon 12216.3*

**Métrologie**

Masse (g) : 238

Longueur (mm) : 96
Largeur (mm) : 82
Épaisseur (mm) : 30
Rayon de courbure (mm) : 95

**Morphologie**

Culot plano-convexe de forme oblongue surtout magnétique sur la face inférieure qui possède une morphologie accidentée avec de nombreuses porosités pouvant atteindre 5 mm de diamètre, et beaucoup d'incrustations de fragments de charbon de bois (fig. 129). La face supérieure est, soit constituée d'une surface très poreuse avec des cavités débouchantes pouvant atteindre le centimètre, soit coulée, rugueuse et dense.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement (fig. 129). La section est relativement homogène, mais l'on distingue deux types de structure. Tout le corps de la section est formé d'une matrice très compacte et homogène composée essentiellement de fayalite. Quelques porosités, parfois supérieures à 2 mm, se développent de préférence verticalement et indiquent un dégazage important, également visible dans deux grandes cavités de 15 mm débouchant à la surface supérieure. La section est légèrement plus poreuse sur les flancs et le long de la limite inférieure. En son milieu, un gros morceau d'acier hydroxydé de 13 x 18 mm (*Cf. supra*) est entouré de fragments de charbon de bois.

**Micrographie**

La matrice est essentiellement constituée de fayalite à lattes très faiblement chargée en wustite qui se situe essentiellement dans le liseré inférieur du culot sous la forme de dendrite (fig. 129). De l'hercynite ou de la magnétite dont également présentes en très faible quantité. Ces deux formes présentent le même aspect structural, mais elles ont des atomes en substitution de nature différente. Seule une micro-analyse permet bien souvent de lever le doute. Il pourrait probablement s'agir d'hercynite puisque le culot, essentiellement fayalitique, contient probablement de l'alumine issu de nombreux ajouts argilo-sableux. Les battitures lamellaires et globulaires sont généralement de tailles assez modestes. Au milieu de la section, il subsiste un fragment complètement hydroxydé qui était certainement à l'origine de l'acier compte tenu du faciès d'oxydation.

**Conclusion**

Ce culot se distingue des autres déchets de forge étudiés par sa composition essentiellement fayalitique. Il témoigne de l'utilisation importante d'ajouts sableux dans certaines phases de travail. Par ailleurs, la perte d'un gros morceau d'acier dans un bain de scorie très faiblement chargé en oxyde et en pertes métalliques montre certainement le travail de ce type de métal.

---

## *Échantillon 12216.4*

**Métrologie**

Masse (g) : 60
Longueur (mm) : 51
Largeur (mm) : 38
Épaisseur (mm) : 21
Rayon de courbure (mm) : 70

**Morphologie**

Culot plutôt plat de forme oblongue. Il est surtout magnétique sur sa face inférieure qui réunit quelques porosités et plusieurs incrustations de fragments de charbon de bois et de matières minérales. La face supérieure comporte un aspect dense, pratiquement coulé, déchiqueté et rugueux.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement. La section est très poreuse, mais elle comporte une structure homogène. Les cavités se trouvent principalement dans la partie basse de la section sous des formes très allongées et horizontales. L'une d'elles se distingue en s'étendant sur les ¾ de la largeur du culot (30 x 4 mm). Sur 5 mm, le haut de la section est plus dense, mais il inclut également des cavités pour la plupart millimétriques. À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

**Micrographie**

La matrice est homogène. Elle est composée de fayalite à lattes très fortement chargée en globules de wustite. Les dendrites sont plutôt rares. Quelques billes métalliques réoxydées à chaud sont présentes à côté de métal à l'état pâteux, déformé par la croissance des globules de wustite. Toutefois, si ces dernières pertes sont plus massives que dans les autres culots, elles demeurent globalement peu importantes. Aucune battiture n'est visible.

**Conclusion**

Ce culot se distingue du lot analysé par l'absence de battiture. Pourtant, une partie de la wustite doit provenir de ces oxydes probablement entièrement dissouts dans la scorie. L'autre spécificité de ce culot vient de la relative importance des pertes métalliques visibles sous la formes de billes plus ou moins réoxydées à chaud et déformées. Elles sont tombées dans un bain de scorie qui témoigne de cycles thermiques réguliers, homogènes et moyennement élevés.

---

## *Échantillon 12216.5*

**Métrologie**

Masse (g) : 30
Longueur (mm) : 36
Largeur (mm) : 29
Épaisseur (mm) : 17
Rayon de courbure (mm) : 19

**Morphologie**

Petit culot de forme oblongue dont la face inférieure est très convexe. Cette dernière est très magnétique, très dense et sans incrustation. La face supérieure est plane, mais elle renferme de nombreuses porosités millimétriques et des incrustations de fragments de charbon de bois et de matières minérales.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement. Une sorte de micro-culot est agglomérée sur sa face inférieure. La structure de la section est très homogène, mais la répartition des porosités forme deux zones distinctes. Les trois quarts de la largeur sont constitués de porosités plutôt déchiquetées essentiellement comprises entre 2 et 4 mm. Le tiers restant est plus dense avec des

porosités n'excédant pas le millimètre. Entre ces deux zones, il existe une partie très compacte sans cavité. À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

**Micrographie**

La matrice fayalitique à grandes lattes est très homogène. Elle comporte énormément de wustite globulaire et dendritique. Le semis métallique est en revanche très peu répandu comme les battitures qui n'ont livré qu'un seul exemplaire (battiture globulaire).

**Conclusion**

Ce culot se distingue du lot analysé par l'absence de battitures. Toutefois, la densité importante de wustite témoigne probablement de leur dissolution massive dans le bain de scorie. Le culot résulte de cycles de forge réguliers, standardisés et homogènes, pratiqués sous des températures relativement hautes. Cet échantillon ressemble beaucoup aux culots 12214.1, 12216.1 (première recharge), 12216.2, 12216.6 et 12304.3.

---

## *Échantillon 12216.6*

**Métrologie**

Masse (g) : 36
Longueur (mm) : 36
Largeur (mm) : 34
Épaisseur (mm) : 19
Rayon de courbure (mm) : 24

**Morphologie**

Petit culot de forme ronde possédant une face inférieure très convexe et peu poreuse avec quelques incrustations de fragments de charbon de bois et de matières minérales. La face supérieure est convexe, dense et localement coulée. Ce culot est uniformément magnétique.

**Macrographie**

La section est homogène, hormis en périphérie où elle est localement fibreuse. Les porosités s'étendent principalement au milieu de la section. Elles sont essentiellement millimétriques et ovoïdales, mais neuf d'entres elles sont comprises entre 2 et 5 mm. À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

**Micrographie**

La matrice fayalitique à petites lattes présente beaucoup de wustite essentiellement sous la forme globulaire. Elle est homogène au centre du culot, mais en périphérie elle devient un peu plus hétérogène. Dans cette dernière zone, il existe quelques battitures principalement lamellaires. Les pertes de métal sont très faibles.

**Conclusion**

Le culot correspond à quelques cycles thermiques de forge peu élevés et homogènes qui s'accompagnent de très peu de chutes métalliques et d'importantes pertes en oxyde pour l'essentiel dissoutes dans le bain de scorie. Cet échantillon ressemble beaucoup aux culots 12214.1, 12216.1 (1ère recharge), 12216.2, 12216.5 et 12304.3.

## *Échantillon 12304.1*

**Métrologie**

Masse (g) : 178
Longueur (mm) : 80
Largeur (mm) : 50
Épaisseur (mm) : 18
Rayon de courbure (mm) : 78

**Morphologie**

Culot plat de forme oblongue. La face inférieure est pratiquement coulée. Elle n'a pratiquement aucune porosité, mais en revanche elle possède deux grosses empreintes de matières minérales et végétales. La face supérieure est très peu poreuse, mais rugueuse. Elle comporte une zone plus accidentée, très localisée sur l'extrémité la plus large du culot où se trouvent également des cavités très ouvertes, supérieures à 5 mm, reliquat du lieu où débouchait l'air de la tuyère. Ce culot est très peu magnétique.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné transversalement. La section est très homogène. Les porosités sont toujours inférieures au millimètre et rondes. Une seule, très fine, s'étend verticalement sur 10 mm de haut, ce qui signifie un dégazage important. La surface supérieure est constituée d'un très léger liseré plus hétérogène inférieur au millimètre. À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

**Micrographie**

La matrice fayalitique est homogène. Elle inclut beaucoup de wustite principalement sous la forme globulaire. Les battitures, de manière générale, peu fréquentes, sont essentiellement globulaires. Quant au métal réparti dans un semis épars, il est partiellement ou totalement réoxydé à chaud.

**Conclusion**

Ce culot témoigne d'un travail de forge homogène caractérisé par des cycles très réguliers qui engendrent très peu de pertes en métal. La présence, même minoritaire, de battitures globulaires et l'important nombre de globules de wustite suggèrent qu'il s'agit d'une activité de chauffe ordinaire souvent mise en évidence dans cette série d'échantillons.

## *Échantillon 12304.3*

**Métrologie**

Masse (g) : 126
Longueur (mm) : 60
Largeur (mm) : 51
Épaisseur (mm) : 36
Rayon de courbure : angle à 125°

**Morphologie**

Culot très peu magnétique qui possède une double stratification sur un flanc. Sa face inférieure comporte un aspect coulé, déchiqueté et dense, sans empreinte. La face supérieure est également

déchiquetée et pratiquement coulée. On ne peut cependant pas déterminer le lieu où débouchait la tuyère.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement. Les deux culots ne sont pas superposés, mais juxtaposés. Tous les deux sont très homogènes et identiques. Pratiquement toutes les porosités sont de l'ordre du millimètre et rondes. Le culot le plus massif possède néanmoins, en partie haute et en partie basse, deux grandes cavités qui s'étendent horizontalement sur environ 18 mm de long et 3 mm de haut. À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

**Micrographie**

La matrice fayalitique à lattes est très homogène. Elle renferme des globules et des dendrites de wustite en quantité moyenne. Un semis très épars de métal, plus ou moins réoxydé à chaud, se trouve à côté de battitures préférentiellement globulaires parfois très grosses et souvent diluées dans la scorie. Des fragments de charbon de bois se retrouvent sur les flancs du culot à proximité de la surface supérieure.

**Conclusion**

Les deux culots superposés sont très homogènes et similaires. Ils illustrent parfaitement l'homogénéité et la régularité des phases de forge réalisées dans cette zone du site d'Ambrussum. L'existence de battitures uniquement globulaires très largement diluées dans la scorie, et la faible fréquence des pertes métalliques suggèrent une activité de chauffe très régulière parfaitement maîtrisée à l'image de ce qui a déjà été mis en évidence dans les autres échantillons analysés. Cet échantillon ressemble beaucoup aux culots 12214.1, 12216.1 (1ère recharge), 12216.2, 12216.5 et 12216.6.

## *Échantillon 12214.2 (outil tranchant)*

### Métrologie

Masse (g) : 66
Longueur (mm) : 55
Largeur (mm) : 39
Épaisseur (mm) : 15

### Morphologie

Élément métallique trapézoïdal qui comporte une large extrémité avec un biseau effilé légèrement convexe (fig. 128). L'autre côté est difficilement visible à cause des nombreuses concrétions de sédiments agglomérés qui s'étendent aussi sur une des grandes faces.

### Macrographie

La pièce métallique a été tronçonnée longitudinalement (fig. 128). La section est essentiellement métallique. Elle possède une très bonne propreté inclusionnaire. Elle forme une sorte de « V » dont la pointe est le biseau. Une soudure hydroxydée montre que les deux branches de ce « V » sont deux feuilles assemblées à mi-hauteur. Un logement est ainsi réservé pour un autre morceau de métal. Il est aujourd'hui comblé par le sédiment du lieu d'abandon. Le contour du métal est par endroits largement hydroxydé.

L'attaque au nital confirme que cette pièce métallique est fabriquée à partir de 2 feuilles soudées. Celles-ci sont essentiellement aciérées, mais une zone ferritique s'étend sur tout le pourtour de l'objet. Sa localisation indique qu'elle est probablement issue d'une décarburation périphérique.

### Micrographie

La propreté inclusionnaire de la section est dans l'ensemble bonne, mais des porosités très allongées demeurent visibles (fig. 128). Elles sont alignées dans le sens longitudinal du corroyage. Des grains de sable sont également observés dans ces lignes. Ils témoignent probablement de l'utilisation de sable pour réaliser les soudures. Une zone présente des décohésions intergranulaires probablement dues à un phénomène de fatigue mécanique dans des zones aciérées. Dans l'hydroxyde périphérique et dans le sédiment aggloméré, on trouve des battitures lamellaires mêlées à des fragments de charbon de bois et à du sable.

L'attaque au nital révèle des lignes de corroyage longitudinales et montre que les deux feuilles sont constituées d'un acier à 0,6 % de carbone décarburé jusqu'à la ferrite en périphérie. La taille des grains ne révèle pas de traitement particulier type écrouissage.

### Conclusion

La présence de nombreuses battitures plates dans l'oxyde périphérique de l'échantillon montre bien que l'environnement d'abandon de l'objet est lié à un contexte de forge où des éléments plats étaient travaillés. L'intensité du martelage, visible dans le corroyage et la morphologie générale de la pièce, indique qu'il y avait un véritable désir de fabriquer un tranchant dans un matériau dur, largement constitué d'acier. Toutefois, l'objet a été abandonné ou perdu peut-être à

cause de la soudure mal réalisée entre les deux feuilles et/ou à la suite de la décarburation périphérique trop importante. Cet objet était probablement destiné à être un outil tranchant formé à partir d'une soudure en gueule de loup.

# *II.5. Les forges de l'agglomération perchée du Roc de Pampelune (Argelliers, 34) au VI^e^ siècle*

## BÂTIMENT 1L : UN FRAGMENT DE LOUPE EN COURS DE COMPACTAGE

### *Échantillon 1176-1*

**Métrologie**

Masse (g) : 190
Longueur (mm) : 75
Largeur (mm) : 52
Épaisseur (mm) : 27

**Morphologie**

Masse informe métallique partiellement enrobée de scorie (fig. 113). Elle possède une petite surface plane qui pourrait être une zone de frappe. Le reste du pourtour est constitué d'un relief aux contours courbes sans porosité. Aucune incrustation n'est visible.

**Macrographie**

La pièce de métal a été tronçonnée longitudinalement (fig. 113). La section est un gros morceau métallique qui renferme principalement dans les extrémités de très nombreuses porosités et inclusions toujours très écrasées et allongées pouvant atteindre 10 mm de long. Toute la masse métallique est enrobée de scorie.

L'attaque au nital montre que l'ensemble de la section est aciéré. Les zones centrales contiennent entre 0,7 et 0,8 % de carbone (40 % de la section) tandis que les zones périphériques ont entre 0,3 % et 0,6 % de carbone (60 % de la section). Cette organisation structurale pourrait traduire une décarburation périphérique.

**Micrographie**

La section est constituée de métal enrobé d'une matrice fayalitique avec des dendrites de wustite (fig. 113). La réoxydation externe du métal ne paraît pas très importante. Un léger liseré de wustite irisé sous la forme de globule est en effet ponctuellement visible sur le pourtour de la masse métallique. Dans les zones métalliques les plus denses, de nombreux replis sont présents

sous de multiples formes, de la plus ouverte à la plus fermée. Ils dessinent parfois des filaments agglutinés. Par rapport au nombre de porosité, les inclusions sont minoritaires. Celles-ci sont majoritairement remplies de fayalite et de wustite sous forme globulaire et dendritique. Certaines zones comprennent des micro-inclusions amorphes. Dans la périphérie, de nombreux chapelets d'inclusions forment des zones d'agglomération métallique incomplète. Beaucoup de fragments de charbon de bois sont visibles, notamment dans le cœur de la section. En revanche, aucune battiture n'a été observée. Aucun filament concentrique métallique n'est visible autour des porosités, ce qui démontre que l'échantillon n'a pas de relation directe avec un contexte de réduction.

L'attaque au nital montre que l'échantillon est principalement constitué d'un acier eutectoïde, partiellement décarburé autour des porosités internes et dans pratiquement toute la périphérie de la section. Localement, les porosités servent d'amorce à la croissance de très petits grains de ferrites. Les rares zones ferritiques (moins de 1 % de la section) ne possèdent pas d'écrouissage, mais elles renferment des décohésions intergranulaires qui peuvent correspondre à la décarburation totale d'un acier eutectoïde.

**Conclusion**

Cet élément métallique était à l'origine principalement constitué d'acier eutectoïde. Il a subi une décarburation (volontaire ou involontaire ?) dans un foyer de forge. Selon les éléments recueillis (décarburation de l'acier, absence de cémentation, ensemble métallique cohérent sans trace d'assemblage, inclusions de scorie, très nombreux replis etc..), il s'agit très probablement d'un fragment de loupe en cours de traitement et de mise en forme. La décarburation importante de la périphérie de l'échantillon et le nappage de scorie témoignent du séjour de la pièce dans le foyer de forge. Sa forme générale avec relief aux contours courbes n'est donc pas forcément inhérente à l'objet, elle pourrait s'être formée au cours de ce séjour. Ensuite, elle n'a pas été retravaillée. L'échantillon est donc un demi-produit (fragment de loupe) encore peu épuré et compacté, qui aurait été abandonné ou perdu en contexte de forge alors qu'il était en cours de traitement.

# TERRASSE 1H : LES CULOTS DE FORGE

## *Échantillon 1389-1*

### Métrologie

Masse (g) : 456
Longueur (mm) : 97
Largeur (mm) : 81
Épaisseur (mm) : 42
Rayon de courbure (mm) : 52

### Morphologie

Culot plano-convexe de forme typique. Il est très dense et très magnétique. Du côté le plus épais, sur un quart de la face supérieure, la surface est compacte et pratiquement plane. Le reste est plus poreux (cavités de 1 à 7 mm de côté) et accidenté. La structure de la face supérieure est homogène. La face inférieure est peu accidentée, mais poreuse (cavités de 1 à 4 mm de diamètre). Elle renferme des empreintes de fragments de charbon de bois et des agglomérations d'argile rubéfiée.

### Macrographie

Le culot a été tronçonné longitudinalement. La section est plutôt homogène. Il existe néanmoins une zone centrale avec quatre fragments de charbon de bois (de 2 à 10 mm de côté) et deux porosités verticales de 7 à 9 mm de haut qui se différencient de l'ensemble de la section. Le reste du culot est poreux avec des cavités plus ou moins oblongues de 1 à 3 mm de diamètre. Dans la partie inférieure, les porosités se développent verticalement, tandis que dans la partie supérieure elles s'étendent davantage à l'horizontal. Mis à part les agglomérations argileuses et les quelques fragments de charbon de bois, la section est homogène. À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

### Micrographie

La section présente une matrice fayalitique à lattes et à pavés plutôt homogène. Elle contient une quantité importante de wustite principalement sous forme globulaire et un semis métallique dense, légèrement réoxydé. Il se manifeste sous la forme de billes et de fragments. Par ailleurs, de nombreuses battitures globulaires sont encore visibles.

### Conclusion

Ce culot représente une activité de forge fondée sur des cycles thermiques homogènes réalisés à basse température avec de nombreuses pertes de métal et d'oxyde.

## *Échantillon 1389.2*

### Métrologie

Masse (g) : 362

Longueur (mm) : 97
Largeur (mm) : 68
Épaisseur (mm) : 42
Rayon de courbure (mm) : 110

**Morphologie**

Culot plano-convexe légèrement oblong (fig. 105). Il est surtout magnétique sur sa face inférieure qui possède une morphologie caractéristique avec des porosités entre 1 et 4 mm et un relief accidenté. Il n'y a en revanche aucune incrustation de fragments de charbon de bois ni de matières minérales. Mis à part une petite excroissance coulée du côté le plus fin, la face supérieure est dense et rugueuse avec uniquement quelques cavités débouchantes supérieures au centimètre. L'orientation des cavités et l'organisation du relief suggèrent que la tuyère se trouvait dans l'axe longitudinal du culot.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement (fig. 105). La section est homogène hormis dans les deux extrémités où se développe une zone plus fibreuse. Toutefois, la majorité de la coupe est constituée d'une structure fayalitique avec des porosités généralement ovoïdes et millimétriques La répartition des porosités forme un léger dégradé avec une densification du bas vers le haut. À proximité de la surface supérieure, deux cavités horizontales supérieures au centimètre et deux empreintes de fragments de charbon de bois se situent à côté de deux plus petites porosités débouchantes. Dans le bas de la section, les porosités sont plus rares et plus petites mis à part une cavité verticale de 10 mm de haut. À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

**Micrographie**

La matrice fayalitique à lattes est plutôt homogène (fig. 105). Elle livre des dendrites de wustite et un semis métallique très épars, non réoxydé à chaud. Les dendrites de wustite se développent essentiellement du côté le plus épais de la section, suggérant ainsi le point le plus chaud du foyer et par conséquent l'arrivée de la tuyère. Les battitures sont essentiellement lamellaires, mais elles peuvent également être globulaires. Elles se trouvent principalement dans la partie supérieure de la section. En partie basse, elles sont essentiellement dissoutes.

**Conclusion**

Ce culot de forge relève d'une activité de forge générant peu de pertes en métal dans un environnement thermique homogène relativement élevé. La présence de battiture plate dans le haut du culot suggère par ailleurs que l'activité était au moins en partie fondée sur la fabrication de pièces plates.

---

## *Échantillon 1389.3*

**Métrologie**

Masse (g) : 184
Longueur (mm) : 79
Largeur (mm) : 62
Épaisseur (mm) : 31
Rayon de courbure (mm) : 100

**Morphologie**

Culot plano-convexe de forme pratiquement ronde. Il est très magnétique sur la face supérieure qui présente un aspect très dense, rugueux et plat. Il existe uniquement au centre de la face une grosse dépression (12 mm de diamètre) qui indique l'endroit où débouchait l'air de la tuyère. Du même côté que cette cavité, la scorie conserve un côté abrupt qui est probablement la zone d'accroche avec la paroi du foyer. La face inférieure est caractéristique et homogène. Beaucoup plus accidentée que la précédente, elle contient quelques rares petites porosités, des empreintes de fragments de charbon de bois et quelques fragments d'argile rubéfiée.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement. La section est homogène. Elle comprend néanmoins en partie basse une densité plus importante de grosses porosités (4 à 5 mm) qui sont essentiellement orientées horizontalement. En partie haute, les cavités sont plus petites (entre 1 et 3 mm) et ovoïdales. À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

**Micrographie**

La matrice fayalitique à lattes et à pavés est relativement homogène. Elle renferme de la wustite essentiellement globulaire et un semis métallique abondant sous la forme de filaments et de billes réoxydés à chaud. Au centre de la section, un fragment métallique carré est au cœur d'un îlot de réoxydation également carré. Ceci traduit le travail d'objets déjà épurés et mis en forme, de suffisamment petites dimensions pour se casser et/ou tomber dans le foyer lors des phases de chauffe. Le travail d'objets plats est corroboré par la présence pratiquement exclusive de battitures lamellaires.

**Conclusion**

Ce culot relève d'un travail de forge essentiellement fondé sur la fabrication de petits objets plats dont le métal est déjà correctement épuré, avec des cycles thermiques relativement peu élevés. Ce culot ressemble beaucoup à l'échantillon 1393.2.

---

## *Échantillon 1393.2*

**Métrologie**

Masse (g) : 202
Longueur (mm) : 81
Largeur (mm) : 65
Épaisseur (mm) : 38
Rayon de courbure (mm) : 43

**Morphologie**

Culot plano-convexe de forme oblongue (fig. 106). Il est très magnétique sur sa face inférieure qui est accidentée et parsemée de porosités de l'ordre du millimètre. Il existe quelques empreintes de fragments de charbon de bois, mais aucune incrustation de matières minérales n'est visible. De profil, la face inférieure est formée de deux zones convexes disposées « en escalier ». Ce profil est davantage associé à la forme du foyer qu'à un double culot. Cet aspect se retrouve dans l'échantillon 1409.3. La face supérieure ne possède pas de porosités débouchantes hormis trois grosses cavités centrales (entre 6 et 9 mm) qui doivent très certainement correspondre à l'arrivée de l'air de la tuyère. Sa morphologie très peu accidentée est rugueuse. Elle témoigne d'un coup de chaud en fin de cycle de forge.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement (fig. 106). La section de la scorie possède un profil en escalier. Plutôt compacte, elle est néanmoins hétérogène. Sur 5 mm de haut le long de la face inférieure, la section est poreuse avec des cavités ovoïdales entre 2 et 3 mm et un semis lâche de fines porosités. Le corps de la section est compact, mais il renferme au milieu une grosse inclusion fibreuse (15 x 5 mm) au contour déchiqueté qui, d'après la micrographie, est un fantôme d'acier. L'extrémité la plus fine, qui forme la petite marche du profil en escalier, est très poreuse. Elle recèle de nombreuses cavités de formes ovoïdales pour les plus petites, et de formes beaucoup plus irrégulières pour les plus grosses qui peuvent atteindre 10 mm sans direction préférentielle. À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

**Micrographie**

La matrice du culot est localement fayalitique avec des globules de wustite, mais généralement la structure est fibreuse et hétérogène (fig. 106). Les deux matrices contiennent de très nombreux fragments de métal partiellement ou totalement oxydés. Ils se trouvent sous la forme de filaments et de fragments pour deux d'entres eux de dimensions importantes (300 µm). Ceux conservés sont toujours bien épurés. Plus localement, une zone pourrait correspondre au fantôme d'un acier totalement oxydé à chaud. Elle se trouve au niveau de la zone fibreuse identifiée en macrographie. La structure est en effet équivalente à un acier à 0,2-0,3 % de carbone où la ferrite aciculaire aurait disparu. Des battitures lamellaires et globulaires sont également nombreuses. Quelques fragments de charbon de bois sont localisés en périphérie.

**Conclusion**

Ce culot révèle un travail de forge hétérogène fondé sur des cycles thermiques peu élevés qui engendrent de très nombreuses chutes métalliques parfois grosses, mais également d'importantes pertes en oxyde. S'il existe quelques gros fragments de métal, de nombreux petits fragments et filaments sont également visibles. Le travail du métal semble donc porter sur des gros et petits objets qui peuvent parfois être en acier.

---

## *Échantillon 1393.3*

**Métrologie**

Masse (g) : 254
Longueur (mm) : 95
Largeur (mm) : 74
Épaisseur (mm) : 27
Rayon de courbure (mm) : 71

**Morphologie**

Culot plano-convexe de forme ronde. Il est très magnétique sur sa face supérieure qui est pratiquement plane. Il comporte uniquement une petite dépression centrale de 2 cm de diamètre. Très compacte, il possède une texture rugueuse qui prend parfois la forme de cristaux. À la périphérie, des incrustations de matières minérales sont visibles. La face inférieure est caractéristique. Elle dispose d'une morphologie accidentée avec de nombreuses porosités généralement de 2 mm de diamètre et quelques empreintes de matières organiques et minérales. Sur un côté, il existe de plus grosses cavités (de 5 à 10 mm).

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement. La section est constituée de deux structures distinctes. Sous la surface supérieure un gros fragment métallique et, en dessous, deux plus petits baignent dans une matrice fayalitique. Leur contour vif et déchiqueté est issu de l'hydroxydation du métal qui a des pourtours beaucoup plus réguliers avec des faces sensiblement planes. Deux cavités déchiquetées d'une longueur comprise entre 7 et 18 mm se développe horizontalement à la périphérie inférieure de cette zone. Le reste du culot contient des porosités toujours supérieures au millimètre sous des formes plutôt ovoïdales. Elles se trouvent plus fréquemment en partie basse. Ici, les porosités s'étendent préférentiellement horizontalement tandis qu'en partie haute elles sont davantage verticales (dégazage). À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

**Micrographie**

La matrice fayalitique à lattes et à pavés du culot est homogène. Elle est fortement chargée en globules de wustite qui proviennent d'un très abondant semis métallique, partiellement ou totalement réoxydé et de nombreuses battitures lamellaires disséminées sans zonage particulier. Le plus gros fragment métallique renferme un gros repli ovoïdal vide de scorie. Néanmoins, l'ensemble des fragments métalliques possède une très bonne propreté inclusionnaire avec uniquement quelques porosités persistantes. Leur contour vif et déchiqueté est issu de l'hydroxydation du métal qui a des pourtours beaucoup plus réguliers avec des faces sensiblement planes. De nombreuses inclusions sont en réalité des zones hydroxydées. Quelques fragments de charbon de bois sont présents dans la périphérie inférieure de la section.

L'attaque au nital indique que tous les fragments métalliques sont constitués de ferrite. Le plus gros fragment est écroui dans sa partie inférieure.

**Conclusion**

Ce culot est issu d'un travail de forge homogène réalisé sous des cycles thermiques moyennement élevés. Les opérations réalisées engendrent de nombreuses chutes métalliques et d'importantes pertes en battitures lamellaires. S'il subsiste un repli dans le plus gros fragment, la qualité du compactage des zones métalliques et l'existence d'une partie écrouie témoignent davantage d'un travail de forge de fabrication qui occasionne de nombreuses pertes en métal (ferrite). Il ne semble pas s'agir d'un travail d'épuration.

---

## *Échantillon 1409.3*

**Métrologie**

Masse (g) : 216
Longueur (mm) : 66
Largeur (mm) : 83
Épaisseur (mm) : 45
Rayon de courbure (mm) : 41

**Morphologie**

Culot plano-convexe de forme légèrement oblongue. Il est ponctuellement magnétique sur les deux faces. La face inférieure possède sur toute une moitié l'empreinte de la paroi du foyer de forge. L'autre moitié a une morphologie poreuse et accidentée sans incrustation de fragments de charbon de bois ni de matières minérales. De profil, la face inférieure est constituée par deux

zones convexes disposées « en escalier » qui sont davantage associées à la forme du foyer qu'à un double culot. Cet aspect se retrouve dans l'échantillon 1393.2. La face supérieure ne conserve pas d'indice de la tuyère. Elle est poreuse, avec beaucoup de cavités débouchantes de l'ordre du millimètre et quelques-unes plus grosses ne dépassant pas le centimètre. La surface est de manière générale très peu accidentée et plane.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné transversalement. La section a un profil en escalier. De manière générale, elle est hétérogène. L'extrémité effilée renferme une zone fibreuse et compacte avec en périphérie quelques porosités aux contours vifs. Le corps (la partie de la section la plus épaisse) est composé d'une structure fayalitique avec des porosités ovoïdales ou rondes. Une seule est légèrement allongée verticalement sur 4 mm (dégazage). À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

**Micrographie**

La matrice fayalitique est hétérogène. Elle contient de la wustite essentiellement sous la forme dendritique, mais il existe aussi quelques globules. Le métal, partiellement ou totalement réoxydé à chaud, est abondamment présent sous la forme de billes et de très fins filaments. Il subsiste quelques battitures lamellaires et en bille. Les battitures globulaires sont majoritaires, toujours très grosses et plus ou moins dissoutes dans la scorie.

**Conclusion**

Ce culot témoigne de cycles de forge hétérogènes réalisés à haute température et accompagnés de nombreuses pertes en métal et en oxyde. La présence de filaments très fins montre que certains des objets forgés étaient petits, mais l'existence de battitures globulaires de très grosses dimensions indique que des éléments plus gros étaient également travaillés.

## *Échantillon 1409.4*

**Métrologie**

Masse (g) : 176
Longueur (mm) : 81
Largeur (mm) : 63
Épaisseur (mm) : 30
Rayon de courbure (mm) : 75

**Morphologie**

Culot plano-convexe de forme oblongue. Il est relativement peu magnétique. Du côté le moins épais, sa face inférieure livre l'empreinte de la paroi du foyer. L'autre moitié, relativement peu accidentée, est caractéristique de ce type de face avec des porosités ne dépassant pas les 3 mm de diamètre et des empreintes de fragments de charbon de bois. La face supérieure est localement accidentée. Du côté où la scorie est la plus épaisse, elle dispose d'une cavité de 3 à 4 cm entourée de quelques autres millimétriques. Cette zone déchiquetée indique certainement le lieu où débouchait l'air de la tuyère.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement. La section renferme une structure fayalitique très homogènes avec des porosités principalement rondes qui n'excèdent pas 2 mm de diamètre.

Quelques-unes plus grosses se développent horizontalement en partie supérieure. À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

**Micrographie**

La matrice fayalitique à lattes et à pavés est homogène. Elle comprend de nombreuses dendrites et globules de wustite. Ils sont issus d'un semis métallique important principalement localisé dans l'extrémité la plus fine. Ce semis est plus ou moins réoxydé et localement formé de filaments. La wustite provient également de la dissolution plus ou moins complète des battitures lamellaires et globulaires de morphologies très variées.

**Conclusion**

Ce culot reflète des cycles thermiques de forge homogènes relativement élevés qui s'accompagnent de pertes importantes en métal et en oxyde.

## *Échantillon 2505.1*

### Métrologie

Masse (g) : 110
Longueur (mm) : 43
Largeur (mm) : 36
Épaisseur (mm) : 11

### Morphologie

Masse métallique sensiblement parallélépipédique comportant deux grandes faces planes et parallèles (fig. 117). Les deux petites extrémités opposées ne sont pas particulièrement régulières. Elles pourraient être liées à un arrachement de matière. Il s'agit vraisemblablement d'un demi-produit.

### Macrographie

La masse métallique a été tronçonnée longitudinalement (fig. 117). La section renferme une propreté inclusionnaire relativement élevée mis à part le long d'une ligne qui réunit de multiples inclusions allongées plus ou moins alignées. À l'opposé, à partir d'une des deux grandes faces, il se développe de multiples fissures ramifiées qui sont probablement des décohésions intergranulaires dues à un martelage violent et important.

L'attaque au nital indique que 30 % de la section est composée de ferrite. Celle-ci présente une propreté inclusionnaire élevée. Deux grosses zones aciérées se déploient le long des deux grandes faces. L'une concerne la partie la moins correctement compactée et l'autre l'ensemble des fissures qui semblent être intergranulaires.

### Micrographie

La propreté inclusionnaire de l'échantillon est très correcte, mais il subsiste encore quelques inclusions remplies d'une matrice fayalitique avec des dendrites de wustite parfois en cours d'écoulement (fig. 117). Elles sont très écrasées et certaines d'entres elles sont alignées dans le sens du martelage. Leur morphologie n'indique pas de soudure, mais témoigne davantage d'inclusions primaires en cours de fermeture. De nombreuses décohésions intergranulaires sont visibles. Elles naissent à partir des grandes faces et s'étendent jusque dans le milieu de la section. Il n'y a pas de repli ni d'inclusions amorphes. Autour de la masse métallique, il existe des charbons de bois et des battitures lamellaires en cours de séparation qui témoignent très certainement de l'abandon de l'objet après une phase de martelage.

L'attaque au nital montre qu'une moitié de la surface est constituée de ferrite à très petits et très gros grains sans zonage particulier ni écrouissage. Deux zones aciérées se développent le long des deux grands côtés. Chacune forme un dégradé du cœur vers le bord d'un acier à 0,8 % à un autre à 0,2 % de carbone. Il semble donc s'agir d'une décarburation. D'un côté, la zone aciérée comprend les nombreuses inclusions en cours de fermeture qui forment d'ailleurs, par endroits, des petites soudures secondaires de corroyage. De l'autre côté, se sont les décohésions intergranulaires qui sont dans la zone aciérée. Il y a donc une réelle différence d'épuration entre

les zones ferritiques et celles aciérées dont la dureté a freiné l'évacuation des inclusions et a engendré la fissuration du métal.

**Conclusion**

Cette masse sensiblement parallélépipédique est proche d'un demi-produit constitué à partir d'un fragment de loupe. En effet, si des petites soudures existent, elles sont issues d'inclusions totalement fermées. D'autres sont partiellement fermées probablement parce qu'elles se situent uniquement dans une zone aciérée plus dure. Le problème du compactage des zones carburées est également visible dans l'importante zone de fissurations intergranulaires consécutives au martelage violent et soutenu. À ce propos, des battitures lamellaires en formation sur le contour indiquent que la pièce a été forgée un peu avant d'être abandonnée. Si des faciès d'arrachement pouvaient être envisagés sur les deux petites extrémités, il n'existe aucun argument métallographique pour soutenir cette hypothèse. Il semble donc que ces formes soient issues de la mise en forme peu élaborée de ses côtés. Ce demi-produit n'a donc pas encore servi, mais il a été compacté juste avant d'être abandonné.

# TERRASSE 2L : UN DEMI-PRODUIT ET UN OBJET MÉTALLIQUE

## *Échantillon 2535.1 (demi-produit)*

### Métrologie

Masse (g) : 338
Longueur (mm) : 157
Largeur (mm) : 26
Épaisseur (mm) : 15

### Morphologie

Barre de fer présentant quatre faces très régulières organisées autour d'une section rectangulaire aux dimensions pratiquement constantes (fig. 118). Légèrement courbe, elle possède deux extrémités plus ou moins planes, mais moins régulières que les quatre faces principales précédemment décrites. Il doit probablement s'agir d'un demi-produit.

### Macrographie

La masse métallique a été tronçonnée longitudinalement (fig. 118). La section livre une propreté inclusionnaire très élevée. Il subsiste uniquement quelques inclusions plus ou moins allongées essentiellement localisées dans les extrémités.

L'attaque au nital indique que la pièce est essentiellement aciérée. L'ensemble du pourtour est légèrement décarburé. Une moitié l'est un peu plus profondément.

### Micrographie

Dans les extrémités de la section, de nombreuses porosités déchiquetées sont encore visibles, mais la majorité de la pièce a une excellente propreté inclusionnaire (fig. 118). Localement, il subsiste en surface quelques décohésions intergranulaires ou des lignes d'inclusions amorphes qui sont probablement issues de la loupe initiale et par conséquent de la réduction. Aucun repli n'est visible. De manière générale, l'agglomération et l'épuration de la pièce sont donc très élevées. Dans l'hydroxyde périphérique uniquement quelques charbons de bois ont été repérés.

L'attaque au nital montre que la section est en grande partie constituée d'acier trempé (90 % de la section) à 0,7-0,8 % de carbone sous la forme de bainite, de troostite (bainite nodulaire) et de martensite. Toute la périphérie de la pièce est ferritique. La transition entre la ferrite et l'acier étant progressive, la pièce a certainement subi une décarburation superficielle lors du passage dans l'atmosphère oxydante de la forge. L'une des moitiés est légèrement plus décarburée que l'autre. C'est d'ailleurs la mieux compactée. Les décohésions intergranulaires et les inclusions amorphes sont localisées dans l'autre moitié, où les zones aciérée sont plus importantes. Aucune soudure n'est visible.

### Conclusion

La morphologie générale de la pièce et les observations métallographiques montrent qu'il s'agit vraisemblablement d'un demi-produit très correctement compacté, fabriqué à partir d'un

fragment de loupe. Largement et fortement carburé, il est certainement trempé pour faciliter sa préhension après sa mise en forme. Aucun indice n'indique qu'il a déjà été utilisé ou que son abandon est intervenu directement après une phase de forgeage.

## *Échantillon 2528.1 (assemblage de tôle)*

### Métrologie

Masse (g) : 40
Longueur (mm) : 42
Largeur (mm) : 37
Épaisseur (mm) : 10

### Morphologie

Masse de fer en forme de triangle rectangle dont l'épaisseur est constante. La face qui compose l'hypoténuse possède un aspect irrégulier peut-être consécutif à un arrachement de matière. Tout le long du plus petit côté, la pièce semble constituée d'un biseau. Vu la petitesse de la pièce, il doit probablement s'agir d'un objet en cours de forgeage, mais certainement pas d'un demi-produit.

### Macrographie

La masse métallique a été tronçonnée longitudinalement. La section est constituée de deux feuilles de 8 mm superposées et mal soudées. La zone d'assemblage est donc largement ouverte et hydroxydée. Les deux feuilles sont légèrement décalées et forment le biseau précédemment décrit. Ce dernier ne paraît pas avoir de fonction particulière, il semble uniquement associé à l'assemblage.

L'attaque au nital indique que les deux feuilles sont entièrement ferritiques.

### Micrographie

Les deux feuilles de métal sont séparées par une très large bande d'hydroxyde qui signale que la soudure entre les deux parties n'a pas été correctement réalisée. La propreté inclusionnaire des deux feuilles est excellente, hormis quelques inclusions fayalitiques fortement écrasées et remplies de globules de wustite localisées le long des lignes de corroyage. Dans la périphérie hydroxydée de l'objet, des battitures lamellaires sont en cours de formation et de détachement. Ceci sous-entend que la pièce a été abandonnée juste après son dernier martelage.

L'attaque au nital révèle deux feuilles de ferrite non écrouie à grains homogènes.

### Conclusion

Cette pièce métallique est un objet indéterminé formé de deux feuilles ferritiques très mal assemblées, mais en revanche très correctement épurées. Cette mauvaise soudure a peut-être engendré son rejet et son abandon juste après une phase de martelage. Il s'agit donc d'un essai d'assemblage de tôles.

## *Échantillon 2194. 1*

### Métrologie

Masse (g) : 101
Longueur (mm) : 40
Largeur (mm) : 37
Épaisseur (mm) : 19

### Morphologie

Masse métallique pratiquement parallélépipédique avec quatre faces planes martelées (fig. 108). Les deux petites extrémités opposées ont des faciès d'arrachement ou de brûlure. L'une d'elles possède la trace d'un arrachement avec un léger refoulement.

### Macrographie

La masse métallique a été tronçonnée transversalement (fig. 108). La section présente une qualité inclusionnaire relativement médiocre. Il subsiste encore en effet de nombreuses porosités et inclusions aux contours irréguliers avec de multiples faciès d'écrasement. Elles se situent préférentiellement aux extrémités de la section.

L'attaque au nital montre que la masse est issue d'un unique fragment de loupe. Il n'y a en effet aucune soudure. La surface aciérée couvre environ 50% de la section. L'organisation structurale indique que cette hétérogénéité provient directement de la loupe initiale. Il n'y a pas de phénomène de cémentation, mais il est possible que certaines zones aciérées périphériques aient été décarburées.

### Micrographie

La section renferme une densité importante de porosités aux multiples faciès d'écrasement (fig. 108). Les inclusions livrent des contours identiques, mais elles sont beaucoup moins nombreuses. Elles sont essentiellement remplies de fayalite et de wustite sous forme dendritique. Il existe également de nombreux replis parfois très gros. Dans l'hydroxyde périphérique, aucun nappage de scorie et aucun vestige de battiture ne sont visibles.

L'attaque au nital montre que les zones aciérées renferment 0,7-0,8 % de carbone. L'autre moitié de la section est constituée de ferrite à petits grains non écrouis. À certains endroits, la ferrite possède le faciès d'un acier décarburé. Ce processus de décarburation est également visible dans la transition progressive entre la zone aciérée et celle ferritique. Aucune soudure n'est visible.

### Conclusion

Cette masse métallique est certainement un demi-produit dont une partie a déjà servi de matière première. La qualité du métal travaillée est relativement médiocre, mais l'épuration d'assèchement a déjà eu lieu et a évacué la scorie résiduelle. Le demi-produit est une masse mi-ferritique mi-aciérée décarburée au cours de l'épuration primaire de la loupe qui possédait à l'origine des zones carburées plus importantes.

## *Échantillon 2180.1*

### Métrologie

Masse (g) : 1340
Longueur (mm) : 143
Largeur (mm) : 121
Épaisseur (mm) : 95
Angle de courbure (mm) : 45°

### Morphologie

Très gros culot plano-convexe qui présente sur un côté une triple stratification. L'autre côté et le fond ont été moulés dans le foyer de forge qui possède par conséquent un fond plat d'au moins 65 mm et une paroi à 45° au minimum de 100 mm de hauteur. Sur la face supérieure, du côté où la scorie est accrochée à la paroi, une morphologie dense presque coulée indique le débouché de la tuyère. La périphérie du côté opposé est beaucoup plus perturbée et dispose d'un aspect beaucoup plus poreux. Les porosités sont toujours inférieures à 5 mm de diamètre. La scorie est peu magnétique.

### Macrographie

Le culot a été tronçonné transversalement. La section réunit trois strates séparées par deux zones « d'inter-recharge » très poreuses et fibreuses avec de nombreux fragments de charbon de bois. La strate inférieure est très homogène. Les porosités, rondes et millimétriques, sont uniquement présentes dans la partie supérieure. La strate intermédiaire est très hétérogène et très fine. Elle est largement pénétrée par les fragments de charbon de bois des 2 zones d'inter-recharge. Néanmoins, les porosités y sont toujours millimétriques et rondes. La recharge supérieure ressemble à la recharge inférieure, mais elle livre un nombre plus important de porosités ovoïdales plus grandes (8 mm maximum). À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

### Micrographie

Les trois culots superposés sont sensiblement identiques. Ils présentent une matrice fayalite à lattes et à pavés homogène avec uniquement des dendrites de wustite. Elles proviennent essentiellement des battitures lamellaires et globulaires plus ou moins dissoutes, mais également d'un petit semis épars de billes et de fragments métalliques plus ou moins réoxydés à chaud. Les zones inter-recharge sont constituées par de nombreuses inclusions de fragments de charbon de bois.

### Conclusion

Ce culot de forge représente trois phases de forges indépendantes séparées par deux temps où du charbon est ajouté. Ces phases de chauffe sont sensiblement identiques. Elles sont caractérisées par des cycles thermiques élevés et homogènes et des pertes en oxyde et en métal relativement peu importantes. Il pourrait donc s'agir de travail de finition, pourtant peu précis puisque le foyer n'a pas été pas nettoyé entre chaque phase.

## *Échantillon 2180.2*

**Métrologie**

Masse (g) : 332
Longueur (mm) : 120
Largeur (mm) : 75
Épaisseur (mm) : 40
Rayon de courbure (mm) : 44

**Morphologie**

Culot relativement plat de forme oblongue. Il dispose sur une de ses extrémités d'un petit appendice de scorie coulée. La face supérieure a une surface très régulière pratiquement sans porosité. Celles-ci sont inférieures à 4 mm et sont essentiellement localisées au fond de la zone concave. La face inférieure est également peu poreuse, mais elle réunit de très nombreuses empreintes de gros fragments de charbon de bois. Cette scorie est peu magnétique.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné transversalement. La section est plutôt hétérogène. Elle renferme de multiples porosités soit millimétriques et ovoïdales, soit centimétriques et allongées horizontalement. Les plus grosses sont essentiellement présentes dans le haut de la section et dans la partie centrale qui livre par ailleurs une zone plus fibreuse. À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

**Micrographie**

La matrice est très hétérogène et très fibreuse. Ceci indique que des matières organiques sont mélangées à la matrice fayalitique traditionnelle du culot de forge qui comprend de la wustite sous la forme de globule. Il existe quelques rares petits nodules, fragments et limailles de métal plus ou moins réoxydés à chaud. Les battitures essentiellement globulaires se situent à la périphérie de la scorie. Quelques fragments de charbon de bois sont par ailleurs encore visibles dans le culot.

**Conclusion**

Ce culot de forge témoigne de cycles thermiques hétérogènes réalisés à basse température avec de nombreux ajouts organiques. Les pertes en oxydes et en métal sont plutôt faibles.

## *Échantillon 2180.3*

**Métrologie**

Masse (g) : 108
Longueur (mm) : 71
Largeur (mm) : 50
Épaisseur (mm) : 31
Rayon de courbure (mm) : 32

**Morphologie**

Petit culot concave et convexe très peu magnétique. Les contours de la face supérieure étaient très fins, ils sont aujourd'hui cassés. Cette face est couverte de fines alvéoles sans réelle porosité débouchante. Une longue dépression indique l'endroit où débouchait l'air de la tuyère. La face

inférieure est très dense et lisse. Elle dispose uniquement de quelques rares porosités millimétriques.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné transversalement. La section est très homogène et plutôt compacte. Les porosités sont essentiellement millimétriques. Du côté de la tuyère, certaines sont légèrement plus grosses. Elles s'étendent parfois verticalement sur 10 mm (dégazage). À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

**Micrographie**

La matrice fayalitique à lattes et à pavés est très homogène. Elle est parsemée de quelques îlots de dendrites de wustite principalement issues de quelques rares battitures essentiellement lamellaires. Très peu de pertes métalliques sont visibles.

**Conclusion**

Ce petit culot de forge reflète des cycles thermiques élevés et homogènes qui s'accompagnent d'un petit nombre de pertes en métal et en oxyde. Il témoigne donc d'un travail de finition où le désir de garder un foyer propre est primordial pour mieux apprécier visuellement la température, éviter les pollutions et concentrer le feu.

## *Échantillon 2194.2 (objet à double tranchant)*

### Métrologie

Masse (g) : 80
Longueur (mm) : 50
Largeur (mm) : 46
Épaisseur (mm) : 10 (max)

### Morphologie

Masse métallique peu épaisse et sensiblement rectangulaire avec d'un côté une nervure centrale longitudinale et de l'autre une face plane. De profil, la pièce est donc rectangulaire. Elle dispose, de chaque côté, d'un biseau effilé.

### Macrographie

L'échantillon a été tronçonné transversalement. La section a une excellente propreté inclusionnaire. À cette échelle, aucune porosité ou inclusion n'est visible. L'une des extrémités possède un fin biseau. De l'autre côté, une grosse et une petite échancrures hydroxydées pourraient indiquer la présence de soudures partiellement mal réalisées entre trois feuilles de métal.

L'attaque au nital montre que la totalité de la section est aciérée. Celle-ci est, au minimum, constituée de deux feuilles assemblées au milieu de la section au niveau de la plus grosse échancrure hydroxydée. Cette soudure se poursuit pratiquement jusqu'au biseau localisé dans l'autre extrémité.

### Micrographie

La section renferme une excellente propreté inclusionnaire. Il n'existe pas de replis. Il subsiste uniquement quelques rares micro-porosités et des micro-inclusions amorphes fortement allongées qui témoignent d'un corroyage très important.

L'attaque au nital révèle au moins deux feuilles aciérées. L'une est composée de 0,4-0,5 % de carbone et l'autre est formée de 0,7-0,8 % de carbone. Une très fine perlite lamellaire généralisée est visible dans la zone la plus aciérée, mais de part et d'autre de la soudure centrale, il y a une décarburation de l'acier. En de nombreux endroits, on constate une surchauffe ponctuelle traduite par la présence de ferrites aciculaires. Une décarburation périphérique pratiquement systématique amène l'acier à 0,2 % de carbone sur tout le pourtour de l'échantillon. L'objet n'a pas été trempé, mais une zone à petits grains manifeste un martelage plus important à cet endroit.

### Conclusion

Cette pièce métallique est de grande qualité. Très correctement épurée, elle est entièrement aciérée. Les deux feuilles qui la composent sont particulièrement bien assemblées sauf sur un des côtés où la soudure n'a pas pris. C'est peut-être pour cette raison que la pièce a été rejetée. Elle devait probablement posséder deux biseaux tranchants opposés. Aucun élément ne permet de dire que cette pièce appartenait originellement à un objet plus grand. Cet échantillon atteste donc

la fabrication d'objets tranchants en acier parfois avec deux biseaux fins opposés. Les compétences techniques mises en œuvre lors de ces travaux sont élevées.

## *Échantillon 2194.3 (outil tranchant type « chasse »)*

**Métrologie**

Masse (g) : 82
Longueur (mm) : 48
Largeur (mm) : 32
Épaisseur (mm) : 16

**Morphologie**

Masse métallique légèrement allongée avec un côté élargi disposant d'un long biseau régulier à 60°. Le côté opposé est légèrement arrondi (fig. 109). Les 2 extrémités sont martelées pour être planes et régulières comme la grande face qui forme la base du biseau. Il doit probablement s'agir d'un outil tranchant en cours de confection.

**Macrographie**

L'échantillon a été tronçonné transversalement (fig. 109). La section a une qualité inclusionnaire très élevée. Il subsiste uniquement des zones hydroxydées dans l'extrémité arrondie de la section. Celles alignées sont sans doute associées à des soudures mal assemblées. L'une est horizontale tandis que l'autre est formée d'un demi-arc de cercle, parallèle à l'extrémité arrondie de la section opposée au biseau.

L'attaque au nital montre que l'échantillon est essentiellement constitué d'acier. Une unique zone ferritique est située dans l'extrémité fortement hydroxydée. Elle a probablement été provoquée par une décarburation. Ceci corrobore l'hypothèse d'une brûlure du métal. La mise en évidence des soudures montre que l'objet est constitué de trois feuilles mises en forme de manière complexe. Dans un premier temps, une feuille à 0,7-0,8 % de carbone a été soudée à une autre à 0,3-0,4 %. Cette dernière est plus petite et ne couvre pas la totalité de la longueur de la feuille plus aciérée qui conserve une moitié libre. Dans un deuxième temps, cette moitié libre a été repliée et soudée de manière à recouvrir l'extrémité de la feuille à 0,3-0,4 % de carbone et ainsi former une soudure en gueule de loup. Dans un troisième temps, sur la face encore libre de la feuille très aciérée, une nouvelle feuille très aciérée a été soudée au même niveau que la feuille à 0,3-0,4 % de carbone. Dans un quatrième temps, l'extrémité qui réunit les trois feuilles superposées a été repliée et soudée pour recouvrir la soudure en gueule de loupe. L'extrémité avec la gueule de loup a ensuite été fortement martelée pour donner à la pièce une forme de biseau. L'écrasement de la matière a engendré l'évasement de la pièce au niveau du tranchant. Dans un quatrième temps, l'objet a été chauffé et trempé dans un bain probablement d'eau. La décarburation du talon de l'objet est peut-être volontaire car elle lui confère une certaine ductilité qui lui est nécessaire. Cette dernière, mal maîtrisée, a certainement été réalisée entre la mise en forme de l'objet et son traitement thermique.

**Micrographie**

L'échantillon possède une qualité inclusionnaire très élevée (fig. 109). Il n'y a pas de repli. Il subsiste uniquement quelques porosités fortement allongées, majoritairement vides de scories, et quelques chapelets d'inclusions, majoritairement amorphes, qui témoignent d'un corroyage intense à haute température. L'axe préférentiel du corroyage se développe de la partie la plus épaisse à la pointe. Certaines lignes de soudure sont parfaitement perceptibles au travers d'une

légère brûlure superficielle. Elles comportent souvent un nappage siliceux qui atteste la présence d'ajouts sableux destinés à limiter la formation d'oxydes. La périphérie de l'objet est faiblement hydroxydée, exempte de scories, de fragments de charbon de bois et de battitures. L'extrémité arrondie est très hydroxydée et révèle une brûlure périphérique importante.

L'attaque au nital corrobore l'hypothèse d'une surchauffe locale de l'extrémité arrondie puisque c'est la seule zone ferritique de la section, de plus consécutive à une décarburation. Le reste de la section est entièrement aciéré. L'objet est en effet constitué de trois feuilles d'acier soudées et mises en forme de manière complexe (cf. macrographie). L'une d'elles, localisée au milieu, détient entre 0,3 et 0,4 % de carbone. Les deux autres possèdent entre 0,7 et 0,8 % de carbone. La trempe, prenant uniquement dans les zones très aciérées, ce sont exclusivement ces deux dernières qui sont entièrement trempées sous la forme d'une très fine martensite. Ce traitement thermique est de très grande qualité et très homogène. L'extrémité biseautée de la section renferme de très nombreuses lignes de corroyage traduisant un martelage intense de cette zone.

**Conclusion**

Cet objet tranchant dispose de qualités mécaniques très élevées. Sa composition aciérée et trempée, et sa mise en forme complexe, avec une soudure en gueule de loup renforcée par un repli complet de l'objet, lui confèrent une dureté exceptionnelle. Pour éviter qu'il ne se casse, une feuille moins aciérée a été placée au cœur de l'assemblage. Elle lui donne une certaine ductilité qui devait être soutenue par une décarburation (mal réalisée) plus importante du talon de l'objet. L'assemblage des feuilles favorise volontairement la présence d'acier fortement carburé le long du biseau. Vu la forme de l'objet, il pourrait s'agir d'une chasse, outil tranchant proche du ciseau destiné à équarrir les blocs de pierre. Cet objet illustre les hautes compétences techniques des forgerons qui maîtrisent des traitements mécaniques, chimiques et thermiques du forgeage. Néanmoins, la décarburation incontrôlée du talon de la pièce a peut-être causé son abandon.

## *Échantillon 2208-1 (couteau)*

**Métrologie**

Masse (g) : 19
Longueur (mm) : 91
Largeur (mm) : 14
Épaisseur (mm) : 5

**Morphologie**

Couteau ne disposant pas de soie (fig. 110). Sa forme trapézoïdale très allongée lui donne un caractère particulier. Le tranchant est un petit biseau situé le long de tout le grand côté et de l'extrémité qui forment le haut du trapèze. Le biseau est simple et ne concerne pas les deux faces.

**Macrographie**

L'échantillon a été tronçonné transversalement (fig. 110). La section possède une qualité inclusionnaire relativement peu élevé. En effet, il subsiste, au milieu, probablement une soudure hydroxydée et, à l'extrémité opposée au biseau, quelques lignes d'inclusions, de porosités ou d'hydroxydes.

L'attaque au nital montre que la toute la section est constituée d'acier.

**Micrographie**

La section possède à cette échelle une grande propreté inclusionnaire (fig. 110). En revanche la soudure centrale, associée au repli de la feuille sur elle-même, est mal réalisée et totalement hydroxydée.

L'attaque au nital montre que la section est composée d'un acier homogène à 0,7 % de carbone. La pointe du biseau est au contraire décarburée à 0,2 % de carbone et largement écrouie.

**Conclusion**

La forme de ce couteau demeure particulière. Il est constitué d'une feuille aciérée à 0,7 % de carbone repliée et soudée. Si la soudure est mal réalisée, le biseau est légèrement décarburé et écroui, probablement pour augmenter sa dureté et sa résistance à la déformation. L'absence de trempe n'est pas handicapante car, trempé, le couteau deviendrait trop cassant. La qualité de l'acier et le travail effectué sont remarquables.

## *Échantillon 3348.1*

### Métrologie

Masse (g) : 707
Longueur (mm) : 120
Largeur (mm) : 100
Épaisseur (mm) : 55
Rayon de courbure (mm) : 62

### Numéro d'inventaire bis

Échantillon 3342.1

### Morphologie

Culot concave et convexe de forme circulaire. En périphérie de la face supérieure, une morphologie plus accidentée et une grosse porosité supérieure au centimètre témoignent du lieu où l'air de la tuyère débouchait. Le reste de cette face est très compact et peu accidenté. La face inférieure est également très compacte et très régulière. Elle livre localement quelques fragments de paroi agglomérée. Elle est particulièrement magnétique.

### Macrographie

Le culot a été tronçonné transversalement. La section est hétérogène. Elle renferme beaucoup de porosités plus ou moins anguleuses dans une zone fibreuse. Dans la partie supérieure, de grandes porosités à angles vifs s'étendent sur 10 mm de long pour former une véritable bande beaucoup plus poreuse que le fond du culot.

### Micrographie

La matrice fayalitique à lattes et à pavés est très hétérogène. Elle est associée à une zone fibreuse issue d'ajouts de matières végétales et minérales. La présence de grains de silice corrobore cette hypothèse et témoigne de l'utilisation de sable en tant que désoxydant. De nombreux globules de wustite sont visibles. Ils proviennent des nombreuses battitures globulaires et lamellaires et de nombreux fragments métalliques déchiquetés et réoxydés à chaud.

### Conclusion

Ce culot est issu de cycles thermiques hétérogènes réalisés à basse température qui s'accompagnent de nombreuses pertes en oxyde et en métal. De nombreux ajouts de matières végétales et minérales, tel le sable, sont utilisés notamment pour limiter la formation d'oxyde sur le métal.

# TOUR 4G : UNE MATRICE

## *Échantillon 4309.1*

### Métrologie

Masse (g) : 452
Longueur (mm) : 72 (+/- 1)
Largeur (mm) : 38 (+/- 1)
Épaisseur (mm) : 27 (+/- 2)

### Morphologie

Pièce métallique parallélépipédique comportant six faces planes très correctement martelées (fig. 103). Au milieu d'une des deux faces principales, il existe d'un côté deux orifices coniques, borgnes et alignés longitudinalement. Au milieu de la face opposée, il y a un seul orifice du même type.

### Macrographie

La pièce a été tronçonnée dans le sens longitudinal de manière à ce que l'on puisse observer en coupe la structure interne et la mise en forme des trois orifices borgnes (fig. 103). La section, d'une bonne propreté inclusionnaire, réunit uniquement quelques lignes de porosités très écrasées et légèrement hydroxydées qui indiquent certainement des soudures mal assemblées. En plan, l'orifice unique se trouve à l'aplomb du milieu de la distance entre les deux trous de la face opposée. Le trou isolé sur le milieu d'une face mesure 6 mm de profondeur et 9mm de diamètre à l'ouverture. Il possède un profil trapu. Sur l'autre face, un des trous mesure 12 mm de profondeur avec un diamètre à l'ouverture de 8 mm tandis que l'autre mesure 8 mm de profondeur avec un diamètre à l'ouverture de 6 mm. Ces deux trous ont des formes plus coniques que l'autre.

L'attaque au nital révèle une structure complexe de multiples feuilles ferritiques et aciérées soudées les unes sur les autres et parfois repliées. La déformation des lignes de soudure au niveau des trous montre que ces derniers ont été réalisés par emboutissage à chaud.

### Micrographie

La propreté inclusionnaire est très hétérogène suivant les feuilles (fig. 103). Il existe de nombreuses lignes de corroyage longitudinales avec des inclusions remplies de fayalite et de wustite. L'alignement de ces inclusions est déformé au niveau des trous. Il existe également quelques rares inclusions amorphes très allongées dans le sens du corroyage.

L'attaque au nital montre une composition complexe de multiples feuilles ferritiques et aciérées soudées et parfois repliées les unes sur les autres. Toutes les lignes de soudure présentent une légère décarburation. Il existe aussi bien des soudures ferrite sur ferrite que ferrite sur acier. D'une manière générale, le cœur est formé de ferrite non écrouie tandis que tout le contour est en acier entre 0,7 et 0,8 % de carbone à très petit grains trempés (troostite). Des zones avec de l'acier entre 0,4 et 0,5 % existent plus localement. Les soudures de corroyage sont généralement de belle facture, mais quelques-unes ne sont pas totalement assemblées.

**Conclusion**

Alors que la forme de la pièce suggère un demi-produit, les trois trous localisés sur les deux faces principales et sa structure interne complexe adaptée aux chocs tendent à ce que l'on identifie cet objet comme un outil du type matrice. Cette matrice fournit des caractéristiques mécaniques très élevées avec des surfaces très dures (acier trempé) et un cœur plus souple (ferrite) qui permettent de recevoir et d'absorber des chocs violents et répétés. Il est cependant impossible de savoir si la pièce a subi de nombreux chocs car elle n'est pas ferritique en périphérie, seule structure qui conserve un écrouissage. Cette matrice est constituée de trois moules creux de différents profils servant à donner trois formes déterminées à un objet par compression, découpage, déformation ou emboutissage.

# III. LES FORGES D'HABITATS DISPERSÉS

# *III.1. Les travaux métallurgiques à l'Auribelle-Basse (Pézenas, 34) au début du IIe siècle*

## UN DEMI-PRODUIT

### *Échantillon 1230.1*

**Métrologie**

Masse (g) : 244
Longueur (mm) : 62
Largeur (mm) : 35
Épaisseur (mm) : 20

**Morphologie**

Courte barre métallique de section rectangulaire importante avec une extrémité légèrement biseautée qui pourrait être due à d'une opération de tranche à chaud (fig. 141). Il doit probablement s'agir d'un demi-produit. Avant d'être étudiée, cette barre a été nettoyée et moulée.

**Macrographie**

La barre a été tronçonnée longitudinalement. Hormis une très fine pellicule d'hydroxyde périphérique, la section est entièrement métallique (fig. 141). Elle comporte une propreté inclusionnaire hétérogène organisée en bandes obliques (45°) qui traduisent un corroyage incliné. Une soudure incomplètement assemblée et quelques alignements d'inclusions semblent confirmer cette direction du corroyage. Une des bandes concentre beaucoup d'inclusions, de porosités et, semble-t-il, de grandes fissures intergranulaires.

L'attaque au nital montre une structure hétérogène organisée en bandes inclinées qui confirment un corroyage oblique (45°). Dans l'angle inférieur gauche de la section, le bloc de métal est constitué d'une feuille moyennement aciérée (fig. 141). Sur celle-ci, est soudée une autre feuille peu aciérée au préalable repliée et soudée sur elle-même. Sur cet assemblage, a ensuite été soudée une nouvelle feuille moyennement aciérée et une dernière peu aciérée. Toutes les soudures sont inclinées et décarburées. Les inclusions sont très majoritairement situées dans les feuilles les plus aciérées.

**Micrographie**

La propreté inclusionnaire de la section est plutôt hétérogène. En effet, il subsiste des bandes obliques peu épurées où se développent des inclusions très allongées verticalement. Elles sont remplies d'une matrice fayalitique avec des globules et des dendrites de wustite. Dans ces mêmes bandes, sont observés de nombreuses fissures intergranulaires parfois très grandes et quelques replis. Le reste de la section est correctement épuré. Dans le prolongement de la soudure incomplètement assemblée et hydroxydée (*Cf. supra*), l'alignement des inclusions forme un demi-cercle. Ceci indique probablement l'existence d'une importante soudure par repli. Aucun indice inclusionnaire ne permet de dire que l'extrémité biseautée est consécutive à une tranche à chaud. Une légère hydroxydation périphérique est présente sur tout le pourtour, mais aucun enrobage de scorie ni de concrétion n'est visible.

L'attaque au nital révèle deux compositions chimiques différentes organisées en bandes obliques. La première se trouve principalement dans les zones les moins correctement épurées qui conservent des fissures intergranulaires. Elle comporte généralement 0,4-0,5 % de carbone (perlite globulaire très fine), mais elle atteint localement 0,8 %. La seconde se développe dans les zones les mieux épurées. Elle est caractérisée par un acier entre 0,2 et 0,4 % de carbone. À la jonction de ces deux types de zones, il existe toujours une bande ferritique dans laquelle se trouve une soudure qui a certainement généré cette décarburation. D'autres soudures de corroyage pourraient également être présentes dans les parties les plus aciérées, elles sont notamment visibles dans quelques alignements de porosités et d'inclusions. Les zones ferritiques conservent localement des parties écrouies dans la périphérie de la section. Aucun indice ne permet de dire que l'extrémité biseautée est consécutive à une tranche à chaud. Toute la périphérie est très légèrement décarburée.

**Conclusion**

Même si la pièce ne possède pas d'extrémité tranchée à chaud, sa morphologie lui confère plutôt l'aspect de demi-produit. Il est formé d'un assemblage en oblique de feuilles très aciérées et moyennement carburées. Ce demi-produit ne provient donc pas du compactage d'une loupe hétérogène. Les diverses feuilles comportent des propretés inclusionnaires variables, mais d'une manière générale relativement élevées vu la masse de métal traitée. Ce haut taux d'épuration doit être corrélé avec le type de mise en forme du demi-produit qui a certainement nécessité un martelage important visible dans les fissures intergranulaires et dans l'écrouissage des zones ferritiques périphériques. Cette technique de fabrication est singulière. Les volumes des différentes feuilles assemblées semblent importants pour une activité de recyclage. D'un point de vue strictement métallographique, il n'est pas possible de déterminer si ce demi-produit est importé ou s'il a été fabriqué sur place.

## *Échantillon 1151.2*

### Métrologie

Masse (g) : 664
Longueur (mm) : 127
Largeur (mm) : 70
Épaisseur (mm) : 54

### Morphologie

Gros culot plano-convexe de forme oblongue. Il est très dense, mais sa sensibilité magnétique est en revanche faible. Les flancs des deux extrémités de la face inférieure sont formés par l'empreinte du fond du foyer de forge. Très compacte et lisse, cette face possède quelques rares porosités. La face supérieure, très plane, n'est pas poreuse. Quelques zones se distinguent par un relief un peu plus accentué et par des porosités principalement débouchantes. Elles sont localisées sur l'extrémité la moins large et la plus épaisse, certainement là où débouchait l'air de la tuyère.

### Macrographie

Le culot a été tronçonné longitudinalement. La section est homogène et compacte. Les porosités sont principalement millimétriques et toujours rondes. Quelques-unes un, peu plus grosses (5 mm de diamètre), sont localisées principalement en périphérie inférieure. Au milieu de la surface supérieure, une petite zone (20 x 5 mm) renferme une matrice argilo-sableuse. À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

### Micrographie

La matrice fayalitique du culot est homogène, mais deux zones peuvent être distinguées. Dans le haut de la section, elle est pavimenteuse et fortement chargée en dendrites de wustite. La grande régularité des dendrites témoigne d'une grande homogénéité thermique. Dans la partie basse, la matrice est à grande lattes avec peu de wustite. Il existe un très petit semis métallique épars, généralement non réoxydé (anaérobiose), et des battitures globulaires ou lamellaires localisés sans zonage particulier. La petite zone située au milieu de la surface supérieure est un mélange de végétaux et d'argile. Il semble qu'il y ait des phosphures dans la scorie.

### Conclusion

Malgré sa masse, ce culot est très homogène. Ceci témoigne d'un travail très régulier, maîtrisé et standardisé générant peu de pertes en métal sous des températures relativement élevées à basse amplitude. Si les pertes en oxyde sont rares durant les premiers cycles de forge, elles deviennent plus importantes durant la seconde moitié des cycles. Ce culot ressemble beaucoup à l'échantillon 1213.3. Ce culot est issu d'une activité de forge d'élaboration classique.

## *Échantillon 1212.3*

**Métrologie**

Masse (g) : 478
Longueur (mm) : 136
Largeur (mm) : 74
Épaisseur (mm) : 36

**Morphologie**

Culot plano-convexe de forme oblongue. Très dense, il est en revanche très peu magnétique. Sa face supérieure est très plate et sans aucune porosité mis à part en périphérie où il existe quelques reliefs et des porosités. Toute la surface est recouverte d'un semis très serré de lamelles brillantes indéterminées (mica ?). La face inférieure est beaucoup plus accidentée et conserve de nombreuses porosités de l'ordre du millimètre. Aucune incrustation n'est visible.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement. La section de la scorie conserve une structure fayalitique très homogènes. De nombreuses porosités millimétriques toujours rondes couvrent la section à côté de quelques-unes verticales d'environ 1 cm essentiellement situées en partie basse (dégazage). À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

**Micrographie**

La matrice fayalitique de la section est très homogène. Elle est principalement constituée de gros pavés, mais elle possède aussi quelques îlots à lattes. Quelques petites dendrites de wustite se développent sans zonage particulier. Les pertes métalliques sous forme de billes sont également très peu importantes et jamais réoxydées à chaud. Les battitures généralement globulaires sont peu fréquentes.

**Conclusion**

Malgré sa masse, le culot est très homogène. Ceci témoigne d'un travail très régulier, maîtrisé et standardisé ne générant que peu de pertes en métal sous des températures relativement élevées à basse amplitude. Ce culot est ressemble beaucoup à l'échantillon 1151.2. Ce culot est caractérise une activité de forge d'élaboration classique.

## *Échantillon 1212.4*

**Métrologie**

Masse (g) : 428
Longueur (mm) : 116
Largeur (mm) : 91
Épaisseur (mm) : 48

**Morphologie**

Culot de forme oblongue qui est très concave et convexe. Relativement dense, il est surtout magnétique sur sa face inférieure. Sa face supérieure est couverte d'empreintes de fragments de charbon de bois. Les porosités, peu fréquentes, côtoient par endroits quelques incrustations de matières minérales. La face inférieure comporte également des empreintes de fragments de

charbon de bois, mais elle possède aussi des agglomérations d'argile rubéfiée relativement importantes. Elle est peu poreuse. À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné transversalement. Mis à part quelques zones périphériques très localisées plus fibreuses et certaines incrustations de fragments de charbon de bois, la structure est plutôt homogène. Tout le corps de la section et la partie haute sont compacts avec quelques porosités ovoïdales et millimétriques et quelques autres plus grosses et anguleuses n'excédant jamais 5 mm. La partie basse est en revanche constituée de grosses cavités anguleuses d'environ 1 cm et d'inclusions de fragments de charbon de bois.

**Micrographie**

Mis à part quelques zones périphériques, la matrice est homogène. Principalement constituée de fayalite à lattes, elle conserve très peu de wustite et quelques billes de métal non réoxydées à chaud. Ces lattes sont toutes orientées dans le même sens et possèdent souvent de très grandes dimensions. Elles montrent que les phases de chauffe étaient élevées et suivies d'un refroidissement lent et homogène. Des fragments de charbon de bois sont visibles au milieu et au fond de la section. Ils pourraient témoigner de l'existence de plusieurs phases de chauffe par ailleurs homogènes et similaires. Il existe également quelques zones argileuses.

**Conclusion**

Très peu d'oxyde et très peu de pertes métalliques sont passés en solution dans ce culot lors des travaux de forge. Ils témoignent donc d'un travail maîtrisé et standardisé à haute température où les ajouts silicatés et argileux sont importants.

---

## *Échantillon 1212.5*

**Métrologie**

Masse (g) : 172
Longueur (mm) : 89
Largeur (mm) : 63
Épaisseur (mm) : 26

**Morphologie**

Culot plat de forme oblongue. Sa face supérieure est plate sans aucune porosité. Une grosse dépression centrale signale cependant le lieu où débouchait l'air de la tuyère. Sa face inférieure est un peu plus accidentée et poreuse. Elle conserve quelques empreintes de fragments de charbon de bois. L'extrémité la plus épaisse présente un flanc abrupt où est agglomérée de l'argile rubéfiée. Il pourrait s'agir de la face de liaison avec la paroi du foyer de forge. D'une manière générale, ce culot est peu magnétique.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement. Plutôt homogène, la section comporte essentiellement des porosités millimétriques au contour plus ou moins anguleux. Localement, les cavités peuvent être beaucoup plus grosses et dépasser le centimètre. Dans les extrémités de la section, les porosités sont verticales, mais jamais débouchantes. À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

**Micrographie**

La matrice fayalitique est homogène et principalement à lattes. Beaucoup de battitures globulaires, parfois très grosses, sont plus ou moins dissoutes dans la scorie sous la forme de globule et de dendrite de wustite. Quelques battitures billes sont également visibles. Les pertes métalliques sont très peu fréquentes et généralement sous forme de billes éclatées non réoxydées à chaud. Dans le sédiment aggloméré à la scorie, il existe de nombreuses battitures lamellaires.

**Conclusion**

Ce culot témoigne de cycles de forge homogènes réalisés sous des températures moyennes avec une faible amplitude. À la différence d'une partie des culots étudiés pour ce site, il présente de nombreuses pertes en oxyde. Les pertes métalliques, généralement non réoxydées à chaud, sont toujours aussi peu fréquentes.

---

## *Échantillon 1213.6*

**Métrologie**

Masse (g) : 298
Longueur (mm) : 106
Largeur (mm) : 79
Épaisseur (mm) : 40

**Morphologie**

Culot de forme pratiquement ronde dont les faces sont légèrement convexes (fig. 137). Très dense, il n'est pas particulièrement magnétique. Sa face inférieure, très peu poreuse, conserve quelques empreintes de fragments de charbon de bois et quelques incrustations de matières minérales sous un aspect compact peu accidenté. Sa face supérieure est coulée et très dense. Elle ne comporte pas de porosités débouchantes hormis, au milieu, où il existe une grosse dépression très perturbée qui témoigne certainement du lieu où débouchait l'air de la tuyère.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement. La section du culot est plutôt hétérogène (fig. 137). De nombreuses porosités sont présentes dans toute la section. Généralement de formes ovoïdales, elles sont, soit millimétriques, soit centimétriques. Les plus grosses sont principalement localisées en partie haute. Une très grande cavité (60 x 8 mm) divise horizontalement la section sur les trois quarts de sa largeur. Dans le bas de la section, elle est associée à trois fragments de charbon de bois. Elle témoigne de l'existence de deux phases de travail espacées par un intervalle relativement important. À cette échelle, aucune perte métallique n'est visible.

**Micrographie**

La matrice fayalitique est très homogène et possède principalement une structure à lattes (fig. 137). Elle renferme très peu de wustite, pratiquement aucune battiture (une seul battiture lamellaire a été observée en partie supérieure) et un semis métallique très épars sous forme de billes non réoxydées à chaud (anaérobiose).

**Conclusion**

Ce culot montre deux phases de forgeage identiques axées sur des cycles thermiques moyennement élevés qui s'accompagnent de nombreux ajouts silicatés et argileux et de faibles pertes en oxyde et en métal.

## *Échantillon 1213.7*

### Métrologie

Masse (g) : 336
Longueur (mm) : 100
Largeur (mm) : 92
Épaisseur (mm) : 46

### Morphologie

Culot de forme pratiquement ronde dont les faces sont légèrement convexes. Pas spécialement magnétique, il possède une face inférieure caractéristique avec de nombreuses porosités millimétriques, des empreintes de fragments de charbon de bois et quelques incrustations de matières minérales. La face supérieure possède un aspect sensiblement similaire à la précédente à l'exclusion des zones argileuses qui sont inexistantes.

### Macrographie

Le culot a été tronçonné transversalement. La section est très hétérogène. Les porosités se situent dans toute la section sans zonage particulier. Elles sont de deux types. Les plus petites sont millimétriques et ovoïdales tandis que les plus grosses sont anguleuses et atteignent parfois 1 cm de côté. À cette échelle, aucun fragment métallique n'est visible, mais il existe un gros fragment de charbon de bois au milieu de la section.

### Micrographie

La matrice fayalitique du culot est très hétérogène. Cet aspect est accentué par de très nombreuses zones de scorie hydroxydée. La fayalite à lattes et à pavés contient des globules et des dendrites de wustite de tailles très diverses. Des battitures billes et globulaires sont également présentes à côté d'un semis métallique épars non réoxydé à chaud (anaérobiose). Toute la section est entourée d'un long filament de wustite qui indique un enrichissement extérieur en oxyde. Il est possible qu'il existe dans la scorie des phosphures et des sulfures. Le sédiment aggloméré contre la scorie contient de nombreuses battitures lamellaires et de nombreux fragments de charbon de bois.

### Conclusion

L'hétérogénéité du culot et la grande diversité des dendrites et des globules de wustite indiquent que la scorie est née de multiples cycles de chauffe réalisés à des températures très diverses, moyennement élevées et espacées par des intervalles courts. Toutefois, les pertes en oxyde et en métal sont toujours peu nombreuses et dénotent comme dans les autres échantillons des opérations de forge d'élaboration classiques.

## *Échantillon 1212.1*

### Métrologie

Masse (g) : 22
Longueur (mm) : 32
Largeur (mm) : 27
Épaisseur (mm) : 9

### Morphologie

Élément métallique parallélépipédique possédant deux grandes faces sensiblement parallèles et plates. Les petits côtés ne sont pas particulièrement travaillés. Cet élément pourrait être un rebut de forgeage.

### Macrographie

La pièce a été tronçonnée longitudinalement. La section de l'échantillon est compacte. Elle possède dans ses extrémités de petites échancrures qui sont probablement les reliquats de soudures de corroyage longitudinales. Leur persistance indiquerait que les extrémités de la section n'ont pas été martelées.

L'attaque au nital révèle les lignes de soudures longitudinales précédemment suggérées par les échancrures des extrémités. Elles assemblent au moins cinq feuilles. L'attaque dévoile également l'existence d'une soudure en gueule de loup dans le côté de plus épais. Cette même extrémité est aciérée sur environ 8 mm de profondeur. Le reste est ferritique.

### Micrographie

La section comporte une propreté inclusionnaire relativement bonne avec quelques inclusions fortement déformées, écrasées et remplies de fayalite avec des dendrites de wustite. Il ne subsiste aucun repli.

L'attaque au nital détermine que la pièce est principalement composée de ferrites équiaxes avec des très gros grains dans l'extrémité la plus fine, ce qui indique une importante et longue phase de chauffe sur ce côté de l'objet. L'extrémité opposée est légèrement plus carburée avec un acier à 0,1 % de carbone. Cette attaque met également en évidence de nombreuses soudures de corroyage longitudinales.

### Conclusion

Pseudo-*gromps* formé d'une accumulation de feuilles métalliques soudées les unes sur les autres avec des assemblages parfois compliqués en gueule de loup.

## *Échantillon 1212.2*

### Métrologie

Masse (g) : 38
Longueur (mm) : 33
Largeur (mm) : 28
Épaisseur (mm) : 26

### Morphologie

Scorie très magnétique de forme globalement sphérique qui pourrait être rapprochée d'un *gromps*. Ses faces sont uniquement poreuses dans les zones fracturées (fig. 138).

### Macrographie

La pièce a été tronçonnée transversalement (fig. 138). La section est composée d'une majorité de métal (70 % de la section). Celui-ci renferme encore de nombreuses inclusions de scorie largement ouvertes. Son pourtour est très légèrement déchiqueté, mais il conserve un plan de frappe sur un de ses flancs. Le pourtour de l'hydroxyde confirme cette hypothèse. Tout le fragment métallique est enveloppé dans de la scorie.

L'attaque au nital montre que le métal est majoritairement constitué de ferrite légèrement carburée au niveau du plan de frappe.

### Micrographie

Toute la masse métallique est noyée dans une matrice fayalitique à lattes sans wustite, mais avec quelques inclusions de fragments de charbon de bois et quelques battitures globulaires et lamellaires (fig. 138). Sur ces zones scorifiées, sont agglomérés du sédiment et de nombreuses battitures. Le métal est légèrement hydroxydé en périphérie. Il conserve des replis et de nombreuses inclusions constituées de lattes de fayalitique sans wustite identiques à la scorie du pourtour. Les contours de ces inclusions ne sont pas fortement écrasés. Quelques petits morceaux métalliques épars ne sont pas liés au gros fragment.

L'attaque au nital indique que la majorité de l'échantillon est formée de ferrite équiaxe à plus ou moins gros grains. Elle est utilisable, compte tenu de sa ductilité parfaite. Une zone périphérique et quelques fragments isolés attenants sont en revanche aciérés avec 0,5 % de carbone. Il n'y a aucune soudure.

### Conclusion

Le fait que cette masse de métal, encore peu épurée, soit englobée dans une gangue de scorie indique qu'il s'agit d'un *gromps* issu d'une phase d'épuration. Sa composition majoritairement ferritique rend cette masse de métal parfaitement transformable.

## *Échantillon 1213.1*

### Métrologie

Masse (g) : 28
Longueur (mm) : 30
Largeur (mm) : 26
Épaisseur (mm) : 11

**Morphologie**

Masse métallique carrée présentant une grande face plane et une autre légèrement convexe. Deux des quatre extrémités sont planes. Les deux autres sont plus arrondies. Il peut s'agir d'un rebut ou d'une chute de forgeage.

**Macrographie**

L'élément a été tronçonné de manière à ce que l'on observe en coupe les deux extrémités arrondies. La section renferme 90 % de métal et 10 % d'hydroxyde et de concrétion. La masse métallique ne présente pas de porosité ni d'inclusion, mais des contours irréguliers et des soudures longitudinales hydroxydées entre au moins quatre feuilles métalliques.

L'attaque au nital permet de visualiser trois lignes de soudures longitudinales. Elles sont soulignées par leur composition aciérée qui se différencie du reste ferritique. Cette configuration se retrouve dans les aciers modernes laminés. Ici, elle est probablement issue de la carburation volontaire des zones de soudures afin d'abaisser la température de fusion (le blanc soudant).

**Micrographie**

La section métallique de l'échantillon est très hydroxydée, notamment le long de son contour et des assemblages incomplètement réalisés. Le métal possède une bonne propreté inclusionnaire, mais il inclut quelques alignements longitudinaux de scorie qui témoignent du sens de corroyage. Il n'y a pas de repli dans le métal et aucune battiture en périphérie.

L'attaque au nital révèle une structure très homogène de ferrite équiaxe. De nombreuses lignes longitudinales de corroyage sont soulignées par des inclusions fayalitiques et par une composition aciérée entre 0,05 et 0,1 % de carbone. Cette configuration est typique d'un acier laminé actuel. Elle témoigne par conséquent d'un corroyage intense.

**Conclusion**

Fragment métallique ferritique formé à partir d'un assemblage de feuilles intensivement martelées perdu lors d'une phase de martelage. En ce sens, il s'agit d'un pseudo-*gromps*.

---

## *Échantillon 1213.2*

**Métrologie**

Masse (g) : 22
Longueur (mm) : 45
Largeur (mm) : 21
Épaisseur (mm) : 17

**Morphologie**

Masse métallique allongée présentant plusieurs plans de frappe répartis et agencés de manière aléatoire sur la totalité de la pièce (fig. 139).

**Macrographie**

La pièce a été tronçonnée longitudinalement. Le métal est largement hydroxydé et englobé dans du sédiment aggloméré (fig. 139). Le contour de l'hydroxyde reproduit la forme du métal qui est organisé autour de cinq plans de frappe joints par deux angles perpendiculaires et trois angles obtus. La direction des porosités et des inclusions montre un sens de corroyage oblique (45°).

Ces inclusions sont essentiellement présentes dans une moitié de la section. Elles dénotent une mauvaise épuration du métal.

L'attaque au nital détermine une section entièrement ferritique.

**Micrographie**

Le pourtour du métal est très hydroxydé, mais il n'est pas enveloppé dans une gangue de scorie (fig. 139). Il a une propreté inclusionnaire très inégale avec, à certains endroits, de grosses inclusions de scorie primaire renfermant une matrice fayalitique et des dendrites de wustite. Les inclusions sont globalement alignées en oblique (45°). Il existe quelques replis. Le sédiment aggloméré autour de l'hydroxyde contient de nombreuses battitures lamellaires.

L'attaque au nital révèle une composition entièrement ferritique. Il n'existe pas de ligne de soudure ni de corroyage. La masse métallique est par conséquent directement issue d'une loupe.

**Conclusion**

L'épuration inégale et incomplète de la masse métallique et les nombreux plans de frappe indiquent que cette pièce est un fragment de métal en cours d'épuration probablement issu d'un fragment de loupe. À ce titre, il peut être considéré comme une chute proche d'un *gromps* même s'il n'est pas englobé dans une gangue de scorie.

---

## *Échantillon 1213.3*

**Métrologie**

Masse (g) : 22
Longueur (mm) : 38
Largeur (mm) : 27
Épaisseur (mm) : 17

**Morphologie**

Masse métallique oblongue et assez fine qui présente sur une de ses faces un plan de frappe et, sur celle opposée, du sédiment aggloméré qui recouvre une surface plus accidentée (fig. 140).

**Macrographie**

La pièce a été tronçonnée longitudinalement. La section est, en périphérie, très hydroxydée et englobée dans une couche de sédiment aggloméré (fig. 140). Le métal ne couvre que 40 % de la section. Il est représenté par trois fragments séparés par deux lignes obliques (45°) d'hydroxyde. Celles-ci correspondent à des soudures mal assemblées et hydroxydées. Les trois fragments métalliques sont inégalement épurés, puisque celui de gauche conserve une bonne propreté inclusionnaire, tandis que les deux autres, au milieu et à droite, comportent des inclusions et des porosités.

L'attaque au nital montre que les 3 fragments sont essentiellement aciérés. Ils peuvent très localement être ferritiques.

**Micrographie**

La section très hydroxydée possède trois fragments métalliques avec des taux d'épuration différents. Dans le gros et le petit fragments (morceaux du milieu et de droite) le métal possède

une propreté inclusionnaire relativement médiocre avec des inclusions peu écrasées et remplies de fayalite et de dendrites de wustite qui témoignent d'une épuration incomplète (fig. 140). En revanche, dans le fragment de gauche, l'épuration est plus élevée. Il est possible d'observer des traces de corroyage longitudinales manifestes. IL n'y a pas de repli. Dans le sédiment aggloméré, de nombreux fragments de charbon de bois côtoient quelques battitures lamellaires.

L'attaque au nital révèle une composition relativement hétérogène qui ne dépend pas du taux d'épuration ni des trois fragments métalliques puisqu'elle est identique dans chacun d'eux. En effet, les trois morceaux sont constitués d'un acier à 0,1 % de carbone qui peut atteindre localement 0,2-0,3 % de carbone ou être décarburé jusqu'à la ferrite. Dans la partie correctement épurée (morceaux de droite), des lignes de corroyage longitudinales sont visibles. Leur orientation diffère radicalement des deux grosses soudures obliques et hydroxydées, visibles à l'échelle macrographique.

**Conclusion**

Pseudo-*gromps* composé d'un assemble de trois fragments métalliques qui possèdent des sens de corroyage différents et des taux d'épuration inégaux.

---

## *Échantillon 1213.4*

**Métrologie**

Masse (g) : 24
Longueur (mm) : 38
Largeur (mm) : 20
Épaisseur (mm) : 14

**Morphologie**

Élément métallique allongé présentant plusieurs plans de frappe associés à des zones scorifiées et/ou concrétionnées qui pourraient indiquer que cette pièce est proche d'un *gromps*.

**Macrographie**

La pièce a été tronçonnée longitudinalement. La section est essentiellement composée de métal (65 % de la section). Celui-ci présente une forme pratiquement rectangulaire avec trois plans de frappe. Une des extrémités est en revanche constituée par une échancrure semi-circulaire. Le métal comporte une propreté inclusionnaire moyenne. Il subsiste quelques inclusions et porosités sans organisation spécifique. En périphérie, il présente par endroit des contours déchiquetés issus d'hydroxydation périphérique importante qui reproduit la forme du métal. Elle possède la même forme que le fragment de métal. Sur trois côtés, il est aggloméré du sédiment.

L'attaque au nital révèle une composition homogène de ferrite, légèrement cémentée sur un des grands côtés.

**Micrographie**

A cette échelle, la propreté inclusionnaire du métal est médiocre. Même s'il ne subsiste pas de repli, la section conserve de nombreuses inclusions, légèrement déformées longitudinalement, et remplies de fayalite avec des globules et des dendrites de wustite. Toute la périphérie est fortement hydroxydée. Par endroits, de la scorie englobe le métal, ce qui indique que la pièce est tombée dans le foyer ou qu'elle était initialement enrobée de scorie.

L'attaque au nital révèle une section presque entièrement ferritique, équiaxe, légèrement aciérée en périphérie avec 0,4-0,5 % de carbone. Cette cémentation pourrait être conjoncturelle et liée à la chute de l'objet dans le foyer de forge dans une atmosphère réductrice. L'hypothèse de la cémentation est soutenue par la grosseur des grains de ferrite sous-jacents qui indique une importante et longue phase de chauffe sur ce côté de l'objet.

**Conclusion**

La pièce ne comporte pas un corroyage intense et possède encore de nombreuses inclusions de scorie peu déformées, ce qui signifie une épuration incomplète. Si plusieurs éléments montrent que cet élément est tombé durablement dans un foyer de forge, il semble davantage s'agir d'une chute porche d'un *gromps* issue d'un métal en cours d'épuration que d'une simple chute de forge perdue dans le foyer.

## *Échantillon 1151.1*

### Métrologie

Masse (g) : 18
Longueur (mm) : 42
Largeur (mm) : 8 à 15

### Morphologie

Tige métallique courte et trapue de section ronde (fig. 142). Une extrémité est élargie et aplatie sur le dessus tandis que l'autre est légèrement arrondie.

### Macrographie

La tige a été tronçonnée longitudinalement. La section est essentiellement métallique (fig. 142). Elle est entourée d'une couche d'hydroxyde homogène. Elle présente une très bonne propreté inclusionnaire. Il subsiste uniquement dans l'extrémité arrondie une ligne oblique d'inclusions ou de porosités hydroxydées. Il pourrait peut-être s'agir d'une soudure.

L'attaque au nital détermine une section entièrement aciérée et trempée.

### Micrographie

La propreté inclusionnaire de la section est élevée et homogène (fig. 142). Il subsiste uniquement quelques inclusions, principalement amorphes, alignées dans le sens longitudinal du corroyage.

L'attaque au nital montre que l'objet est entièrement constitué d'un acier homogène à 0,7 % de carbone totalement trempée sous la forme de troostite. Ce traitement thermique, relativement doux, permet à l'acier d'être moins cassant qu'un acier trempé sous la forme de martensite, un traitement thermique beaucoup plus brutal.

### Conclusion

L'homogénéité de la section montre qu'il s'agit d'une pièce particulière d'autant que, sur le site de l'Auribelle-basse, elle constitue l'unique exemplaire en acier trempé sur huit échantillons métalliques analysés. Vu sa morphologie, il pourrait s'agir d'un petit outil percutant, de précision, destiné à refouler la matière tel le dégorgeoir ou le poinçon en métallurgie du fer.

# *III.2. La forge d'un bâtiment isolé à la Madeleine II (Clermont l'Hérault, 34) au IVe-Ve siècle*

## UN FRAGMENT DE LOUPE

### *Échantillon 3291.2*

**Métrologie**

Masse (g) : 192
Longueur (mm) : 68
Largeur (mm) : 55
Épaisseur (mm) : 30

**Morphologie**

Masse métallique informe en partie scorifiée et hydroxydée qui présente par endroits de petits plans de frappe sans réelle organisation propre (fig. 152). Tout l'objet possède de nombreuses incrustations de matières végétales et d'argile rubéfiée. Dans des zones très localisées, il existe des amas de battitures lamellaires agglomérées.

**Macrographie**

La pièce a été tronçonnée longitudinalement (fig. 152). La section est presque entièrement métallique (plus de 95 %). Elle renferme de nombreuses grosses porosités hydroxydées, plus ou moins écrasées et refermées, et de gros replis en cours d'écrasement. Tout le pourtour est constitué d'hydroxyde et de sédiments agglutinés. Le contour métallique est généralement irrégulier, mais un des côtés de la section présente une surface plane qui signale un plan de frappe. Cette moitié de la section est d'ailleurs la mieux compactée et agglomérée. La section renferme donc un gradient d'épuration d'une extrémité à l'autre.

L'attaque au nital permet de révéler une composition chimique hétérogène. Le cœur de la section présente une zone aciérée couvrant 80 % de la surface. En revanche, toute la périphérie est ferrite (20 % de la section). La transition entre ces deux zones semble progressive.

**Micrographie**

Le métal comporte une bonne propreté inclusionnaire, mais il possède de nombreux replis et de grosses porosités hydroxydées aux multiples faciès d'écrasement (fig. 152). Du côté du plan de

frappe (côté droit de la section), il existe de nombreuses fissures intergranulaires, mais le métal est beaucoup plus compact avec moins de replis et de porosités. De rares inclusions amorphes et carrées y sont présentes et signalent probablement l'utilisation d'ajouts sableux. L'hydroxyde périphérique comporte beaucoup de battitures lamellaires et quelques fragments de charbon de bois. Localement, de la scorie est également agglomérée au contour métallique sous la forme d'une matrice fayalitique à lattes avec des dendrites de wustite.

L'attaque au nital détermine une structure hétérogène. Le cœur de la section renferme deux zones constituées d'un acier à 0,7 %-0,8 % de carbone trempé (bainites en aiguilles ; troostite). Une légère décarburation existe le long des fissures intergranulaires. Toute la périphérie de la section est décarburée jusqu'à la ferrite. Les transitions étant progressives, il existe un dégradé structural entre la périphérie ferritique et le cœur très carburé qui induit d'importantes zones aciérées entre à 0,2 et 0,4 % de carbone. La composition chimique et la forme des cristaux indiquent des recristallisations multiples qui témoignent de nombreux cycles de chauffe et de refroidissement.

**Conclusion**

Visiblement l'échantillon était probablement à l'origine un fragment de loupe entièrement aciéré, mais il a été décarburé en périphérie lors des nombreux passages en contexte de forge. Ces phases de chauffe étaient destinées à faciliter le compactage visible dans le gradient d'épuration, le plan de frappe et les fissures intergranulaires. Ces fissures témoignent, soit de la difficulté à mettre en forme une masse d'acier, soit de martelage à trop basse température. Ce morceau de métal correspond donc à un fragment de loupe aciéré, où l'épuration d'assèchement de la scorie interne a eu lieu, et où l'épuration de compactage est en cours.

# UN CULOT DE FORGE D'ÉPURATION

## *Échantillon 3291.1*

### Métrologie

Masse (g) : 290
Longueur (mm) : 78
Largeur (mm) : 71
Épaisseur (mm) : 68

### Morphologie

Culot légèrement oblong dont la surface supérieure est très poreuse et plate (fig. 151). Elle comporte de nombreuses incrustations végétales et minérales parfois très importantes. La face inférieure est convexe. Elle possède également de nombreuses incrustations de fragments de charbon de bois et une importante zone d'argile rubéfiée qui correspond probablement à un fragment de paroi. Très dense, elle est en revanche très peu magnétique en surface.

### Macrographie

Le culot a été tronçonné longitudinalement. La section comporte deux zones singulières (fig. 151). La première forme le corps du culot. Elle est principalement constituée d'une structure fibreuse avec des porosités anguleuses essentiellement supérieures à 5 mm qui se développent préférentiellement en partie basse. Dans la partie la plus compacte qui se situe en haut de la section, il existe quatre vestiges d'acier totalement hydroxydés (10 % de la section). La deuxième zone est accrochée à la surface inférieure du culot. Elle est formée d'un amas compact d'argile rubéfiée qui correspond très certainement à un fragment de la paroi du foyer de forge.

### Micrographie

La matrice très hétérogène du culot est constituée d'un très fin mélange d'argile et de scorie (fig. 151). Les rares zones fayalitiques importantes sont localisées du côté le plus effilé de la section, à l'opposé de l'agglomération argileuse. Elles livrent de très fines dendrites de wustite, synonymes d'un refroidissement rapide. Ces mêmes îlots de fayalite sont les seuls endroits où se concentrent quelques billes de métal partiellement réoxydées à chaud. Au sein de cette matrice très hétérogène, quatre morceaux d'acier totalement hydroxydés sont présents. Ils couvrent environ 10 % de la section. Que se soit en partie inférieure ou supérieure, le sédiment aggloméré autour de la scorie renferme un nombre très important de battitures lamellaires et de fragments de charbon de bois.

### Conclusion

Ce culot se singularise par sa structure complexe qui associe une matrice fayalitique et argileuse à quatre gros fragments d'acier hydroxydé. Ce culot est issu d'une activité métallurgique caractérisée par des cycles thermiques moyennement élevés, par d'importantes pertes en métal et par de nombreux ajouts de matières argileuses. Cette configuration pourrait être liée à des phases d'épuration de masses aciérées.

# *III.3. Le travail du fer à l'Ermitage (Paulhan, 34) aux VII$^{e}$ et VIII$^{e}$ siècles*

## LES PSEUDO-*GROMPS*

### *Échantillon 3408.1*

**Métrologie**

Masse (g) : 48
Longueur (mm) : 34
Largeur (mm) : 32
Épaisseur (mm) : 30

**Morphologie**

Petite sphère très magnétique essentiellement constituée d'hydroxydes ayant aggloméré de la scorie et du sédiment. Sa morphologie ressemble à un *gromps*.

**Macrographie**

La section est majoritairement formée d'hydroxyde dans lequel est disséminé un semis très épars de petits fragments métalliques. À la périphérie, un plus gros fragment légèrement rectangulaire renferme de très nombreuses inclusions d'hydroxyde. Toute la périphérie est complètement enrobée de scorie.

L'attaque au nital montre que le métal est entièrement aciéré (hypereutectoïde).

**Micrographie**

La section est essentiellement constituée d'un hydroxyde qui conserve sur toute sa surface les fantômes d'un acier hypereutectoïde. Localement, quelques fragments de scorie sont visibles avec une matrice fayalitique et des dendrites de wustite. Le fragment métallique conservé présente des contours qui témoignent d'une réoxydation à chaud, caractéristique d'une brûlure réalisée dans un foyer de forge. La propreté inclusionnaire de ce fragment est bonne puisqu'il ne subsiste que quelques très rares et fines inclusions fayalitiques. Tout le contour est complètement enrobé de scorie.

L'attaque au nital révèle un fragment métallique en acier hypereutectoïde, parfois légèrement décarburé en périphérie.

**Conclusion**

Si ce fragment d'acier hypereutectoïde est enrobé de scorie, il est probablement tombé dans le foyer de forge au cours du travail d'un métal, semble-t-il, déjà correctement épuré et compacté. Il ne s'agit donc pas d'un *gromps*, mais d'un pseudo-*gromps*, grosse perte métallique enrobée de scorie qui se forme lors de phases de forge post-épuration.

---

## *Échantillon 3421.3*

**Métrologie**

Masse (g) : 166
Longueur (mm) : 70
Largeur (mm) : 55
Épaisseur (mm) : 25

**Morphologie**

Élément massif et très magnétique de morphologie ovoïdale dont la périphérie est constituée de scorie dense et de matières minérales agglomérées (fig. 160).

**Macrographie**

Cet élément a été tronçonné longitudinalement (fig. 160). La section comporte trois structures distinctes. Au centre, il existe un gros fragment métallique très compact dont le cœur est en cours d'hydroxydation. Il est enrobé d'une épaisse couche d'hydroxyde, laquelle est également enveloppée dans une matrice de scorie homogène, mais poreuse avec des cavités millimétriques et anguleuses. Le contour de l'hydroxyde ne présente pas de forme particulière.

L'attaque au nital révèle un fragment métallique aciéré.

**Micrographie**

Tout le pourtour de la section est constitué d'une matrice fayalitique avec des globules de wustite issus de nombreuses battitures globulaires, parfois très grosses, et de quelques billes éparses de métal partiellement réoxydées à chaud. Aucune battiture lamellaire n'est visible (fig. 160). De nombreux fragments de charbon de bois sont situés dans cette matrice. Au milieu, il existe une grande zone hydroxydée, vestige d'un gros fragment métallique dont il reste encore un important fragment en cours d'oxydation. Sa propreté inclusionnaire est difficilement évaluable car de nombreuses zones hydroxydées s'y développent, mais elle semble bonne.

L'attaque au nital révèle un fragment métallique essentiellement hypereutectoïde légèrement décarburé en périphérie jusqu'à l'eutectoïde. Quelques zones ont des faciès de troostite (bainite nodulaire), témoins d'un refroidissement rapide. S'il est certain que le fragment métallique a séjourné dans le foyer de forge, le faciès de trempe n'est pas volontaire. Il n'y a pas de vestiges de soudures

**Conclusion**

Cet échantillon est un fragment d'acier hypereutectoïde, semble-t-il de bonne qualité inclusionnaire, tombé dans le foyer au cours du forgeage d'une pièce déjà assez correctement compactée. Il ne s'agit donc pas d'un *gromps*, mais d'un pseudo-*gromps*, grosses pertes métalliques enrobées de scorie constituées lors de phases de forge post-épuration.

## *Échantillon 3421.1*

**Métrologie**

Masse (g) : 262
Longueur (mm) : 80
Largeur (mm) : 70
Épaisseur (mm) : 45

**Morphologie**

Culot plano-convexe de forme pratiquement ronde (fig. 158). Sa face inférieure, très poreuse, conserve de nombreuses empreintes de fragments de charbon de bois atteignant parfois le centimètre. Quelques-uns sont conservés. La face supérieure possède un aspect accidentée, pratiquement coulée et très localement poreux. Cependant, l'axe de la tuyère ne peut pas être déterminé. Quelques zones sont constituées d'une mélasse de matières végétales et minérales. Le culot est globalement peu magnétique.

**Macrographie**

Le culot a été tronçonné longitudinalement (fig. 158). La section est plutôt homogène. S'il existe un épais semis de cavités millimétriques plutôt anguleuses, la section présente également de plus grandes porosités, parfois verticales, essentiellement situées dans la partie inférieure. Dans la zone supérieure, il existe des inclusions d'une mélasse de matières végétales et minérales.

**Micrographie**

La section est constituée d'une structure fayalitique à lattes très localement associée à de l'argile (fig. 158). La wustite, essentiellement sous la forme de globule, est principalement issue d'un important semis de battitures globulaires et en billes. Des petits fragments métalliques non-réoxydés à chaud sont également présents, mais en moindre quantité. Dans la partie supérieure, il existe quelques inclusions de fibres végétales.

**Conclusion**

Ce culot représente des cycles de forge à moyennes températures où sont principalement exécutés des travaux standards liés à la chauffe et la mise en forme d'objets dont le stade de fabrication est déjà avancé. Plus temporairement, ces phases de forgeage semblent accompagnées d'ajouts argileux.

## *Échantillon 3423.1*

**Métrologie**

Masse (g) : 2864
Longueur (mm) : 180
Largeur (mm) : 130

Épaisseur (mm) : 120

**Morphologie**

Très gros culot avec des faces largement convexes (fig. 159). Très peu magnétique, il possède sur sa face inférieure un important fragment aggloméré de paroi de foyer de forge. Mis à part ce morceau, toutes les faces sont sensiblement similaires. Elles sont plutôt poreuses et réunissent de très nombreuses incrustations de fragments de charbon de bois. Sur la face supérieure, des zones coulées indiquent des surchauffes ponctuelles, mais l'axe de la tuyère n'est pas déterminable.

**Macrographie**

Ce culot a été tronçonné transversalement afin que l'on observe une section qui comprend la paroi agglomérée du foyer de forge (fig. 159). Durant cette opération, la partie inférieure de cette paroi a été cassée au niveau d'une stratification visible dans la répartition des inclusions de fragments de charbon de bois et dans celle des cavités horizontales. La fragilité de cette zone résulte essentiellement de sa grande porosité et des très nombreux fragments de charbon de bois qui sont incrustés sur 4 cm de profondeur. Le reste de la section renferme de nombreuses porosités essentiellement millimétriques et ovoïdes pouvant atteindre très localement le centimètre. La majorité du culot est donc homogène, mais, vu sa grosseur, il doit représenter de multiples phases de forge.

**Micrographie**

Il existe de nombreux fragments de charbon de bois, reliquat d'une importante stratification du culot (fig. 159). L'ensemble des phases possède une matrice fayalite (lattes et pavés), équivalente et homogène, où se développent principalement des dendrites de wustite. Il existe toujours un semis épars de fragments métalliques non réoxydés à chaud (anaérobiose), mais, à la différence des autres culots de ce site, ce culot renferme un nombre très important de battitures lamellaires parfois grandes (3 mm). Elles se trouvent dans tous les cycles de forge, à côté d'une minorité de battitures globulaires et en billes.

**Conclusion**

Ce gros culot de forge représente de multiples phases toujours fondées sur la chauffe à haute température d'objets métalliques déjà épurés. L'existence de battitures parfois très grandes montre que certaines pièces martelées étaient volumineuses et plates. En ce sens, il diffère des autres échantillons étudiés sur le site.

---

## *Échantillon 3423.2*

**Métrologie**

Masse (g) : 256
Longueur (mm) : 90
Largeur (mm) : 67
Épaisseur (mm) : 34

**Morphologie**

Culot de forme oblongue. Une stratigraphie pourrait indiquer l'existence de deux phases distinctes de chauffe. Sa face inférieure est peu poreuse et peu accidentée. Elle agglomère une zone importante de mélasse végétale et minérale. La face supérieure est pratiquement coulée. Les

quelques cavités, toujours importantes (entre 5 mm et 10 mm), sont situées à une extrémité qui pourrait être le lieu où débouchait la tuyère. Le culot est très peu magnétique.

**Macrographie**

Ce culot a été tronçonné transversalement. La section de scorie est divisée par une très importante cavité centrale de 40 x 25 mm. Elle sépare deux phases distinctes de chauffe suggérées par la stratigraphie extérieure. Si la seconde phase semble moins volumineuse et plus compacte, les deux phases sont identiques. Il existe une matrice compacte essentiellement argilo-sableuse dans l'extrémité la plus volumineuse de la section (à gauche). Les cavités sont toujours millimétriques et souvent verticales, ce qui signifie un dégazage important.

**Micrographie**

Une structure compacte de matières argilo-sableuse plus ou moins scorifiées est localisée dans l'extrémité la plus volumineuse de la section (à gauche). Mis à part cela, les deux phases sont constituées d'une matrice homogène de fayalite à grandes lattes (400 µm) avec quelques dendrites et globules de wustite. Les oxydes passés en solution demeurent assez rares, comme les petits éclats de métal toujours non réoxydés (anaérobiose). Dans le sédiment aggloméré autour du culot, il existe quelques battitures lamellaires.

**Conclusion**

Ce culot double représente deux phases de forge assez courtes, réalisées sous une température assez élevée avec un refroidissement lent. Le peu de pertes en oxyde et en métal montre qu'il s'agit, dans les deux cas, de phases de travail proche de la finition

# IV. LES DEMI-PRODUITS DES ÉPAVES MÉDITERRANÉENNES

# *Mentions particulières*

Les descriptions métallographiques sont organisées par groupes d'épaves et ensuite par types de barre (Long *et al.* 2005 ; Djaoui, 2003 ; Coustures *et al.* 2006). À l'intérieur de ces types, les échantillons sont classés par ordre croissant de numérotation, laquelle est fondée sur le nom de l'épave qui renfermait la barre, couplée à un numéro d'identification.
Pour éviter les répétitions et dans la mesure du possible, la morphologique générale du type est décrite au début de chaque sous-chapitre. Elle est complétée par des particularités morphologiques quand cela est nécessaire.
Sauf mention contraire, une des deux faces principales et une des deux faces latérales de tous les demi-produits, dont la jonction forme un angle sensiblement perpendiculaire, ont été usinées à la fraise sur toute leur longueur afin que l'on observe plus précisément la mise en forme à l'échelle macrographique. Ainsi, la section étudiée à l'échelle micrographique est prélevée de manière significative et pertinente pour recueillir le maximum d'informations (soudures, inclusions, porosités, teneurs en carbone, etc.).
L'analyse macrographique est basée sur l'ensemble des faces usinées de la barre, tandis que l'analyse micrographique traite uniquement de la section prélevée généralement dans la face principale usinée.
Les estimations concernant la propreté inclusionnaire et les alliages ferreux sont réalisées à partir des dessins des faces usinées et des sections polies. Elles sont exprimées en pourcentage par rapport à l'ensemble des surfaces usinées pour les macrographies ou par rapport à la surface de la section polie pour les micrographies.

# *IV.1. Une épave de la transition II$^{e}$-I$^{e}$s. av. J.-C. : Bagaud 2 (Hyères, 83)*

## TYPE ASSIMILÉ 2M

### *Morphologie générale*

Barre de fer allongée avec une section pratiquement carrée. Si l'ensemble est très corrodé et si toutes les surfaces originelles ne sont pas visibles, il semble d'après les observations faites lors de la découverte (Conversation avec L. Long) et d'après la forme de la pièce, que les faces ont été martelées pour former des surfaces planes. Il reste cependant difficile de savoir si les extrémités ont été mises en forme. Il n'existe pas d'indice témoignant d'un pas de martelage. Aucune trace d'estampille n'est visible. Ces barreaux métalliques présentent d'importantes similitudes morphologiques avec les formes 2M de typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer (*Cf. supra*).

### *Échantillon BG2.2*

**Numéro d'inventaire**

BG2 8122

**Métrologie**

Masse (g) : 2644
Longueur (mm) : 574
Largeur (mm) : 27 (+/- 3)
Épaisseur (mm) : 27 (+/- 3)

**Particularités morphologiques**

La barre est légèrement effilée sur une extrémité, mais ceci pourrait être dû à une conservation différentielle (fig. 186).

**Macrographie**

Les deux faces usinées ont une faible propreté inclusionnaire avec de très nombreuses inclusions et porosités qui se développent principalement dans le tiers d'une extrémité et le long du cœur des deux faces (fig. 186 et 188). Ce dernier aspect signale clairement un gradient d'épuration. Le taux de compactage est peu élevé et par endroits souligné par le développement de zones de

corrosion actuelles. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital montre que ce demi-produit est formé d'une unique loupe entièrement ferritique (100 % des deux faces usinées).

**Conclusion**

Les données recueillies signalent une grande similitude entre cet individu et les échantillons étudiés du type 2M des Saintes-Maries-de-la-Mer. C'est en effet un demi-produit allongé façonné à partir d'une unique loupe essentiellement ferritique et moyennement compactée.

---

## *Échantillon BG2.3*

**Numéro d'inventaire**

BG2 8134

**Métrologie**

Masse (g) : 2168
Longueur (mm) : 570
Largeur (mm) : 27 (+/- 3)
Épaisseur (mm) : 27 (+/- 3)

**Macrographie**

Les deux faces usinées possèdent une faible propreté inclusionnaire avec de très nombreuses inclusions et porosités qui se développent principalement dans le tiers d'une extrémité et le long du cœur des deux faces (fig. 187 et 188). Ce dernier aspect signale clairement un gradient d'épuration. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital montre un demi-produit formé d'une unique loupe principalement ferritique (92 % des deux faces usinées) avec une zone aciérée dans chacune de ses deux extrémités.

**Micrographie**

La section micrographique correspond au centre de la barre (fig. 187 et 188). Celle-ci est d'une propreté inclusionnaire relativement bonne, mais pas excellente. Les inclusions sont principalement remplies de fayalite avec des globules de wustite. De formes très allongées, elles se trouvent préférentiellement dans le cœur de la pièce. Leur répartition signale un gradient d'épuration des deux bords opposés vers le cœur de la pièce. Il n'y a aucun repli, mais un semis épars de micro-porosités existe dans toute la section.

L'attaque au nital révèle une section entièrement ferritique (100 % de la section) composée de grains de taille moyenne et homogène sans écrouissage. Très localement en surface, on note une légère cémentation superficielle avec une structure comprise entre 0,05 et 0,1 % de carbone.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

**Conclusion**

Les données recueillies signalent une grande similitude entre cet individu et les échantillons étudiés du type 2M des Saintes-Maries-de-la-Mer. C'est en effet un demi-produit allongé façonné à partir d'une unique loupe essentiellement ferritique et moyennement compactée.

## *Échantillon BG2.4*

**Numéro d'inventaire**

BG2 81 14

**Métrologie**

Masse (g) : 2180
Longueur (mm) : 558
Largeur (mm) : de 22 à 30
Épaisseur (mm) : de 24 à 30

**Macrographie**

Cet échantillon offre une propreté inclusionnaire plus élevée que celle observée dans les autres demi-produits étudiés et associés au type 2M des Saintes-Maries-de-la-Mer (fig. 186 et 188). Les porosités et les inclusions sont en effet moins nombreuses, mais elles conservent la même répartition que dans les autres échantillons étudiés : dans les extrémités et le long du cœur de la barre. Leur répartition signale un gradient d'épuration des deux bords opposés vers le cœur de la pièce. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital indique que la barre est très majoritairement ferritique (100 % des deux faces usinées) même si localement persistent quelques très petites zones aciérées (moins de 1 % des deux faces usinées).

**Conclusion**

Les données recueillies signalent une grande similitude entre cet individu et les échantillons étudiés du type 2M des Saintes-Maries-de-la-Mer. C'est en effet un demi-produit allongé façonné à partir d'une unique loupe essentiellement ferritique et moyennement compactée.

# TYPES ASSIMILÉS 4C

Ces barreaux métalliques présentent d'importantes similitudes morphologiques avec les formes 4C et 5C selon la typologie des barres des Saintes-Maries-de-la-Mer (*Cf. supra*).

## *Échantillon BG2.1*

**Numéro d'inventaire**

BG2 8145

**Métrologie**

Masse (g) : 2478
Longueur (mm) : 249 (+/- 3)
Largeur (mm) : 65 (+/- 6)
Épaisseur (mm) : 38 (+/- 3)

**Morphologie**

Barreau métallique massif et trapu avec une section rectangulaire (fig. 198). Si l'ensemble est très corrodé et si toutes les surfaces originelles ne sont pas visibles, il semble d'après les observations faites lors de la découverte (Conversation avec L. Long) et d'après la forme de la pièce, que les faces ont été martelées pour former des surfaces planes de la même manière que pour le type 4C des Saintes-Maries-de-la-Mer.

**Macrographie**

L'usinage de la pièce confirme le développement important de la corrosion (fig. 198 et 199). Les extrémités sont en effet totalement hydroxydées comme le cœur de la face principale où se trouve une importante zone rongée. L'alliage ferreux conserve une propreté inclusionnaire correcte, mais pas particulièrement élevée. Les porosités et les inclusions se développent dans l'ensemble du produit sans zonage particulier. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 16 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital révèle une composition entièrement aciérée (100 % des deux faces usinées). Ceci pourrait expliquer l'importante corrosion de la pièce.

**Conclusion**

Les données recueillies signalent une grande similitude entre cet individu et les échantillons étudiés du type 4C des Saintes-Maries-de-la-Mer caractérisés comme étant des demi-produits courts, fabriqués à partir d'une unique loupe plus ou moins aciérée et moyennement compactée. Ici, le barreau est complètement aciéré comme l'échantillon SM9.11 des Saintes-Maries-de-la-Mer.

## *Échantillon BG2.5*

### Métrologie

Masse (g) : 1570
Longueur (mm) : 243
Largeur (mm) : de 42 à 58
Épaisseur (mm) : de 30 à 45

### Morphologie

Ce petit barreau métallique de section rectangulaire est très corrodé (fig. 198). Même si les faces ne sont pas correctement observables, il semble qu'elles aient été martelées pour former des surfaces régulières (Conversation avec L. Long). Les angles entre les faces pourraient être initialement sensiblement perpendiculaires et planes, identiques au type 4C des Saintes-Maries-de-la-Mer.

### Macrographie

Le taux de compactage des deux faces est peu élevé (fig. 198 et 199). Il subsiste en effet de multiples porosités/inclusions encore très largement ouvertes avec des faciès d'écrasements multiples. Certaines d'entre elles pratiquement refermées sont très allongées avec des tracés sinusoïdaux. Si leur importance est certainement accentuée par la corrosion actuelle, leur nombre et leur volume restent très élevés. Elles se répartissent sans zonage particulier. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 9 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital montre que ce demi-produit est constitué d'une unique loupe hétérogène où se développent légèrement plus de zones aciérées (57 % des deux faces usinées) que de zones ferritiques sans zonage particulier. Les zones carburées ne semblent pas consécutives à une cémentation, mais davantage correspondre à l'hétérogénéité initiale de la loupe.

### Conclusion

Pour l'instant, la quantité et la qualité des études menées sur le lot du type 5C des Saintes-Maries-de-la-Mer ne permettent pas de déterminer précisément et sûrement les récurrences associées à ce type. Cependant, le barreau étudié ici dévoile des caractéristiques équivalentes à SM6.2, le seul individu du type 5C étudié. Dans les deux cas, il s'agit d'une loupe unique et hétérogène qui est très sommairement compactée en forme de « saumon ».

# *IV.2. Les épaves du Haut-Empire des Saintes-Maries-de-la-Mer (13)*

## TYPE 1M

### *Morphologie générale*

La barre de type 1M est un demi-produit moyennement allongé en alliage ferreux avec une section rectangulaire de 4 x 2 cm (+/- 0,5) et une longueur comprise entre 50 et 60 cm (fig. 183). Toutes ses faces sont martelées pour aménager des surfaces planes. Les deux extrémités de la barre sont également travaillées pour former des plans. Sur l'ensemble des échantillons étudiés, aucun indice ne suggère différentes zones de martelage ou une fréquence dans les zones martelées. Ce type porte parfois l'estampille n°5 de la série Djaoui.

### *Échantillon SM9.5*

**Numéro d'inventaire**

SM9.99.239

**Métrologie**

Masse (g) : 3664
Longueur (mm) : 665 (+/- 5)
Largeur (mm) : 47 (+/- 3)
Épaisseur (mm) : 25 (+/- 2)

**Particularités morphologiques**

La corrosion des surfaces est avancée. Dans une extrémité rongée par l'hydroxyde, une corrosion différentielle linaire souligne probablement des lignes de corroyage longitudinales. Aucune estampille n'est visible.

**Macrographie**

A cette échelle, la barre présente très peu d'inclusions ou de porosités (fig. 176 et 177). En revanche, de très nombreuses zones hydroxydées sont principalement localisées à proximité des surfaces et dans l'extrémité rongée par la corrosion. Les inclusions et les porosités issues de la loupe initiale sont essentiellement alignées dans la partie centrale. À cette échelle, l'ensemble des

inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital signale que les zones aciérées sont largement minoritaires (16 % des deux faces usinées) et se situent généralement dans les extrémités.

**Conclusion**

Cet échantillon est analogue aux autres barres de ce type. Il est formé à partir d'une unique loupe correctement compactée qui conserve quelques zones aciérées dans les extrémités.

---

## *Échantillon SM9.6*

**Numéro d'inventaire**

SM9.99.244

**Métrologie**

Masse (g) : 3580
Longueur (mm) : 610 (+/- 1)
Largeur (mm) : 44 (+/- 1)
Épaisseur (mm) : 27 (+/- 3)

**Particularités morphologiques**

La corrosion des surfaces est homogène. L'hydroxyde conserve encore leur aspect originel où aucune estampille n'est visible.

**Macrographie**

D'un point de vue macrographique, la barre présente une mauvaise propreté inclusionnaire très peu accentuée par les hydroxydations actuelles (fig. 178 et 182). Les inclusions se développent principalement le long du cœur de la barre. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital signale des parties aciérées principalement localisées dans les extrémités (comme pour les échantillons SM9.8 et 9). Elles couvrent 48 % des deux faces usinées. Par rapport aux zones aciérées, les zones ferritiques ont une plus mauvaise qualité inclusionnaire comparable aux échantillons SM9.8 et 9.

**Micrographie**

La section étudiée à l'échelle micrographique correspond à l'extrémité localement carburée de cette barre.

Sur 2 cm de profondeur à partir du bord de l'extrémité, il existe une propreté inclusionnaire moyenne avec des porosités et des inclusions principalement amorphes (fig. 178 et 182). Ensuite, le compactage de la barre devient beaucoup plus correct, comme dans tout le reste de la section. Dans cette grande partie mieux épurée, il y a quelques micro-inclusions essentiellement amorphes, mais parfois le remplissage est constitué de fayalite avec quelques globules de wustite. Cette section livre peu de replis, toujours bien fermés. De manière générale, elle est mieux compactée vers le cœur de la barre. Quelques zones très localisées possèdent des chapelets de micro-inclusions amorphes synonymes d'une agglomération métallique incomplète. À cette

échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 0,6 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 1*.

L'attaque au nital montre que la moitié de la section est composée d'un acier presque entièrement eutectoïde à 0,8 % de carbone (44 % de la section). L'autre partie majoritaire possède une structure à 0,3 % de carbone (33 % de la section) associée à la précédente par une limite douce. Enfin, on trouve une petite partie ferritique non écrouie (23 % de la section) compactée comme l'acier. De nombreuses petites soudures secondaires de corroyage sont associées à l'agglomération des porosités de la loupe. Dans les parties très aciérées, des faciès de trempe (troostite) existent localement. Aucune décarburation n'est visible en périphérie où certaines parties sont même cémentées.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

**Conclusion**

La propreté inclusionnaire de la barre est très élevée à l'échelle macrographique et micrographique, mais son taux de compactage est moins précis que celui des barres du type 1L comme les échantillons SM10.1 et SM10.2. Par ailleurs, cette barre est élaborée à partir d'une unique loupe, mi-ferritique mi-aciérée.

---

## *Échantillon SM9.7*

**Métrologie**

Masse (g) : 2510
Longueur (mm) : 540 (+/- 2)
Largeur (mm) : 44 (+/- 2)
Épaisseur (mm) : 26 (+/- 2)

**Particularités morphologiques**

La corrosion des faces est homogène, mais certaines zones ont totalement éclaté. Aucune estampille n'est visible.

**Macrographie**

La barre possède très peu de porosités ou d'inclusions (fig. 176 et 177). Elle conserve en revanche de nombreuses parties hydroxydées qui forment parfois des chapelets sans zonage particulier. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital indique que la barre est très largement aciérée (69 % des deux faces usinées) sans répartition particulière.

**Conclusion**

Cette barre montre à nouveau que le type 1M est généralement constitué d'une unique loupe très correctement compactée et parfois largement aciérée.

## *Échantillon SM9.8*

**Numéro d'inventaire**

392

**Métrologie**

Masse (g) : 4000
Longueur (mm) : 667 (+/- 2)
Largeur (mm) : 41 (+/- 3)
Épaisseur (mm) : 20 (+/- 1)

**Estampille**

Série Djaoui n°6 : Association d'1 cartouche rectangulaire (23 x 6 mm) sans inscription visible et d'1 timbre rond (9 mm de diamètre) apposé au niveau du milieu du cartouche. L'ensemble de l'estampille est localisé sur une extrémité d'une des deux faces principales. Dans le timbre rond, il existe une sorte d'« E » où la barre du milieu est débordante, longue et disposée en travers.

**Particularités morphologiques**

Malgré leur corrosion importante, l'ensemble des surfaces est d'une régularité importante (fig. 179 et 182). Dans une des faces principales, une corrosion différentielle linaire souligne des lignes de corroyage longitudinales.

**Macrographie**

La barre contient des inclusions et des porosités essentiellement dans son cœur (fig. 179 et 182). Leur importance est accentuée par le développement de zones hydroxydées actuelles. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital montre que la barre est principalement carburée (34 % des deux faces usinées) dans ses deux extrémités comme dans les échantillons SM9.6 et SM9.9. Comparativement aux zones aciérées, les zones ferritiques sont de très mauvaise qualité inclusionnaire comme pour les échantillons SM9.6 et SM9.9.

**Micrographie**

La section étudiée à l'échelle micrographique correspond au milieu de la barre où se situe une ligne carburée le long du cœur : il s'agit soit d'une soudure, soit d'un puits de diffusion gazeux réducteur totalement refermé.

La section possède une très bonne propreté inclusionnaire interne qui diminue nettement aux abords des surfaces où de très grosses zones sont hydroxydées (fig. 179 et 182). Les micro-inclusions sont généralement amorphes et plus rarement remplies de fayalite avec des dendrites de wustite. Les micro-inclusions se concentrent principalement au milieu de la barre. Il n'y a pas de repli. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 0,6 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 1*.

L'attaque au nital révèle une structure principalement ferritique (76 % de la section) qui possède des petits ou des très petits grains non écrouis sans macle. Au milieu, il existe une zone carburée qui peut localement atteindre 0,7 % de carbone. Par endroits, elle possède des faciès de trempe (troostite). Toutes les transitions structurales sont douces. Une soudure très bien réalisée est

présente dans le sens longitudinal. Son tracé suit sensiblement la zone centrale aciérée. Cette soudure correspond probablement à une grosse porosité totalement refermée qui était originellement un puits de diffusion gazeux. Ceci explique la forte carburation des contours initiaux. Aucun élément ne permet de conclure à une soudure inter-loupes.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

**Conclusion**

Cette barre met en évidence un travail exceptionnel de compactage et d'épuration qui explique la qualité aussi élevée de la propreté inclusionnaire dans le cœur de cette barre. La loupe primitive comportait de nombreuses porosités et inclusions qui ont été éliminées ou très largement résorbées malgré une hétérogénéité structurale parfois très prononcée.

---

## *Échantillon SM9.9*

**Numéro d'inventaire**

363

**Métrologie**

Masse (g) : 4140
Longueur (mm) : 583 (+/- 1)
Largeur (mm) : 42 (+/- 0)
Épaisseur (mm) : 26 (+/- 1)

**Estampille**

Série Djaoui n°6 : Association d'1 cartouche rectangulaire sans inscription visible (23 x 6 mm) à 1 timbre rond apposé au niveau du milieu du cartouche. L'ensemble de l'estampille est localisé dans l'extrémité d'une des deux faces principales. Dans le timbre rond, il existe une sorte d'« E » où la barre du milieu est débordante, longue et disposée en travers.

**Particularités morphologiques**

Il faut relever la régularité des surfaces conservées dans la couche de corrosion importante et généralisée à l'ensemble de la barre (fig. 180 et 182).

**Macrographie**

Les porosités et les inclusions sont principalement présentes dans le cœur de la barre sous la forme d'un alignement longitudinal (fig. 180 et 182). Dans les extrémités, d'importantes zones hydroxydées se sont développées certainement à partir de zones moins bien compactées. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 3 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital signale que les zones aciérées (32 % des deux faces usinées) sont principalement disposées dans les deux extrémités de la barre comme les échantillons SM9.6 et SM9.8.
L'alignement central des porosités se développe uniquement dans la partie ferritique. Quant aux deux zones aciérées, elles regroupent la majorité de la corrosion actuelle et, pour l'une d'elles, une zone moins bien agglomérée avec des fissures et des inclusions intergranulaires.

**Micrographie**

La section étudiée à l'échelle micrographique correspond au centre de la barre où peuvent être observées une partie moins bien compactée et la jonction entre une zone ferrite et une autre en acier.

D'une manière générale, la propreté inclusionnaire de la section est très homogène et de très haute qualité (fig. 180 et 182). Il subsiste principalement des inclusions amorphes et très localement (dans la partie aciérée) une fissure intergranulaire remplie d'amorphe. Il n'y a aucun repli. Au centre, cependant, se trouve une zone moins bien compactée avec des inclusions souvent remplies de fayalite et de globules de wustite. Cette zone est parfois oxydée. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 1*.

L'attaque au nital indique que la section est principalement ferritique (71 % de la section) avec en partie interne de très gros grains et en périphérie de plus petits grains parfois même très légèrement écrouis. L'acier, présent dans une partie de la section, forme un dégradé de la ferrite à 0,7 % de carbone avec de la perlite lamellaire. La zone très aciérée (0,7 % de C) couvre 22 % de la section et contient de très gros grains tandis que les parties aciérées intermédiaires renferment des très petits grains synonymes d'un martelage puissant et durable. La partie ferritique compte très localement des zones aciérées. Certaines porosités présentent des décarburations périphériques faisant penser à un corroyage interne très important. Ce corroyage se retrouve dans quelques soudures, très localement visibles dans le sens longitudinal, qui correspondent à d'anciennes porosités totalement refermées.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

**Conclusion**

Cette barre est très proche des échantillons SM9.6 et SM9.8. Il témoigne d'un travail de mise en forme exceptionnel où l'hétérogénéité initiale de la loupe ne pose aucun problème de compactage.

---

## *Échantillon SM9.10*

**Numéro d'inventaire**

335

**Métrologie**

Masse (g) : 4582
Longueur (mm) : 631 (+/- 1)
Largeur (mm) : 40 (+/- 1)
Épaisseur (mm) : 26 (+/- 2)

**Estampille**

Série Djaoui n°1 ou 5(?) : Un cartouche rectangulaire sans inscription visible (23 x 6 mm) est localisé dans l'extrémité d'une des deux faces principales. Il se pourrait qu'il soit associé à 1 timbre rond apposé au niveau du milieu du cartouche comme pour SM9.8 et SM9.9.

**Particularités morphologiques**

Cette barre conserve des surfaces très régulières malgré une corrosion très importante sur une des deux faces principales (fig. 181 et 182).

**Macrographie**

Les porosités et les inclusions sont relativement peu présentes à cette échelle (fig. 181 et 182). En revanche, de très nombreuses zones hydroxydées se développent à l'emplacement d'anciennes zones peu compactées. Elles se trouvent principalement dans la tranche de la barre et dans une extrémité déterminée comme étant ferritique après attaque au nital. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 3 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital montre que la barre est principalement aciérée (82 % des deux faces usinées) mis à part une extrémité localement ferritique.

**Micrographie**

La section micrographique correspond à la partie centrale de la barre où des zones aciérées sont visibles avec quelques décohésions apparemment intergranulaires.

La propreté inclusionnaire de la pièce est légèrement moins bonne que dans les autres échantillons du type 1M, mais elle demeure très élevée (fig. 181 et 182). Le cœur de la barre est le mieux compacté. Il existe principalement des inclusions amorphes. Celles remplies de fayalite avec de la wustite sont réellement minoritaires. Elles sont toujours de petites dimensions avec des contours vifs au faciès d'écrasement. Aucun repli n'est visible. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 0,3 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 1*.

L'attaque au nital révèle une structure essentiellement aciérée et majoritairement eutectoïde avec une perlite lamellaire généralisée (93 % de la section). L'ensemble est essentiellement trempé sous la forme de bainites nodulaires (troostite). Dans la surface non usinée, il existe une très légère décarburation superficielle (0,3 % de carbone). D'autres décarburations (0,3-0,4 % de carbone) encore plus locales sont présentes le long de certaines lignes de corroyage qui correspondent à des porosités ou à des inclusions totalement refermées. Des décarburations identiques sont également visibles le long des quelques fissures intergranulaires. Toutes ces zones décarburées renferment des très petits grains qui témoignent d'un martelage très violent.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

**Conclusion**

Cette barre montre clairement que la structure aciérée généralisée ne pose aucun problème de compactage et de mise en forme au métallurgiste, même s'il subsiste légèrement plus de micro-inclusions que dans les autres échantillons du même type.

# TYPE 1L

## *Morphologie générale*

La barre de type 1L est un demi-produit ferreux très allongé avec une section rectangulaire de 4 x 2 cm (+/- 0,5) et une longueur comprise entre 75 et 140 cm (fig. 175). Toutes ses faces sont martelées pour aménager des surfaces planes. Les deux extrémités de la barre sont également travaillées pour former des plans. Sur l'ensemble des échantillons étudiés, aucun indice ne suggère différentes zones de martelage ou une fréquence dans les zones martelées. Ce type porte parfois l'estampille n°6a, 6b, 7 et 8 de la série Djaoui.

## *Échantillon SM2.1*

**Métrologie**

Masse (g) : 5680
Longueur (mm) : 1087
Largeur (mm) : 45 (+/- 5)
Épaisseur (mm) : 22 (+/- 2)

**Particularités morphologiques**

A cause d'un phénomène de corrosion différentielle, la pièce s'affine très légèrement sur l'une de ses extrémités. Cela peut-être dû à des conditions de conservation distinctes ou à des compositions chimiques différentes (fig. 170 et 174).

**Macrographie**

Une des grandes faces principales de la barre a été usinée afin que l'on observe précisément la mise en forme.

Les porosités et les inclusions sont relativement peu présentes à cette échelle (fig. 170 et 174). En revanche, il existe de nombreuses zones hydroxydées qui se placent probablement sur d'anciennes zones peu compactées. Elles sont localisées pour la plupart dans une extrémité déterminée comme étant aciérée après attaque au nital. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2 % de la face usinée.

L'attaque au nital révèle une barre constituée de trois loupes jointes par deux soudures inter-loupes. La barre est aciérée (44 % de la face usinée) dans les extrémités et dans la partie centrale, entre les deux soudures inter-loupes. Par conséquent, si les loupes 1 et 3 sont aciérées uniquement dans les extrémités, la loupe 2 l'est totalement.

**Micrographie**

***Section 1***

La section 1 correspond à la zone de soudure entre les loupes 1 et 2.

La section 1 est très homogène et montre une excellente propreté inclusionnaire. Il persiste néanmoins quelques inclusions totalement amorphes en cours découlement et quelques zones d'agglomération métallique incomplète. Les porosités comportent souvent un contour anguleux et parfois une forme ovoïdale. Aucun repli n'est visible. Mis à part la zone de soudure, très légèrement différente avec des inclusions remplies de fayalite et des globules de wustite, la masse métallique est très homogène. Aucune différence n'est visible entre les deux loupes, hormis une importante décohésion intergranulaire localisée dans la loupe 2. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 0,5 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 1*.

L'attaque au nital révèle la soudure entre les loupes 1 et 2 dont le tracé est localement invisible en partie centrale tant la cohésion est parfaite. La soudure est localisée dans une zone décarburée à 0,3 % de carbone. Une soudure « secondaire » est perpendiculaire à la soudure inter-loupes. Elle se trouve au cœur de la barre, dans une zone aciérée à 0,3 % de carbone à très petits grains. Elle correspond à l'agglomération des porosités ou des contours irréguliers périphériques de la loupe 1. La loupe 2 est constituée d'un acier homogène à 0,7-0,8 % de carbone entièrement trempé avec une matrice perlitique où se trouvent localement quelques rares globules de ferrite. Une légère décarburation périphérique se situe à proximité d'une des surfaces. La loupe 1 est moins carburée, par conséquent la trempe n'a pas pris aussi bien. Il existe des zones à 0,7-0,8 % de carbone, mais les parties à 0,2-0,3 % de carbone forment la moitié de la surface étudiée de cette loupe. D'une manière générale, dans cette section les zones entre 0,7 et 0,8 % de carbone couvrent 52 % de la surface tandis que celles entre 0,3 et 0,6 % couvrent 48 %.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

***Section 2***

La section 2 correspond à la zone de soudure entre les loupes 2 et 3.

Dans la zone de soudure, la propreté inclusionnaire est moins élevée que dans le reste de la section (fig. 170 et 174). Il apparaît en effet plus de porosités et des inclusions essentiellement remplies de fayalite avec de la wustite sous forme globulaire et dendritique. Hormis un alignement d'inclusions et de porosités dans le cœur de la barre de la loupe 3, les loupes 2 et 3 sont similaires. Toutes les deux sont d'une excellente propreté inclusionnaire avec localement quelques reliquats d'agglomération métallique incomplète et des inclusions uniquement amorphes. Aucun repli n'est visible. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 0,4 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 1*.

L'attaque au nital révèle une soudure exceptionnelle entre la loupe 2 aciérée (légèrement décarburée au niveau de l'assemblage) et la loupe 1 ferritique. De manière générale, la zone de soudure est composée de 0,1 % de carbone (3 % de la section). La moitié de la surface de la loupe 2 est aciérée tandis que l'autre est totalement ferritique. La partie carburée est constituée de deux zones. La première est eutectoïde et trempée (23 % de la section). Elle conserve de la bainite nodulaire (troostite) et une grande fissure intergranulaire consécutive à des chocs violents et répétés. La seconde partie aciérée se développe en périphérie de la première avec un acier à 0,1-0,2 % de carbone (7 % de la section). La transition structurale est franche. La trempe est certainement involontaire et découle certainement du rapide refroidissement de la barre pour faciliter sa manipulation. La loupe 3 est quasiment entièrement ferritique avec des petits grains homogènes. En surface, elle contient localement quelques petites zones cémentées. L'ensemble des zones ferritiques des loupes 2 et 3 forme 67 % de la section.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

**Conclusion**

L'exemple de cette barre permet d'envisager un excellent travail de mise en forme fondé sur un compactage de haute qualité, sur des soudures exceptionnelles et une parfaite maîtrise des températures de chauffe y compris dans les cas les plus difficiles avec des soudures ferrite-acier.

---

## *Échantillon SM2.2*

**Métrologie**

Masse (g) : 5230
Longueur (mm) : 1025
Largeur (mm) : 40 (+/- 5)
Épaisseur (mm) : 23 (+/- 3)

**Particularités morphologiques**

Une des extrémités de la barre s'affine très légèrement sur environ 10 cm, certainement à cause d'une corrosion différentielle (fig. 171 et 174). À environ 40 cm de cette même extrémité, une zone légèrement plus corrodée sur un angle indique une hétérogénéité plus importante qui pourrait peut-être signaler une soudure, à moins que celle-ci ne soit due à un phénomène de conservation différentielle.

**Macrographie**

L'extrémité la plus trapue de la barre a été sectionnée en trois endroits de manière à pourvoir observer une section de la largeur (section 2) et une section longitudinale de 10 cm de l'extrémité (section 1).

***Section 1***

La section 1 correspond à la section longitudinale de l'extrémité de la barre.

La section 1, de bonne propreté inclusionnaire, renferme des porosités et des inclusions écrasées et alignées longitudinalement (fig. 171 et 174). À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1,4 % de la section usinée.

L'attaque au nital révèle une composition essentiellement aciérée (79 % de la section). Les zones ferritiques sont localisées dans l'extrémité de la barre et localement ailleurs en surface. Il pourrait donc peut-être s'agir de décarburation.

***Section 2***

La section 2 correspond à la section transversale de l'extrémité de la barre.

La section 2, d'une grande qualité inclusionnaire, bien plus élevée que dans la section 1, contient uniquement quelques porosités au centre de la section (fig. 171 et 174). À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 0,3 % de la section usinée.

L'attaque au nital détermine une section pratiquement totalement aciérée (86 % de la section) localement ferritique en périphérie, ce qui pourrait peut-être correspondre à une décarburation.

**Micrographie**

***Section 1***

La section 1 correspond à la section longitudinale de l'extrémité de la barre.

Quelques fissures, dues au martelage, sont visibles proches des surfaces et dans certaines inclusions fragmentées (fig. 171 et 174). La propreté inclusionnaire de la section est bonne et très homogène. Il persiste quelques replis pratiquement refermés (1 spécimen observé), quelques zones d'agglomération métallique incomplète et des inclusions principalement amorphes. D'autres sont parfois remplies de globules de wustite. D'une manière générale, les inclusions sont localisées dans le cœur de la barre. De formes très allongées et/ou écrasées, elles sont souvent alignées longitudinalement. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1,4 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 3*.

L'attaque au nital révèle deux structures distinctes. La grande partie de la périphérie de la section est constituée de ferrite à gros grains. À environ 0,5 mm de la surface, les grains de ferrite deviennent beaucoup plus petits sans être pour autant écrouis. La majorité de la section est constituée d'acier principalement eutectoïde (de 0,6 à 0,8 % de carbone, il couvre 79 % de la section). Toutes les jonctions structurales sont franches. Cependant, aucune soudure n'est visible. Cette organisation structurale entre la ferrite et l'acier est due à une décarburation périphérique importante laquelle est visible dans la grosseur des grains de ferrite périphériques qui témoignent d'une phase de chauffe longue et soutenue. Quant aux petits grains de ferrite sous-jacents, ils sont le reliquat non recristallisé du martelage très important que la barre a subi.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

***Section 2***

La section 2 correspond à la section transversale de l'extrémité de la barre.

L'excellente propreté inclusionnaire de la section donne à voir quelques porosités et quelques inclusions très majoritairement amorphes et écrasées, mais aucun repli (fig. 171 et 174). À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 0,3 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 1*.

L'attaque au nital révèle essentiellement un acier à 0,6-0,7 % de carbone qui peut localement être eutectoïde (86 % de la section). Quelques zones périphériques sont très localement décarburées (14 % de la section est ferritique). Cette observation vient appuyer l'hypothèse de la décarburation avancée de la section 1.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

**Conclusion**

Même si les zones analysées sur cette barre sont moins volumineuses que dans l'échantillon SM2.1, les observations demeurent sensiblement similaires : il s'agit d'un travail de compactage de

grande qualité. Toutefois, il apparaît notamment dans la section longitudinale de l'extrémité de la barre (section 1) que les extrémités de ce type sont moins bien compactées que le cœur pourtant plus décarburé. Les extrémités ne sont pourtant pas des zones délaissées, mais leur traitement dépend fortement de la mise en forme générale qui vise à étirer le massiau en martelant davantage les zones centrales.

## *Échantillon SM2.6*

**Numéro d'inventaire**

SM2-96-K?2

**Métrologie**

Masse (g) : 3660
Longueur (mm) : 971
Largeur (mm) : 39 (+/- 1)
Épaisseur (mm) : 15 (+/- 5)

**Estampille**

Série Djaoui n°9 : Il alterne deux fois, un timbre rond (1,1 cm de diamètre) et un cartouche rectangulaire (23 x 6 mm). Les deux cartouches rectangulaires sont apposés perpendiculairement à l'alignement. L'ensemble est localisé dans l'extrémité d'une des deux faces principales. Aucune inscription n'est visible.

**Particularités morphologiques**

Une extrémité de la barre est très corrodée, elle est donc très effilée et s'amincit progressivement sans que l'on puisse observer sa longueur originelle. Ceci est certainement consécutif à un problème de conservation différentiel (fig. 168 et 169).

**Macrographie**

Au cours de l'usinage de la barre, l'extrémité rongée par la corrosion a été détruite. Après usinage, la pièce a donc été amputée de 20 cm.

Au niveau macroscopique, les porosités et les inclusions sont assez peu présentes (fig. 168 et 169). En revanche, beaucoup de zones hydroxydées se sont certainement développées à partir de petites zones initialement poreuses. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 3 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital révèle une soudure inter-loupes localisée à proximité de l'extrémité détériorée, ce qui permet d'envisager une longueur originelle probablement plus importante d'environ 1/3.
Les zones aciérées sont quasiment inexistantes (5 % des deux faces usinées) sauf aux abords de la soudure qui pourrait donc être légèrement cémentée.

**Conclusion**

Cette échantillon constitue un nouvel exemple du type 1L formé de deux loupes. En revanche, il s'inscrit en faux au niveau structural par rapport aux autres échantillons du type 1L qui détiennent en moyenne 40 % d'acier alors que celui-ci est entièrement ferritique.

## *Échantillon SM2.7*

**Métrologie**

Masse (g) : 4480
Longueur (mm) : 1075
Largeur (mm) : 39 (+/- 1)
Épaisseur (mm) : 13 (+/- 3)

**Particularités morphologiques**

Une extrémité de la barre est très corrodée (fig. 168 et 169). Elle est donc très effilée, mais elle reste complète.

**Macrographie**

De la même manière que dans les autres barres du type 1L, les porosités et les inclusions sont assez peu présentes (fig. 168 et 169). Les plus grosses sont majoritairement des zones largement hydroxydées qui se forment principalement en périphérie. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital révèle une soudure inter-loupes dans le premier tiers de la barre et permet de constater une grande différence dans la grosseur des loupes assemblées. Parallèlement, cette attaque montre que la petite loupe (n°2) est entièrement carburée tandis que l'autre (n°1) l'est uniquement dans la zone de soudure. Dans cette barre, il est donc assemblé des loupes de volume et de structure très différents. Les zones aciérées couvrent ici 43 % des deux faces usinées.

**Conclusion**

Cet échantillon fait apparaître dans une même barre une association de loupes non seulement de volumes très différents, mais aussi de structures divergentes, complètement ferritiques ou aciérées. Cette barre est sensiblement similaire à l'échantillon SM2.8.

## *Échantillon SM2.8*

**Métrologie**

Masse (g) : 4270
Longueur (mm) : 1065 (+/- 2)
Largeur (mm) : 38 (+/- 2)
Épaisseur (mm) : de 10 à 25 (zone la mieux conservée)

**Estampille**

Série Djaoui n°9 : Il alterne deux fois, un timbre rond (1,3 cm de diamètre) et un cartouche rectangulaire (23 x 6 mm). Les deux cartouches rectangulaires sont apposées perpendiculairement à l'alignement. L'ensemble est localisé dans l'extrémité d'une des deux faces principales. Aucune inscription n'est visible.

**Morphologie**

La barre est complète, mais sur la tranche (dans l'épaisseur) quelques zones plus corrodées sont visibles et pourraient traduire la présence d'une soudure (fig. 168 et 169).

**Macrographie**

Comme pour les autres barres de ce type, les porosités et les inclusions sont assez peu fréquentes (fig. 168 et 169). Les plus grosses sont essentiellement des zones hydroxydées qui se développent probablement à l'emplacement de zones plus poreuses. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital révèle une soudure inter-loupes dans le 1er tiers de la barre. Cet agencement montre qu'il peut y avoir une grande différence dans la grosseur des loupes assemblées. Cette attaque indique également que la grande loupe (n°1) est entièrement carburée tandis que l'autre (n°2) l'est uniquement dans la zone de soudure. Cette barre rassemble donc des loupes aux volumes et aux structures très différentes. Les zones aciérées couvrent ici 53 % des deux faces usinées.

Cette barre n'a pas été sélectionnée dans le cadre d'une étude microscopique car elle est relativement mal conservée. L'étude a donc porté sur les caractères morphologiques et macrographiques afin de compléter les données accumulées et vérifier leurs récurrences.

**Conclusion**

Cet échantillon fait apparaître dans une même barre une association de loupes non seulement de volumes très différents, mais aussi de structures divergentes, complètement ferritique ou aciérée. Cette barre est sensiblement similaire à l'échantillon SM2.7.

---

## *Échantillon SM10.1*

**Numéro d'inventaire**

55

**Métrologie**

Masse (g) : 9305
Longueur (mm) : 1300 (+/- 1)
Largeur (mm) : 45 (+/- 2)
Épaisseur (mm) : 20 (+/- 1)

**Estampille**

Série Djaoui n°7a : L'estampille est composée de trois cartouches (24 x 5 (+/- 1) mm) apposés de façon à former un « C ». La corrosion est importante, mais il semble que les trois cartouches sont identiques.
L'ensemble est localisé au milieu d'une des deux faces principales. Aucune inscription n'est visible.

**Particularités morphologiques**

Dans une des extrémités, deux zones plus corrodées sont visibles de part et d'autre de la barre sur les deux tranches (fig. 172 et 174). Elles signaleraient une soudure entre deux loupes, mais vu les observations métallographiques, elles témoignent davantage d'une corrosion différentielle.

**Macrographie**

D'une manière générale, les porosités et les inclusions se développent principalement dans la tranche et le long du cœur de la barre (fig. 172 et 174). À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 3 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital signale que cet individu est formé de deux loupes soudées vers le milieu de la barre. Cette soudure inter-loupes est localisée sous les estampilles centrales appliquées sur la barre. Les deux loupes sont très majoritairement aciérées. L'une d'elles possède en revanche une soudure de repli dans une extrémité. Les zones aciérées couvrent ici 77 % des deux faces usinées.

**Micrographie**

***Section 1***

La section 1 concerne l'extrémité de la barre constituée par la loupe n°2.

Dans le bord de l'extrémité, il existe de nombreuses inclusions de fayalite (scorie primaire) issues du massiau peu compacté et du ressuage de la scorie (fig. 172 et 174). Beaucoup de morceaux de fer sont entourés de fayalite. Des zones d'agglomération métallique incomplète sont également présentes à côté de quelques replis pratiquement fermés. Les inclusions et les porosités sont écrasées dans le sens transversal, synonyme d'un compactage notamment réalisé à partir du martelage de l'extrémité. Les parties plus éloignées de l'extrémité sont mieux compactées. À 2 cm du bord de l'extrémité, la propreté inclusionnaire devient très élevée puis excellente. Il persiste uniquement quelques alignements d'inclusions amorphes ou fayalitiques et quelques rares zones d'agglomération métallique incomplète. Les inclusions amorphes sont principalement réparties dans le cœur de la pièce tandis que les inclusions de fayalite avec de la wustite se trouvent vers les surfaces. La wustite, souvent sous forme dendritique, signale une scorie inclusionnaire amenée à l'état liquide et refroidie progressivement. Dans ces zones, beaucoup mieux compactées, très peu de replis persistent. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1,3 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 2*.

L'attaque au nital permet de constater que l'ensemble de la section est majoritairement aciéré, mais sous des taux de carbone très variables. En effet, mis à part deux parties ferritiques (21 % de la section), l'acier se trouve soit autour de 0,2 % de carbone (20 % de la section) soit entre 0,4 et 0,5 (34 % de la section) ou entre 0,7 et 0,8 % de carbone (25 % de la section). Les endroits les plus chargés en carbone sont concentrés dans toute l'extrémité. Ici, on trouve localement de la fonte blanche et de l'acier hypereutectoïde. Certaines zones aciérées sont parfois légèrement trempées (troostite). Les zones très carburées se localisent souvent autour des porosités ou de soudures secondaires issues de porosités totalement refermées. Cette configuration signale la présence dans la loupe originelle de très nombreux puits de diffusion gazeux. De très nombreuses zones conservent des très petits grains d'acier et de ferrite illustrant un travail de frappe intense et prolongé. Parallèlement, certains endroits où l'acier est eutectoïde renferment des petites décohésions intergranulaires, faciès de chocs évidents. La différence de compactage entre les zones aciérées et celles ferritiques n'est pas grande, même si ces dernières le sont légèrement plus. La ferrite n'est jamais écrouie. Dans l'extrémité, de nombreuses soudures entremêlées sont issues du compactage et du repli de la loupe. Une soudure associée au repli de la loupe est également visible sur toute la largeur de la section à 6 cm du bord de l'extrémité.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

***Section 2***

La section 2 concerne le centre de la barre où les loupes 1 et 2 sont soudées.

Dans cette fenêtre, la loupe 1 possède une propreté inclusionnaire de qualité remarquable (fig. 172 et 174). Il subsiste uniquement quelques petites inclusions amorphes et plus rarement d'autres fayalitiques parfois en cours d'écoulement. La wustite, sous forme globulaire, est uniquement présente dans les quelques grosses inclusions (100 à 200 µm) très écrasées du cœur de la barre. Les inclusions, majoritairement amorphes, sont parfois localisées entre les joints de grain. Aux abords de la soudure, la propreté inclusionnaire est légèrement moins élevée. La loupe 2 possède également aux abords de la soudure une propreté inclusionnaire un peu moins remarquable avec des porosités, des inclusions et des petits replis très localisés quasiment refermés. Plus à l'intérieur de la loupe 2, le compactage devient excellent. Ici, les rares inclusions possèdent principalement une structure fayalitique avec de la wustite parfois en cours d'écoulement. Celles amorphes sont minoritaires. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1,3 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 1*.

L'attaque au nital révèle une loupe 1 essentiellement aciérée avec des petites zones entre 0,2 et 0,4 % de carbone et une majorité à 0,7 % de carbone. La jonction structurale entre ces zones est douce. Des décarburations, localement jusqu'à la ferrite, sont identifiées dans les contours métalliques des grosses inclusions centrales remplies de fayalite et de globules de wustite. La loupe 2 est beaucoup moins aciérée que la loupe 1. La ferrite équiaxe et les aciers inférieurs à 0,3 % de carbone sont ici majoritaires. Il existe cependant quelques zones aciérées à 0,7 % de carbone. Elles sont parfois associées à des aciers hypereutectoïdes généralement formés autour d'anciens puits de diffusion gazeux refermés. La zone de soudure inter-loupes a une teneur en carbone variant entre 0,2 et 0,6 %. Aux abords de cet assemblage, de nombreuses petites soudures secondaires sont associées aux compactages de la loupe initiale et des anciennes porosités actuellement refermées. Cette soudure inter-loupes illustre un travail de grande qualité, surtout si l'on considère l'hétérogénéité structurale des loupes initiales. Dans la section 2, les zones aciérées entre 0,7 et 0,8 % de carbone couvrent 26 % de la section, celles entre 0,3 et 0,6 % regroupent 27 % et les moins aciérées 17 %. Les parties ferritiques représentent 30 % de la section.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

***Section 3***

La section 3 concerne la partie médiane de la loupe n°1.

D'une manière générale, la propreté inclusionnaire de la section 3 est excellente (fig. 172 et 174). Elle est légèrement moins bonne en périphérie où il existe des zones hydroxydées. Les inclusions, essentiellement très écrasées dans le sens longitudinal, sont principalement remplies de fayalite et de globules de wustite. Des micro-porosités sont présentes, mais aucun repli n'est visible. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2,1 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 1*.

L'attaque au nital révèle une section essentiellement constituée de grains de ferrite équiaxes avec quelques ilots d'acier peu carburés (les zones à 0,1 % de carbone regroupent 6 % de la section) et d'autres plus aciérés (les zones à 0,5 % de carbone couvrent 27 % de la section tandis que celles à 0,8 % de carbone représentent 9 % de la section). L'acier eutectoïde est souvent trempé

(troostite). Les grains de ferrite plus gros en périphérie et en surface témoignent de phases de chauffe intenses et prolongées. Les jonctions entre les différents alliages fer/carbone sont toujours diffuses. Leur taux de compactage entre les différentes structures ne diffère pas. Des petites soudures de compactage d'anciennes porosités actuellement refermées sont très localement visibles dans le cœur de la barre.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

**Conclusion**

Cet échantillon témoigne d'une grande maîtrise technique et illustre un exemple de compactage d'une loupe de structure hétérogène avec des alliages fer/carbone très différents. L'épuration de qualité très élevée pour de l'acier, souligne un travail de martelage intense et prolongé, observé dans les nombreuses porosités totalement refermées et dans la petite taille des grains. Après SM10.3 cet échantillon offre un nouvel exemple d'une technique qui consiste à replier et à souder une partie de la loupe pour mettre en forme l'extrémité de la barre. Soulignons que les estampilles ont été frappées sur la soudure inter-loupes. Elles pourraient peut-être avoir été réalisées lors de cette phase de travail.

## *Échantillon SM10.2*

**Numéro d'inventaire**

43

**Métrologie**

Masse (g) : 8400
Longueur (mm) : 1266 (+/- 2)
Largeur (mm) : 45 (+/- 2)
Épaisseur (mm) : 25 (+/- 1)

**Estampille**

Série Djaoui n°7b : L'estampille est composée de 3 cartouches (24 x 5 (+/- 1) mm) apposés de façon à former un « C ». Un dernier timbre circulaire (7 mm de diamètre) a été apposé devant l'ouverture que forme le « C ». La corrosion est importante, mais il semble que les 3 cartouches soient identiques. L'ensemble est localisé au milieu d'une des deux faces principales. Aucune inscription n'est visible.

**Particularités morphologiques**

Dans une des extrémités, deux zones avec une corrosion plus importante sont visibles sur les tranches, de part et d'autre de la barre (fig. 173 et 174). Elles pourraient indiquer une soudure entre deux loupes, mais vu les observations métallographiques, elles témoignent davantage d'une corrosion différentielle.

**Macrographie**

D'une manière générale, la barre renferme un nombre de porosités et d'inclusions identique aux autres barres de ce type : c'est-à-dire relativement faible notamment par rapport au volume de métal mis en œuvre (fig. 173 et 174). Elles sont concentrées principalement dans l'épaisseur de la barre. Plus précisément, les extrémités, d'une propreté inclusionnaire moins élevée, contiennent

localement des fragments de charbon de bois directement issus de la réduction (Cf. micrographie). À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital signale que cet individu est formé de deux loupes soudées vers le milieu de la barre où sont localisées les estampilles. Le volume des loupes est sensiblement similaire. L'attaque indique également que les zones aciérées sont ici minoritaires (21 % des deux faces usinées) et se développent principalement dans les extrémités.

**Micrographie**

***Section 1***

La section 1 concerne l'extrémité de la barre constituée par la loupe 1.

Dans le bord de l'extrémité, quelques zones incomplètement agglomérées sont présentes sous des chapelets de micro-inclusions remplies de fayalite et de globules de wustite (fig. 173 et 174). D'autres micro-inclusions sont en revanche amorphes. D'une manière générale, même si cette section ne possède pas de repli, elle montre un taux de compactage sensiblement identique à celui visualisé dans les autres sections prélevées dans les extrémités du type 1L. Ce taux est en revanche inférieur à celui observé dans les sections échantillonnées dans le cœur des barres et/ou aux abords des soudures. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 3,7 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 2*.

L'attaque au nital montre que l'extrémité de loupe 1 est plutôt hétérogène avec des zones aciérées de 0,1 à 0,8 % de carbone et des zones majoritaires ferritiques (52 % de la section). Toujours équiaxes, elles sont compactées de la même manière que les zones aciérées (les zones à 0,5 % de carbone couvrent 28 % de la section tandis que celles à 0,7-0,8 % représentent 19 %). Les zones les plus carburées détiennent souvent des faciès de trempe (troostite). De très nombreuses petites soudures secondaires aux différentes directions sont les reliquats d'anciennes porosités totalement refermées. Elles indiquent que leur pourtour initial était très enrichi en carbone, preuve qu'elles étaient des puits de diffusion gazeux.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

***Section 2***

La section 2 correspond à la zone de soudure entre les loupes 1 et 2.

La loupe 2 possède une qualité inclusionnaire élevée (fig. 173 et 174). Quelques très rares très petits replis subsistent à côté de nombreuses micro-porosités et micro-inclusions qui contiennent principalement de la fayalite et des globules de wustite. Quelques-unes ne sont remplies que de fayalite. À proximité de la soudure, le taux de compactage est plus élevé. Aux abords de la soudure, la loupe 1 est identique à la loupe 2, mais vers son cœur elle devient rapidement beaucoup moins compactée par rapport à la loupe 1. Les corpus de porosité et d'inclusions sont en revanche du même type que dans la loupe 2. Il n'y a ici quasiment pas d'inclusions amorphes. Par conséquent, du point de vue de la propreté inclusionnaire, les loupes 1 et 2 sont sensiblement similaires, le compactage légèrement moins élevé dans la loupe 1 excepté. Le tracé de la soudure n'est pas visible tant la cohésion est parfaite. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1,3 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 1*.

L'attaque au nital révèle une soudure ferrite sur ferrite de très belle facture. Certains tronçons de l'assemblage sont réalisés dans des aciers entre 0,1 et 0,3 % de carbone (2 % de la section). Le long de la ligne de soudure, il n'existe pratiquement pas d'inclusions. Celles qui persistent sont remplies de fayalite et de globules de wustite. Les loupes 1 et 2 sont très proches. Elles sont essentiellement constituées de grains de ferrite équiaxes (98 % de la section) qui possèdent parfois en bordure des macles, vestiges d'anciens chocs mécaniques. Les grains de ferrite sont de tailles très variables. Parfois très gros, ils sont synonymes de phases de chauffe intenses et prolongées. Quelques rares zones aciérées très localisées contiennent jusqu'à 0,7 % de carbone (moins de 1 % de la section). Elles se trouvent à proximité des bords et correspondent certainement à des cémentations involontaires.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

***Section 3***

La section 3 concerne l'extrémité de la barre qui est constituée par la loupe 2.

D'une manière générale, la propreté inclusionnaire la section 3 est élevée, mais aux abords de l'extrémité, la qualité est moins haute comme dans la section 1 (fig. 173 et 174). À 2 cm du bord, il existe encore des fragments de charbon de bois dans le métal. Les micro-inclusions sont principalement amorphes, mais elles peuvent parfois contenir de la fayalite et de la wustite sous forme globulaire ou dendritique. Généralement dispersées avec des formes anguleuses, elles sont parfois regroupées sous la forme de chapelets. Il y a très peu de replis et quelques rares fissures certainement intergranulaires qui naissent à partir des surfaces. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 3,8 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 1*.

L'attaque au nital dévoile une structure très hétérogène de la ferrite à la fonte. L'ensemble de la section est principalement aciérée. La ferrite est uniquement localisée vers le cœur de la barre (28 % de la section). Elle possède des petits ou des gros grains et quelques macles, reliquats d'anciens chocs mécaniques. La majorité de la barre est constituée d'un acier entre 0,2 et 0,5 % (51 % de la section). Localement, autour des fragments de charbons de bois ou des anciennes porosités refermées, il existe des zones d'acier eutectoïde et hypereutectoïde (21 % de la section). Certaines d'entre elles comportent quelques îlots de fonte grise avec des lamelles de graphite dans de la perlite lamellaire généralisée. Quelques zones aciérées sont trempées (troostite).

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

**Conclusion**

Les extrémités du type 1L sont souvent moins compactées que le reste de la barre, conséquence technique directe de la mise en forme qui consiste à marteler préférentiellement les parties centrales. Cet échantillon conserve donc des zones épurées de manière très différentes qui permettent d'évaluer le grand travail de compactage visible depuis les extrémités jusqu'au cœur de la loupe. Ceci n'implique pas pour autant un travail global de médiocre qualité. Bien au contraire, il témoigne d'une mise en œuvre de grande qualité également appréciable dans la soudure qui lie les deux loupes. Les estampilles, frappées sur la soudure inter-loupes, pourraient peut-être avoir été réalisées lors de cet assemblage.

## *Échantillon SM10.3*

**Numéro d'inventaire**

42

**Métrologie**

Masse (g) : 9560
Longueur (mm) : 1306
Largeur (mm) : 49 (+/- 1)
Épaisseur (mm) : 25 (+/- 1)

**Particularités morphologiques**

L'ensemble de la barre est plutôt bien conservé (fig. 168 et 169). Vers une extrémité, une zone située dans l'épaisseur (sur la tranche) est plus corrodée. Synonyme d'une plus grande hétérogénéité structurale, elle pourrait signaler une soudure entre deux loupes ou un phénomène de conservation différentielle.

**Macrographie**

D'un point de vue macrographique, l'ensemble de la barre garde un nombre de porosités et d'inclusions relativement plus élevé que dans les autres échantillons du type 1L (fig. 168 et 169). Cet aspect est accentué par la présence de nombreuses zones hydroxydées dont le développement est certainement favorisé par une mauvaise propreté inclusionnaire initiale. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 3 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital révèle une constitution en trois loupes avec deux soudures inter-loupes. Une autre soudure est également visible dans une extrémité, dans la loupe la plus petite (la loupe 1 correspond à peu près à la moitié de la loupe 2 ou 3 qui ont un volume sensiblement identique). Il s'agit d'une soudure de repli, parfois réalisée pour façonner une des extrémités de la barre (la loupe étirée est ensuite repliée et soudée). Les parties aciérées sont majoritaires (70 % des deux faces usinées). Elles concernent toute la loupe repliée et toute la loupe centrale (les loupes 1 et 2). La dernière loupe n'est aciérée qu'aux abords de la soudure inter-loupes.

**Conclusion**

Cette barre démontre à nouveau que le type 1L contient une importante partie en acier. En revanche, elle met en évidence une variante dans la constitution interne des barres du type 1L qui associe généralement deux loupes alors qu'il y en a ici trois. Elle montre également une technique de mise en forme, parfois employée, qui consiste à replier et à souder une loupe pour façonner l'extrémité de la barre.

## *Échantillon SM10.4*

**Numéro d'inventaire**

41

**Métrologie**

Masse (g) : 6110
Longueur (mm) : 1170

Largeur (mm) : 44 (+/- 1)
Épaisseur (mm) : 23 (+/- 2)

**Particularités morphologiques**

Une des extrémités de la barre est très corrodée (fig. 168 et 169). À l'opposé, dans une des tranches, deux zones largement hydroxydées corrodées pourraient indiquer la présence d'une partie plus hétérogène qui a été plus rapidement rongée.

**Macrographie**

La barre possède peu de porosités ou d'inclusions à cette échelle (fig. 168 et 169). Il subsiste principalement des zones de corrosion qui prennent parfois l'emplacement d'anciennes parties à la propreté inclusionnaire médiocre. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 4 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital signale que la barre est constituée de deux loupes. Leur volume diffère légèrement, mais c'est surtout leur structure qui est très différente. En effet, le petit massiau (loupe 2) est entièrement aciéré tandis que le plus volumineux (loupe 1) l'est uniquement aux abords de la soudure. L'ensemble des zones aciérées représente 55 % des deux faces usinées

**Conclusion**

Cet échantillon met en évidence que les loupes assemblées dans le type 1L peuvent non seulement avoir des volumes très différents, mais, de plus, des structures, soit complètement aciérées, soit principalement ferritiques.

# TYPE 2M

## *Morphologie générale*

Barre de fer de section pratiquement carrée (3 x 2 cm +/- 0,5) présentant une morphologie moyennement allongée (entre 40 et 71 cm) (fig. 194). À l'exception du bout des extrémités, ses quatre faces principales sont martelées pour aménager des surfaces très planes. Les extrémités du type 2M se terminent donc généralement de manière aléatoire et légèrement effilée. Ceci n'est pas dû à la corrosion, mais à une mise en forme qui délaisse cette partie. Dans la plupart des cas, aucune estampille n'est apposée sur le type 2M. Le type 2M est morphologiquement proche du type 3C.

## *Échantillon SM6.4*

**Métrologie**

Masse (g) : 2038
Longueur (mm) : 433 (+/- 2)
Largeur (mm) : 39 (+/- 2)
Épaisseur (mm) : 31 (+/- 2)

**Particularités morphologiques**

La barre est très corrodée, mais elle conserve un aspect de surface correct qui nous permet d'exclure la présence d'estampille et de nous assurer qu'aucune trace ne suggère différentes zones de martelage ou une fréquence dans les zones martelées (fig. 184 et 185).

**Macrographie**

A cette échelle, l'échantillon est d'une propreté inclusionnaire différente selon que l'on considère l'une ou l'autre des faces usinées (fig. 184 et 185). Ceci détermine une surface de frappe préférentielle localisée sur la face la moins bien agglomérée comme dans SM9.13. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2 % des deux faces usinées. Elles se répartissent sans zonage particulier.

L'attaque au nital signale une barre presque entièrement ferritique (94 % des deux faces usinées) formée d'une seule loupe. L'unique petite partie aciérée, logée à la surface d'une extrémité, pourrait peut-être apparaître comme une cémentation locale involontaire ou comme le résidu de l'hétérogénéité de la loupe initiale.

**Conclusion**

L'étude morphologique et macrographique de cette barre apporte un nouvel argument pour définir le type 2M comme étant fabriqué à partir d'une unique loupe ferritique compactée avec relativement peu de soins notamment par rapport aux types 1M et 1L.

## *Échantillon SM9.1*

**Numéro d'inventaire**

SM9.99.118

**Métrologie**

Masse (g) : 3824
Longueur (mm) : 512
Largeur (mm) : 39 (+/- 3)
Épaisseur (mm) : 38 (+/- 3)

**Particularités morphologiques**

La barre est très corrodée, mais elle conserve un aspect de surface correct qui nous permet d'exclure la présence d'estampille et de nous assurer qu'aucune trace ne suggère différentes zones de martelage ou une fréquence dans les zones martelées (fig. 189 et 193). Dans l'extrémité des deux faces, la corrosion d'une autre barre est agglomérée à l'hydroxyde. À environ 18 cm de l'autre extrémité, une corrosion beaucoup plus avancée de toutes les faces pourrait être associée à un phénomène de conservation différentielle.

**Macrographie**

Une des faces principales de la barre a été usinée afin que l'on observe précisément la mise en forme.

La section est de qualité inclusionnaire moyenne avec de nombreuses porosités/inclusions, fortement allongées longitudinalement, qui affichent un gradient d'épuration du cœur vers la périphérie (fig. 189 et 193). Parallèlement, elles sont majoritairement conservées dans les extrémités tandis que le centre de la barre est beaucoup mieux compacté. Ceci est directement issu de la mise en forme qui consiste notamment à marteler davantage le centre pour étirer le métal. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2 % de la face usinée.

L'attaque au nital signale que la barre est constituée d'une unique loupe essentiellement ferritique (97 % des deux faces usinées), hormis au bord d'une de ses extrémités qui pourrait être légèrement cémentée.

**Micrographie**

***Section 1***

La section 1 correspond à l'extrémité légèrement carburée de la barre.

La propreté inclusionnaire de la section est relativement élevée puisqu'il ne subsiste qu'un petit nombre d'inclusions essentiellement remplies de fayalite avec des globules et dendrites de wustite qui proviennent de l'oxydation du métal (fig. 189 et 193). En revanche, la caractéristique de cette section réside dans son taux très élevé de porosités. Les cavités généralement très écrasées sont nombreuses notamment vers le cœur de la pièce, ce qui signifie que le gradient d'épuration est uniquement lié au compactage. Quelques zones possèdent également des reliquats d'agglomération métallique incomplète, sous la forme de chapelets d'inclusions remplies de fayalite avec des globules de wustite. Les replis sont très rares. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2,6 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 3*.

L'attaque au nital révèle une section presque entièrement ferritique non écrouie (91 % de la section) mis à part dans l'extrémité qui comporte un acier peu carburé issu d'une cémentation certainement involontaire (entre 0,1 à 0,3 % de carbone). Dans des zones proches de ces parties carburées, certaines porosités possèdent un contour métallique légèrement cémenté pouvant constituer des reliquats de réduction.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

***Section 2***

La section 2 correspond à l'extrémité entièrement ferritique de la barre.

La section 2 concentre les mêmes caractéristiques que la section 1, mais avec un meilleur taux de compactage (fig. 189 et 193). Par conséquent, même si l'épuration n'est pas aussi élevée que dans les types 1L et 1M, elle est ici plus élevée que dans la section 1. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1,7 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 1*.

L'attaque au nital révèle une composition entièrement ferritique (100 % de la section) sous la forme de petits et de très gros grains joints par des transitions brutales et franches. Sur un des bords, il existe une longue soudure d'une fine feuille d'acier à 0,1 % de carbone (moins de 1 % de la section). Il n'y a pas de macle ni d'écrouissage.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

**Conclusion**

Cet échantillon forme un nouvel exemple du type 2M, qui est constitué d'une unique loupe entièrement ferritique, mais paradoxalement beaucoup moins bien épurée que les autres types aciérés comme 1M et 1L.

---

## *Échantillon SM9.2*

**Numéro d'inventaire**

SM9.99.213

**Métrologie**

Masse (g) : 2782
Longueur (mm) : 470
Largeur (mm) : 37 (+/- 3)
Épaisseur (mm) : 38 (+/- 3)

**Expérimentation**

La partie restante de la barre, non étudiée en métallographie, a servi de demi-produit dans le cadre d'une expérimentation menée au Franois (25) en septembre 2005 par le Laboratoire de Métallurgies et Cultures (UMR 5060, Belfort, 90).

**Particularités morphologiques**

L'ensemble de la barre est très corrodé, mais il conserve un aspect de surface correct qui permet d'exclure la présence d'estampille et de nous assurer qu'aucune trace ne suggère différentes zones de martelage ou une fréquence dans les zones martelées (fig. 190 et 193). Localement, de la corrosion d'une autre barre est agglomérée à l'hydroxyde. À environ 18 cm d'une des extrémités, une corrosion beaucoup plus avancée de toutes les faces pourrait être associée à un phénomène de conservation différentielle.

**Macrographie**

L'extrémité la plus trapue de la barre a été tronçonnée transversalement afin que l'on étudie une section carrée de la barre.

La section comporte une très bonne propreté inclusionnaire et très peu de porosités (fig. 190 et 193). À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 0,9 % de la section sélectionnée.

L'attaque au nital montre que la section est entièrement ferritique (100 % de la section) et sans aucune soudure.

**Micrographie**

La section recèle une excellente propreté inclusionnaire puisque les inclusions sont très rares (amorphes ou avec de la wustite), mais toujours localisées en périphérie (fig. 190 et 193). Aucun repli n'est perceptible et les quelques porosités écrasées indiquent des sens d'écrasement parallèles aux quatre faces. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 0,9 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 1*.

L'attaque au nital révèle une structure très homogène de ferrite équiaxe à petits grains très homogènes (100 % de la section). Quelques endroits en limite de surface comportent une légère cémentation périphérique avec, très localement, un acier à 0,2 % de carbone (moins de 1 % de la section). Un des bords livre également une soudure intermédiaire de corroyage certainement liée au compactage d'une porosité.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

**Conclusion**

Cet échantillon révèle l'importance du protocole d'étude mis en place pour les barres des Saintes-Maries-de-la-Mer. En effet, en observant uniquement une section transversale, les conclusions apportées ne tiennent pas compte de la représentativité de la fenêtre étudiée par rapport à l'ensemble de la barre. Ainsi, selon cette section transversale, la barre apparait très correctement épurée alors que le type 2M forme des demi-produits ferritiques généralement moins bien épurés que les autres formes des Saintes-Maries-de-la-Mer. La pertinence des conclusions dépend donc étroitement de la zone étudiée et du protocole mis en place.

## *Échantillon SM9.13*

**Numéro d'inventaire**

SM9-99-212

**Métrologie**

Masse (g) : 2310
Longueur (mm) : 483
Largeur (mm) : 33 (+/- 3)
Épaisseur (mm) : 31 (+/- 2)

**Particularités morphologiques**

L'ensemble de la barre très corrodé conserve néanmoins un aspect de surface correct qui nous permet d'exclure la présence d'estampille et de nous assurer qu'aucune trace ne suggère différentes zones de martelage ou une fréquence dans les zones martelées (fig. 184 et 185).

**Macrographie**

A cette échelle, l'échantillon est d'une propreté inclusionnaire différente selon que l'on considère l'une ou l'autre des faces usinées (fig. 184 et 185). Ceci témoigne d'une surface de frappe préférentielle localisée sur la face la moins bien agglomérée comme dans SM6.4. Aucun autre zonage inclusionnaire n'est visible. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital révèle une barre entièrement ferritique formée à partir d'une unique loupe. Quelques zones très localisées sont aciérées (1 % des 2 faces usinées). Elles sont parfois situées en surface, témoin d'une éventuelle cémentation.

**Conclusion**

L'étude morphologique et macrographique de cette barre apporte un nouvel argument pour définir le type 2M comme étant mono-loupe, essentiellement ferritique et pas particulièrement bien compacté.

## *Échantillon SM25.1*

**Numéro d'inventaire**

272

**Métrologie**

Masse (g) : 3884
Longueur (mm) : 600 (+/- 5)
Largeur (mm) : 32 (+/- 1)
Épaisseur (mm) : 32 (+/- 1)

**Particularités morphologiques**

Cet échantillon, prélevé immédiatement après sa sortie de l'eau, est très bien conservé (fig. 191 et 193). Il livre des caractères morphologiques très précis, essentiels à la connaissance de ce type. Les quatre faces principales sont particulièrement régulières, lisses et planes. Aucune trace ne suggère différentes zones de martelage ou une fréquence dans les zones martelées (le pas). En

revanche, tous les angles chanfreinés comportent des traces de martelage. Même si les pas semblent se recouper, les impacts les plus longs suggèrent que le marteau avait une largeur de 58 mm. Les extrémités n'ont pas reçu de mise en forme particulière. Elles se terminent de manière aléatoire, légèrement effilée.

**Macrographie**

L'ensemble de la barre est d'une qualité inclusionnaire relativement peu élevée (fig. 191 et 193). Il demeure de nombreuses porosités et inclusions principalement situées au cœur des deux faces sous des alignements légèrement sinusoïdaux. Aux abords de la surface du métal, il se développe parfois des zones plus poreuses soulignées par de la corrosion importante. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital révèle une structure entièrement aciérée (95 % des deux faces usinées). Quelques zones ferritiques sont présentes au cœur de la barre, la seule de ce type à connaître une telle teneur en carbone. Elle est formée d'une seule loupe.

**Micrographie**

La section micrographique correspond au centre de la barre où se trouve soit une zone de fissuration intergranulaire, soit une zone mal agglomérée.

La propreté inclusionnaire de la section est élevée, mais pas excellente (fig. 191 et 193). Il existe en effet quelques hétérogénéités locales avec des porosités et des inclusions aux profils plutôt fermés remplies de fayalite et de globules de wustite. Une importante zone de fissurations intergranulaires est présente depuis la surface du métal jusqu'au cœur de la barre au milieu de la section. Plus généralement, il est présent dans la majorité de la section uniquement des micro-porosités et micro-inclusions essentiellement amorphes. Aucun repli n'est visible, mais des zones d'agglomération métallique incomplète existent. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1,1 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 3*.

L'attaque au nital révèle une structure quasiment entièrement aciérée avec une majorité de zones entre 0,1 et 0,3 % de carbone (59 % de la section). Plus localement, l'acier peut comporter jusqu'à 0,7 ou 0,8 % de carbone (17 % de la section). Dans des aciers à 0,4-0,5 % de carbone (11 % de la section), certaines zones livrent de très grandes ferrites aciculaires, témoins d'une surchauffe locale. La ferrite n'est pas écrouie (12 % de la section). Les transitions structurales sont douces. La zone de décohésion intergranulaire est localisée dans une partie très aciérée à 0,7 % de carbone. Celle-ci est beaucoup plus dure et, par conséquent, sensible aux chocs mécaniques à basse température.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

**Conclusion**

Cette barre constitue le seul individu du type 2M qui possède une structure aciérée généralisée. La présence d'importantes décohésions intergranulaires dans une zone très aciérée pourrait peut-être montrer que les personnes qui ont fabriqué cette barre, étaient plus habituées à travailler de la ferrite, métal plus malléable et ductile.

## *Échantillon SM25.2*

**Numéro d'inventaire**

318

**Métrologie**

Masse (g) : 1914
Longueur (mm) : 558 (+/- 5)
Largeur (mm) : 23 (+/- 2)
Épaisseur (mm) : 23 (+/- 2)

**Particularités morphologiques**

Cet échantillon, prélevé immédiatement après sa sortie de l'eau, est très bien conservé (fig. 192 et 193). Il livre des caractères morphologiques très précis, essentiels à la connaissance de ce type. Les quatre faces principales sont particulièrement régulières, lisses et planes. Aucune trace ne suggère différentes zones de martelage ou une fréquence dans les zones martelées (le pas). En revanche, tous les angles chanfreinés comportent des traces de martelage. Même si les pas semblent se recouper, les impacts les plus longs suggèrent que le marteau avait une largeur de 35 mm. Les extrémités n'ont pas reçu de mise en forme particulière. Elles se terminent de manière aléatoire, légèrement effilée.

**Macrographie**

D'un point de vue général, la section présente une médiocre propreté inclusionnaire notamment sur la face dont l'extrémité est étudiée à l'échelle micrographique (fig. 192 et 193). Ici, les inclusions se développent principalement au milieu de la barre tandis que sur l'autre face, elles se trouvent davantage aux extrémités. Ceci montre que la première face a été préférentiellement martelée au milieu tandis que l'autre l'a été essentiellement aux extrémités. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital montre que la barre est constituée d'une unique loupe principalement ferritique avec quelques zones aciérées localisées aux extrémités (14 % des 2 faces usinées).

**Micrographie**

La section micrographique correspond à une extrémité de la barre.

Au bord de l'extrémité, beaucoup de zones hydroxydées sont visibles (fig. 192 et 193). Elles se développent préférentiellement dans cette partie car de nombreuses porosités et inclusions étaient ici initialement présentes. Il existe également, dans cette zone, un micro-fragment de charbon de bois montrant à nouveau un taux de compactage peu élevé. Dans le reste de la section le taux de compactage est plus élevé, mais il reste d'une qualité inférieure notamment par rapport aux autres types. Les inclusions sont souvent remplies de fayalite et de globules de wustite, mais d'autres amorphes peuvent parfois être regroupées sous la forme de chapelet, synonyme d'agglomération métallique incomplète. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 0,5 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 1*.

L'attaque au nital révèle le bout de l'extrémité comme étant aciéré, entre 0,3-0,7 % de carbone (les aciers entre 0,3 %-0,6 % couvrent 23 % de la section tandis que ceux à 0,7 % de carbone regroupent 15 % de la section). Très rapidement, la barre devient entièrement ferritique avec des grains équiaxes (63 % de la section). Quelques ilots d'acier subsistent localement. Quelques-uns

localisés en surface sont certainement issues de cémentations involontaires, mais l'essentiel de l'acier est dû la l'hétérogénéité de la loupe initiale. Des petites soudures associées à la fermeture de porosités sont également parfois visibles. Ce sont des soudures de corroyage intermédiaires ou secondaires.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

**Conclusion**

Cet échantillon, exemplaire à plus d'un titre, apprend que ce type de barre est souvent constitué d'une loupe ferritique relativement mal compactée pour un alliage ferreux malléable et ductile. Cet échantillon montre aussi que les extrémités de ce type ne sont souvent pas bien compactées et mises en forme, autre aspect du soin relativement peu élevé accordé au façonnage de ce type de demi-produit.

---

## *Échantillon SM25.3*

**Numéro d'inventaire**

281

**Métrologie**

Masse (g) : 4540
Longueur (mm) : 626
Largeur (mm) : 32 (+/- 2)
Épaisseur (mm) : 32 (+/- 2)

**Particularités morphologiques**

Cette barre a une forme 2M de relativement grosse dimension. Prélevé immédiatement après sa sortie de l'eau, elle est particulièrement bien conservée (fig. 184 et 185). Elle livre des caractères morphologiques très précis essentiels à la connaissance de ce type. Les quatre faces principales sont particulièrement régulières, lisses et planes. Aucune trace ne suggère différentes zones de martelage ou une fréquence dans les zones martelées (le pas). Toutes les faces sont perpendiculaires et tous les angles sont chanfreinés. Les extrémités n'ont pas reçu de mise en forme particulière. Elles se terminent de manière aléatoire, légèrement effilée.

**Macrographie**

La propreté inclusionnaire de cette pièce est élevée notamment par rapport aux autres échantillons de ce type examinés (fig. 184 et 185). Il subsiste quelques zones localement moins compactées. La plus importante d'entre elles se situe dans l'une des extrémités. Ceci confirme que les extrémités de ce type sont très grossièrement mises en forme. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital indique que la barre est formée d'une loupe essentiellement ferritique (82 % des deux faces usinées). Les zones aciérées couvrent principalement les extrémités et la surface du centre de la barre, ce qui ressemble fort à un processus de cémentation involontaire et superficiel.

**Conclusion**

Cette barre renforce la définition du type 2M qui est le plus souvent constitué d'une unique loupe ferritique moyennement compactée et très grossièrement façonnée aux extrémités.

## *Échantillon SM25.4*

**Numéro d'inventaire**

275

**Métrologie**

Masse (g) : 3590
Longueur (mm) : 492
Largeur (mm) : 32 (+/- 2)
Épaisseur (mm) : 32 (+/- 2)

**Particularités morphologiques**

La barre a une forme 2M de relativement grosse dimension pour ce type (fig. 184 et 185). Cet échantillon, prélevé immédiatement après sa sortie de l'eau, est particulièrement bien conservé. Il est donc possible d'observer son état de surface remarquable mis à part aux extrémités qui n'ont pas reçu de façonnage particulier. Elles se terminent de manière aléatoire, légèrement effilée. Sur les faces, il n'existe pas de traces qui pourraient suggérer différentes zones de martelage ou une fréquence dans les zones martelées. Toutes les faces sont perpendiculaires et tous les angles sont chanfreinés.

**Macrographie**

L'analyse macrographique de la section montre une propreté inclusionnaire médiocre notamment aux extrémités où de très nombreuses inclusions et porosités favorisent le développement de la corrosion (fig. 184 et 185). À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital révèle une barre constituée d'une unique loupe principalement ferritique (79 % des deux faces usinées) avec au centre une zone aciérée qui pourrait peut-être correspondre à une cémentation involontaire et superficielle.

**Conclusion**

Cette barre apporte un nouvel exemple à la définition du type 2M qui est le plus souvent constitué d'une unique loupe ferritique, moyennement compactée et non façonnée aux extrémités.

## *Échantillon SM25.5*

**Numéro d'inventaire**

274

**Métrologie**

Masse (g) : 1980

Longueur (mm) : 533
Largeur (mm) : 25 (+/- 2)
Épaisseur (mm) : 25 (+/- 2)

**Morphologie**

Cet échantillon, prélevé immédiatement après sa sortie de l'eau, est particulièrement bien conservé (fig. 184 et 185). Il est donc possible d'observer son état de surface qui est remarquable, mis à part aux extrémités qui n'ont pas reçu de façonnage particulier. Elles se terminent de manière aléatoire et légèrement effilées. Sur les faces, il n'existe pas de traces qui pourraient suggérer différentes zones de martelage ou une fréquence dans les zones martelées. Toutes les faces sont perpendiculaires et tous les angles sont chanfreinés.

**Macrographie**

La propreté inclusionnaire de la barre est plutôt correcte, mis à part dans les extrémités où se développent les plus grosses inclusions et porosités (fig. 184 et 185). À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital dévoile une structure principalement ferritique (96 % des 2 faces usinées) avec quelques rares îlots d'acier localisés soit dans le cœur de la barre soit aux extrémités. Parallèlement, l'attaque au nital montre une constitution différente par rapport aux autres individus observés de ce type. Cette barre est en effet formée de 2 loupes assemblées par une soudure au centre de la barre.

**Conclusion**

Cette barre apporte un nouvel exemple à la définition du type 2M qui est le plus souvent ferritique moyennement compactée et non façonnée aux extrémités. *A contrario*, cet échantillon montre qu'occasionnellement le type 2M peut être constitué de deux loupes soudées. Cet assemblage n'est pas lié au désir de rendre la barre plus longue, mais il est associé à la petitesse du volume des loupes mises en œuvre. Cette alternative ne semble donc pas caractéristique de ce type, mais plutôt liée à une adaptation technique rendue nécessaire par le calibrage du poids et/ou de la longueur de ce type de barre.

---

## *Échantillon SM25.6*

**Numéro d'inventaire**

178

**Métrologie**

Masse (g) : 2350
Longueur (mm) : 560
Largeur (mm) : 26 (+/- 3)
Épaisseur (mm) : 25 (+/- 1)

**Particularités morphologiques**

Cet échantillon a été prélevé immédiatement après sa sortie de l'eau (fig. 184 et 185). Il est donc possible d'observer son état de surface remarquable mis à part aux extrémités qui n'ont pas reçu de façonnage particulier. Elles se terminent de manière aléatoire et légèrement effilée. Sur les

faces, il n'existe pas de traces qui pourraient suggérer différentes zones de martelage ou une fréquence dans les zones martelées. Toutes les faces sont perpendiculaires et tous les angles sont chanfreinés.

**Macrographie**

La propreté inclusionnaire de cette barre propose une répartition spatiale identique aux autres individus étudiés de ce type avec des porosités et des inclusions principalement localisées dans les extrémités (fig. 184 et 185). À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital montre que la barre est formée d'une seule loupe principalement ferritique (88 % des deux faces usinées). Les zones aciérées se déploient localement aux extrémités ou, en surface, au centre de la barre, ce qui ressemble fort à un processus de cémentation involontaire et superficiel.

**Conclusion**

Cette barre apporte un nouvel exemple à la définition du type 2M qui est le plus souvent constitué d'une unique loupe ferritique moyennement compactée et non façonnée aux extrémités.

# TYPE 3C

## *Morphologie générale*

Le type 3C forme une courte barre de fer (entre 30 et 40 cm) de section pratiquement carrée (4 x 3 cm +/- 0,5) (fig. 195). D'autres individus doivent être étudiés pour connaitre plus précisément les récurrences morphologiques de ce type, mais l'on peut d'ores est déjà dire que toutes ses faces sont martelées pour aménager des surfaces planes. Les deux extrémités présentent rarement des plans de frappe. Cet aspect peut être dû à la corrosion, mais il semble davantage associé à la mise en forme de la pièce qui ne concerne guère les extrémités. D'une manière générale, aucune estampille n'est apposée sur le type 3C. Le type 3C est morphologiquement proche du type 2M.

## *Échantillon SM6.3*

### Métrologie

Masse (g) : 3104
Longueur (mm) : 470 (+/- 3)
Largeur (mm) : 50 (+/- 3)
Épaisseur (mm) : 45 (+/- 3)

### Particularités morphologiques

L'état de corrosion très avancé de la pièce permet d'observer seulement des lambeaux de la surface originale qui semblait être correctement travaillée avec des faces planes (fig. 184 et 185). Les extrémités sont les zones les plus hydroxydées. Sur les faces, il n'existe pas de traces qui pourraient suggérer différentes zones de martelage ou une fréquence dans les zones martelées.

### Macrographie

La propreté inclusionnaire de cette barre n'est pas particulièrement élevée (fig. 184 et 185). Les porosités et les inclusions sont principalement présentes au milieu de la barre. Leur emplacement est aujourd'hui largement investi par de la corrosion. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées forme environ 3 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital révèle une unique loupe où se développent quelques rares zones aciérées (13 % des deux faces usinées) principalement localisées dans les deux extrémités de la barre. Pour une composition essentiellement ferritique, l'unique loupe mise en œuvre dans cette petite barre est relativement mal compactée.

### Conclusion

Cette barre offre des caractères morphologiques et métallographiques sensiblement équivalents au type 2M. D'autres échantillons de ce type doivent impérativement être étudiés à l'échelle micrographique pour établir les récurrences qui peuvent exister entre le type 2M et 3C. Dans les données actuelles, le type 3C semble constitué d'une unique loupe ferritique moyennement compactée et non façonnée aux extrémités.

# TYPE 4C

## *Morphologie générale*

Court barreau métallique massif (entre 20 et 30 cm de longueur) de section rectangulaire (6 x 5 cm +/- 0,5) (fig. 205). Toutes ses faces, y compris les extrémités, sont toujours martelées pour aménager des surfaces planes. Sur l'ensemble des échantillons étudiés, aucun indice ne suggère différents pas de martelage. Les estampilles des séries Djaoui n°1, 3, 4, 5, 7, 8 ou 9 sont souvent apposées sur le type 4C.

## *Échantillon SM2.3*

**Métrologie**

Masse (g) : 1976
Longueur (mm) : 240 (+/- 10)
Largeur (mm) : 54 (+/- 2)
Épaisseur (mm) : 40 (+/- 2)

**Estampille**

Série Djaoui n°4 : Un timbre carré (10 x 9 mm) est disposé à côté d'un timbre rectangulaire (19 x 6 mm). L'ensemble est apposé sur l'extrémité d'une des grandes faces. Aucune inscription n'est visible.

**Particularités morphologiques**

La corrosion de la pièce est très importante (fig. 196 et 197). Malgré une légère modification de l'aspect originel, l'état des faces principales est encore visible localement, mais les extrémités sont totalement rongées.

**Macrographie**

Cet échantillon a été tronçonné par microtonimie (jet d'eau à haute pression) dans le sens longitudinal pour pouvoir observer l'estampille en coupe afin de préciser sa mise en œuvre (fig. 196 et 197). Après tronçonnage, il est apparu une section trop oxydée ne permettant pas une observation microscopique convenable des deux timbres. L'étude de cette barre est donc uniquement fondée sur les caractères morphologiques et macrographiques pour compléter les données métallographiques accumulées et vérifier leurs récurrences.

La section livre une qualité inclusionnaire très moyenne avec de nombreuses grosses porosités et inclusions qui jalonnent la section principalement sur la partie centrale. Elles sont encore largement ouvertes. Leur contour signale un écrasement dans le sens de la largeur tandis qu'aux extrémités celui-ci est davantage longitudinal conformément à la mise en forme de la pièce. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 3 % de la face usinée.

L'attaque au nital révèle une section essentiellement ferritique (93 % de la section) constituée à partir d'une unique loupe. Un des bords est toutefois aciéré. Il pourrait s'agir d'une cémentation locale involontaire et superficielle.

**Conclusion**

Ce barreau apporte un nouvel exemple à la définition du type 4C qui est le plus souvent constitué d'une unique loupe hétérogène moyennement compactée. En revanche, elle possède peu de zones aciérées contrairement à la majorité des autres barreaux étudiés.

---

## *Échantillon SM2.4*

**Métrologie**

Masse (g) : 4258
Longueur (mm) : 262 (+/- 2)
Largeur (mm) : 62 (+/- 1)
Épaisseur (mm) : 45 (+/- 2)

**Particularités morphologiques**

Même si la corrosion superficielle de la pièce est déjà importante, cet échantillon constitue un des individus les plus correctement conservés du type 4C (fig. 196 et 197).

**Macrographie**

Les inclusions et les porosités se situent principalement aux extrémités et sur la grande face, ce qui paraît conforme à la mise en œuvre de ce type de volume (fig. 196 et 197). Les inclusions et les porosités sont parfois très grosses avec des contours vifs au multiples faciès d'écrasement. La pièce n'a donc pas subi de traitement particulier destiné à élever la qualité de sa propreté inclusionnaire. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital montre une structure hétérogène avec des zones majoritairement ferritiques et d'autres aciérées (22 % des 2 faces usinées). Leur localisation ne dépend pas de la mise en forme, mais de l'hétérogénéité initiale de l'unique loupe travaillée.

**Conclusion**

Ce barreau est un nouvel exemple du type 4C qui offre une propreté inclusionnaire moyennement élevée et une structure hétérogène (ferrite et acier) directement issue de la loupe initiale.

---

## *Échantillon SM2.5*

**Métrologie**

Masse (g) : 3744
Longueur (mm) : 236 (+/- 2)
Largeur (mm) : 55 (+/- 1)
Épaisseur (mm) : 43 (+/- 2)

**Particularités morphologiques**

Même si la corrosion superficielle de la pièce est déjà importante, cet échantillon constitue un des individus les plus correctement conservés du type 4C (fig. 200 et 204).

**Macrographie**

Cette barre contient de nombreuses inclusions ou porosités encore ouvertes (fig. 200 et 204). Elles se situent principalement aux extrémités et sur la face principale usinée, ce qui paraît conforme à la mise en œuvre de ce type de volume. Dans la largeur, il existe une longue soudure (section observée à l'échelle microscopique) qui ne semble pas liée à l'assemblage de deux massiaux, mais davantage associée au repli d'une unique loupe sur elle-même. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital indique que cette barre est constituée d'une unique loupe. Elle révèle également une structure principalement aciérée (68 % des 2 faces usinées) sans agencement particulier, directement issue de l'hétérogénéité de la loupe initiale.

**Micrographie**

La section micrographique correspond à la moitié de la largeur usinée qui possède une grande soudure secondaire de compactage.

La propreté inclusionnaire de la section est moyenne (fig. 200 et 204). Il persiste de nombreuses inclusions amorphes ou remplies de fayalite et de globules de wustite. Elles sont localisées sans zonage particulier. Parfois, les inclusions amorphes peuvent cependant être regroupées sous la forme de chapelets, zones d'agglomération métallique incomplète. Il existe beaucoup de grosses inclusions plus ou moins refermées avec des micro-inclusions dispersées. La partie la plus aciérée (observée après attaque au nital) est cependant la mieux compactée. Le tracé d'une grande soudure de compactage est visible grâce aux vestiges d'une réoxydation à chaud, témoin d'un assemblage incorrect. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1,9 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 2*.

L'attaque au nital révèle une structure principalement aciérée dont l'organisation est fortement dépendante de la soudure secondaire associée au compactage de la loupe initiale. D'un côté de la soudure, l'acier dépasse rarement 0,3 % de carbone (31 % de la section). Il est localisé près des plus grosses zones ferritiques. De l'autre côté, l'acier possède le plus souvent 0,7-0,8 % de carbone (44 % de la section) et un faciès de trempe (troostite). Le taux de compactage entre la ferrite et l'acier est équivalent. La ferrite est toujours équiaxe (25 % de la section) et livre parfois de très gros grains sans macles signifiant d'importants réchauffements ponctuels, également visibles dans la décarburation de certains contours de porosités. La soudure vise principalement à assembler de la ferrite et de l'acier eutectoïde, ce qui pourrait expliquer sa mauvaise réalisation.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

**Conclusion**

Cette barre apporte un nouvel exemple à la définition du type 4C qui est le plus souvent constitué d'une unique loupe hétérogène (ferrite et acier) moyennement compactée. La mauvaise réalisation de la soudure secondaire associée au compactage de la loupe est peut-être due à la difficulté de souder de la ferrite sur de l'acier eutectoïde, mais elle pourrait peut-être montrer que les

personnes travaillant sur le type 4C ne sont pas particulièrement familiarisées avec la soudure de grosses masses de métal, contrairement à celles qui travaillent sur les types 1L et 4L.

## *Échantillon SM6.5*

**Métrologie**

Masse (g) : 2560
Longueur (mm) : 280
Largeur (mm) : 44 (+/- 2)
Épaisseur (mm) : 58 (+/- 2)

**Particularités morphologiques**

La barre est très corrodée, mais son état de surface est suffisamment conservé pour déterminer qu'aucune estampille n'est présente. Une extrémité et une tranche livrent beaucoup d'hydroxydes qui se délitent (fig. 196 et 197).

**Macrographie**

L'usinage permet de confirmer que la corrosion à largement gagner le cœur de la pièce (fig. 196 et 197). La propreté inclusionnaire est relativement médiocre. Cet aspect est accentué par la corrosion importante des inclusions et porosités initiales. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 4 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital révèle une composition hétérogène sans zonage particulier issue d'une unique loupe, ce qui est conforme aux autres observations réalisées sur ce type. L'acier forme 31 % des deux faces usinées.

**Conclusion**

Cet échantillon montre une fois de plus que le taux de compactage du type 4C n'est pas particulièrement élevé et que leur structure est généralement hétérogène avec environ 40 % d'acier.

## *Échantillon SM6.6*

**Métrologie**

Masse (g) : 4240
Longueur (mm) : 266
Largeur (mm) : 58 (+/- 2)
Épaisseur (mm) : 39 (+/- 3)

**Estampille**

Série Djaoui n°5 : Un timbre rond (12 mm de diamètre) est disposé à côté d'un timbre rectangulaire (25 x 8 mm). L'ensemble est apposé au milieu d'une des grandes faces. Aucune inscription n'est visible.

**Particularités morphologiques**

La barre est légèrement corrodée (fig. 196 et 197). Il n'y a qu'une légère pellicule superficielle détériorée et rongée. On ne peut donc pas observer son état de surface initial, mais l'estampille reste visible.

**Macrographie**

La propreté inclusionnaire est assez élevée par rapport aux autres échantillons étudiés du type 4C (fig. 196 et 197). Les inclusions et les porosités se concentrent principalement à l'une des extrémités, parfois dans des dimensions importantes (1 à 3 mm) en partie accentuées par la corrosion actuelle. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % des 2 faces usinées.

L'attaque au nital fait apparaître une barre constituée d'une unique loupe hétérogène à moitié aciérée (51 % des 2 faces usinées) sans organisation particulière. Les zones carburées sont les plus compactes et les moins corrodées.

**Conclusion**

Cet échantillon est un exemple un peu particulier de ce type de barre avec une propreté inclusionnaire plus élevée que de coutume. Inversement, il vient confirmer que le type 4C est le plus souvent à moitié aciérée et à moitié ferritique. Ceci est dû à l'hétérogénéité initiale de la loupe.

---

## *Échantillon SM6.7*

**Métrologie**

Masse (g) : 3820
Longueur (mm) : 264
Largeur (mm) : 63 (+/- 3)
Épaisseur (mm) : 43 (+/- 3)

**Particularités morphologiques**

La barre n'est pas trop corrodée en profondeur (fig. 196 et 197). En revanche, une pellicule superficielle est détériorée et se délite. On ne peut donc pas observer l'état de surface initial.

**Macrographie**

L'usinage permet de voir que la corrosion a pénétré plus profondément que dans l'échantillon SM6.6 (fig. 196 et 197). La propreté inclusionnaire de la pièce n'est pas particulièrement élevée. Il subsiste encore de très nombreuses porosités et inclusions dont les grandes dimensions (1 à 3 mm) ont été certainement accentuées par l'hydroxydation. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2 % des deux faces usinées. Elles sont localisées sans zonage particulier.

L'attaque au nital révèle une structure mi-ferritique mi-aciérée (54 % des deux faces usinées) sans zonage particulier, issue de l'hétérogénéité initiale de l'unique loupe mise en œuvre.

**Conclusion**

Cet échantillon prouve une nouvelle fois que le taux de compactage du type 4C n'est pas particulièrement élevé et que leur structure hétérogène, avec une moitié ferritique et une autre aciérée, est généralement issue de l'unique loupe initiale.

## *Échantillon SM9.3*

**Métrologie**

Masse (g) : 4602
Longueur (mm) : 260
Largeur (mm) : 64 (+/- 1)
Épaisseur (mm) : 47 (+/- 1)

**Particularités morphologiques**

Ce barreau est relativement bien conservé même si des lamelles d'hydroxyde commencent à se détacher de ses surfaces (fig. 201 et 204).

**Macrographie**

La pièce a été tronçonnée au milieu de la face principale dans le sens longitudinal afin d'avoir une vision générale de la hauteur de l'échantillon sur toute la longueur (fig. 201 et 204). Une moitié caractéristique de cette face usinée forme la section 1. L'extrémité de la partie restante a été tronçonnée transversalement afin que l'on observe en coupe une moitié de la largeur (section 2).

La description macrographique concerne uniquement la face usinée constituée par la section 1 et la moitié restante. Le taux de compactage est élevé dans la partie centrale de la barre contrairement aux extrémités qui renferment encore de très grosses inclusions (parfois supérieures à 1 cm de côté) aux multiples faciès d'écrasement. Cette configuration est certainement issue de la technique de mise en œuvre qui vise à aplanir et à marteler les parties centrales pour étirer la loupe. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 4 % de la face usinée.

La barre est constituée d'une seule loupe principalement ferritique (64 % de la face usinée). Les zones aciérées s'étendent principalement autour des porosités et des inclusions plus ou moins refermées qui sont positionnées dans les extrémités, derniers vestiges des puits de diffusion gazeuse présents dans la loupe initiale.

**Micrographie**

***Section 1***

La section 1 correspond à une moitié de la section longitudinale.

La qualité de la propreté inclusionnaire est relativement élevée vers le centre, mais elle est très médiocre à l'extrémité où existent quelques grosses inclusions et porosités (fig. 201 et 204). Ces dernières sont parfois partiellement vidées et prennent quelquefois des formes de replis plus ou moins écrasés. D'une manière générale, les inclusions sont majoritairement amorphes, mais à proximité des surfaces elles sont souvent remplies de fayalite avec de la wustite sous forme dendritique et globulaire. Elles possèdent des formes déchiquetées avec des angles vifs et des contours d'écrasement. Quelques zones très localisées sont encore constituées de chapelets de

micro-inclusions amorphes, zones d'agglomération métallique incomplète. Des fragments de charbon de bois existent au milieu de la masse métallique. Ils constituent un reliquat de la réduction. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 3,1 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 3*.

La section est principalement constituée de ferritique équiaxe (55 % de la section) parfois légèrement écrouie dans le sens longitudinal. Des zones très aciérées à 0,8 % de carbone, pouvant atteindre localement 0,9 % de carbone (45 % de la section), se développent autour des grosses porosités et des grosses inclusions de charbon de bois, mais également dans certaines zones en bordure. Les parties aciérées périphériques comportent de l'acier trempé (troostite), ce qui indique un refroidissement rapide à la suite du dernier cycle de chauffe, probablement pour mieux le manipuler.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

***Section 2***

La section 2 correspond à une moitié de la section transversale.

Elle possède les mêmes caractéristiques que la section 1 (fig. 201 et 204). La masse de métal est bien compactée mis à part quelques grosses porosités et inclusions écrasées. Elles sont principalement présentes dans les parties centrales, mais certaines plus fermées se situent en périphérie. Dans les zones bien compactées, il ne subsiste qu'un petit nombre d'inclusions remplies soit d'amorphe soit de fayalite et de wustite sous forme globulaire et dendritique. Quelques-unes d'entre elles sont en cours d'écoulement. Les porosités sont, de manière générale, assez peu fréquentes. En revanche, il existe quelques replis et quelques zones d'agglomération métallique formées par des chapelets d'inclusions amorphes. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 3,3 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 3*.

L'attaque au nital révèle une section constituée de ferrite non écrouie (32 % de la section) et d'acier très carburé (68 % de la section) généralement eutectoïde, mais parfois hypereutectoïde. Les zones carburées se déploient uniquement autour des porosités et parfois en bordure. Certaines d'entres elles comportent les vestiges d'une trempe sous la forme de troostite.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

**Conclusion**

Le peu d'oxydation (FeO) dissout dans les inclusions témoigne de phases de chauffe très maîtrisées. Elles ont contribué au martelage intensif de la pièce, préférentiellement pratiqué sur la partie centrale pour étirer la loupe. En revanche, les extrémités n'ont pas été correctement compactées. La qualité de l'épuration est donc hétérogène. Globalement, elle est moyenne puisqu'il existe encore des reliquats de réduction (puits de diffusion gazeuse, fragments de charbon de bois) et de nombreuses grosses inclusions.

## *Échantillon SM9.4*

**Métrologie**

Masse (g) : 3200
Longueur (mm) : 250
Largeur (mm) : 67 (+/- 4)
Épaisseur (mm) : 50 (+/- 4)

**Particularités morphologiques**

La barre est globalement très corrodée. Une grande partie des surfaces se délite (fig. 202 et 204). On ne peut donc pas observer son état de surface initial.

**Macrographie**

L'extrémité la plus trapue de la barre a été tronçonnée transversalement pour obtenir une section de toute la largeur (section 2) (fig. 202 et 204). Le morceau restant de l'extrémité a été tronçonné longitudinalement dans l'épaisseur pour observer une section de l'extrémité de la face principale (section 1).

***Section 1***

La section 1, d'une très bonne propreté inclusionnaire, renferme uniquement quelques petites porosités et inclusions. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1,1 % de la section.

L'attaque au nital révèle de rares zones carburées (24 %). Elles se développent préférentiellement en périphérie et autour de certaines porosités, anciens puits de diffusion gazeuse.

***Section 2***

D'une manière générale la section 2 est sensiblement équivalente à la section 1 avec une bonne qualité inclusionnaire. Cependant, dans un angle, une zone possède un compactage moins élevé avec quelques porosités et inclusions assez volumineuses aux contours écrasés. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1,4 % de la section.

L'attaque au nital dévoile de très petites zones aciérées (9 %) repérées en bordure et autour de porosités plus ou moins refermées qui sont des anciens puits de diffusion gazeux.

**Micrographie**

***Section 1***

La section 1 comporte une très bonne propreté inclusionnaire (fig. 202 et 204). Il subsiste quelques inclusions fayalitiques à globules et dendrites de wustite et, plus minoritaires, d'autres uniquement amorphes. Elles possèdent des contours vifs plus ou moins refermés. Certaines d'entre elles sont en cours d'écoulement. Aucun repli n'est visible. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1,1 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 2*.

L'attaque au nital révèle que la masse de métal est majoritairement constituée de ferrite avec un grain équiaxe (76 % de la section). Quelques zones aciérées (de 0,3 à 0,7 % de carbone) se développent en périphérie et autour de certaines grosses porosités ou inclusions, anciens puits de diffusion gazeux. Les zones entre 0,3 % et 0,6 % de carbone couvrent 19 % de la section tandis que les zones à 0,7 % représentent 3 % de la section. Aucun vestige de soudure n'est visible.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

***Section 2***

Elle a propreté inclusionnaire moins élevée que la section 1. Les inclusions sont principalement remplies de fayalite et de dendrite de wustite, mais quelques-unes sont amorphes. Par rapport à la section 1, il existe ici un nombre plus important de porosités vides de scorie, quelques replis et quelques inclusions de fragments de charbon de bois. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1,4 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 2*.

L'attaque au nital révèle une structure principalement ferritique non écrouie (91 % de la section). Les zones aciérées se situent en périphérique et autour d'inclusions parfois constituées de fragments de charbon de bois. Elles peuvent localement atteindre 0,8 % de carbone (2 % de la section). Les zones carburées entre 0,3 % et 0,6 % (7 % de la section) forment la transition entre la ferrite et l'eutectoïde.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

**Conclusion**

Cet échantillon est conforme au type 4C qui est le plus souvent constitué d'une seule loupe hétérogène moyennement bien compactée notamment par rapport au type 1M et 1L.

---

## *Échantillon SM9.11*

**Numéro d'inventaire**

409

**Métrologie**

Masse (g) : 5855
Longueur (mm) : 297 (+/- 1)
Largeur (mm) : 66 (+/- 1)
Épaisseur (mm) : 42 (+/- 2)

**Estampille**

Série Djaoui n°5 : Le milieu d'une des faces principales de la barre porte un timbre rectangulaire (27 x 6 mm) où est écrit à l'envers et inversé « CAECI ». Il est associé à un timbre circulaire (9 mm de diamètre) type poinçon où aucune inscription n'est visible.

**Particularités morphologiques**

Ce barreau fait partie des spécimens les mieux conservés (fig. 203 et 204). Son état de surface tout à fait remarquable témoigne du soin accordé à la finition.

**Macrographie**

D'un point de vue général, la section présente un taux de compactage élevé avec uniquement quelques zones où se développent de très grosses inclusions dont le volume est certainement

accentué par la corrosion actuelle. Il n'y a pas de répartition spatiale significative de ces éléments. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital révèle une structure presque entièrement aciérée (95 % des deux faces usinées) avec uniquement une zone en périphérie ferritique qui pourrait être une décarburation locale involontaire.

**Micrographie**

La section micrographique correspond à un tiers de la face principale usinée.

D'un point de vue micrographique, la propreté inclusionnaire de la section est excellente et très homogène (fig. 203 et 204). Il subsiste uniquement quelques micro-inclusions amorphes et quelques micro-porosités. Des inclusions toujours amorphes se retrouvent également entre les joints de grains. Certaines d'entre elles sont en cours d'écoulement. Une seule inclusion remplie de fayalite et de wustite a été observée en périphérie, proche du bord. Aucun repli n'est visible. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2,9 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 1*. Cette section constitue un des échantillons des barres des Saintes-Maries-de-la-Mer le mieux compacté et le plus propre au niveau inclusionnaire.

L'attaque au nital révèle une structure essentiellement aciérée avec une petite zone de ferrite équiaxe proche du bord (15 % de la section). Les parties aciérées sont essentiellement constituées d'acier eutectoïde trempé (troostite) (77 % de la section) et d'acier entre 0,2 et 0,3 % (8 % de la section).

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

**Conclusion**

Cet échantillon se démarque du type 4C notamment par son taux de compactage très élevé, mais également par sa composition principalement aciérée. En revanche, conformément aux autres, il est fabriqué à partir d'une unique loupe.

---

## *Échantillon SM9.12*

**Numéro d'inventaire**

377

**Métrologie**

Masse (g) : 3878
Longueur (mm) : 238 (+/- 1)
Largeur (mm) : 62 (+/- 2)
Épaisseur (mm) : 38 (+/- 2)

**Estampille**

Série Djaoui n°4 : Le milieu d'une des faces principales de la barre porte un timbre rectangulaire (27 x 5 mm) où est écrit à l'envers et inversé « CAECI ». Il est associé à un autre timbre rectangulaire plus petit (11 x6 mm) où se distingue une sorte d'« A ».

**Particularités morphologiques**

Ce barreau fait partie des spécimens les mieux conservés (fig. 196 et 197). Il présente un état de surface tout à fait remarquable qui témoigne du soin accordé à la finition.

**Macrographie**

Deux des grandes faces de la barre, dont la jonction forme un angle sensiblement perpendiculaire, ont été tronçonnées par microtonimie (jet d'eau à haute pression) pour observer la mise en forme.

La propreté inclusionnaire des deux sections n'est pas particulièrement élevée, mais elle demeure très convenable (fig. 196 et 197). Les inclusions et les porosités, toujours inférieures au centimètre, se développent sans zonage particulier. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital montre, conformément aux autres échantillons de ce type, que la barre est constituée à partir d'une seule loupe aciérée à hauteur de 37 % du volume. Cette composition est issue de l'hétérogénéité initiale de la loupe.

**Conclusion**

Cet échantillon est un exemple supplémentaire montrant que le taux de compactage du type 4C est moyennement élevé et que leur structure est généralement hétérogène avec environ une moitié ferritique et une autre aciérée.

---

## *Échantillon SM24.7*

**Métrologie**

Masse (g) : 6870
Longueur (mm) : 280 (+/- 3)
Largeur (mm) : 75 (+/- 3)
Épaisseur (mm) : 60 (+/- 1)

**Estampille**

Série Djaoui n°1 + ? : Le milieu d'une des faces principales de la barre porte un cartouche rectangulaire (21x5 mm) dont l'inscription n'est pas visible. Sur la même face, à chaque extrémité, il existe un poinçon circulaire de 7 mm de diamètre sans inscription (série Djaoui inconnue).

**Particularités morphologiques**

Cet échantillon est le plus gros spécimen étudié du type 4C puisqu'il possède un volume deux fois plus gros que certains autres (fig. 196 et 197). Ses surfaces sont relativement bien conservées, mais l'oxydation périphérique commence à être importante et fait boursoufler ou éclater la majeure partie des faces.

**Macrographie**

La propreté inclusionnaire des deux faces usinées n'est pas élevée (fig. 196 et 197). Il demeure de très nombreuses porosités ou inclusions dont la grosseur est parfois accentuée par la corrosion qui a d'ailleurs largement gagné le cœur de la barre. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % des deux faces usinées. Les inclusions et les porosités se situent principalement dans les extrémités et dans le cœur de la barre

L'attaque au nital montre une structure très hétérogène avec de très nombreux petits ilots d'acier localisés sur toutes les faces. La ferrite forme la majeure partie du volume (63 % des deux faces usinées). Cette composition est certainement issue de l'hétérogénéité structurale de la loupe initiale.

**Conclusion**

Cet échantillon est un exemple supplémentaire qui montre que le taux de compactage du type 4C n'est pas particulièrement élevé et que sa structure est généralement hétérogène. Cependant, ici, la partie aciérée couvre une petite zone contrairement à l'ensemble du lot où elle s'étend sur une moitié.

---

## *Échantillon SM24.8*

**Métrologie**

Masse (g) : 5130
Longueur (mm) : 300 (+/- 1)
Largeur (mm) : 56 (+/- 2)
Épaisseur (mm) : 53 (+/- 2)

**Particularités morphologiques**

Les surfaces de cet échantillon sont relativement bien conservées, mais l'oxydation périphérique commence à être importante et fait boursoufler ou éclater la majeure partie des faces (fig. 196 et 197).

**Macrographie**

La propreté inclusionnaire des deux faces usinées n'est pas particulièrement élevée (fig. 196 et 197). Il demeure de très nombreuses porosités et inclusions dont la grosseur est parfois accentuée par la corrosion. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital révèle une structure hétérogène avec quelques petits ilots d'acier présents principalement aux extrémités et en périphérie. La ferrite couvre la majeure partie du volume (87 % des deux faces usinées). Les zones aciérées sont certainement issues de l'hétérogénéité structurale de la loupe initiale.

**Conclusion**

Cet échantillon est un exemple supplémentaire qui montre que le taux de compactage du type 4C n'est pas particulièrement élevé et que sa structure est généralement hétérogène. Cependant, ici la partie aciérée couvre une petite zone contrairement à l'ensemble du lot où elle s'étend sur une moitié.

# TYPE 4L

## *Morphologie générale*

Le type 4L est le plus gros demi-produit de la typologie élaborée à partir des découvertes des Saintes-Maries-de-la-Mer. Ces longues barres (80 à 190 cm) sont toujours très massives (entre 20 et 30 kg) avec une section rectangulaire importante (6 x 5 cm +/- 1) (fig. 211). Toutes ses faces, y compris les extrémités, sont martelées de manière à aménager des surfaces très planes. Sur l'ensemble des échantillons étudiés, aucun indice ne suggère différents pas de martelage. Ce type porte parfois l'estampille n° 7 et 8 de la série Djaoui.

## *Échantillon SM24.1*

**Métrologie**

Masse (g) : 13950
Longueur (mm) : 1160
Largeur (mm) : 58 (+/- 2)
Épaisseur (mm) : 40 (+/- 3)

**Expérimentation**

Les loupes 1 (prioritaire) et 2 ont servi de demi-produit dans le cadre d'une expérimentation menée au Franois (25) en septembre 2005 par l'UMR 5060 de Belfort (90).

**Particularités morphologiques**

Cette barre ne présente pas d'extrémités façonnées (fig. 208 et 210). La corrosion importante les a totalement détruites. Elles sont donc très poreuses. Deux tronçons comportent un angle plus corrodé à environ 30 et 55 cm de l'extrémité la plus trapue (respectivement sur 20 et 10 cm). Cette hétérogénéité pourrait peut-être indiquer des zones de soudure.

**Macrographie**

Une des deux faces principales de la barre a été usinée afin que l'on observe la mise en forme (fig. 208 et 210). Ainsi, les zones étudiées à l'échelle micrographique sont prélevées de manière significative et pertinente. Les deux sections retenues correspondent aux deux soudures inter-loupes et à leurs abords qui sont localisés dans les deux extrémités.

D'une manière générale, la barre possède une propreté inclusionnaire peu élevée à cette échelle. En effet de très nombreuses porosités et inclusions se concentrent dans plusieurs zones localisées tout au long de la barre. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2 % de la face usinée.

Après attaque au nital, la barre apparaît essentiellement ferritique (98 % de la section). De très rares zones aciérées sont établies en périphérie. Cette attaque permet aussi de révéler 3 soudures inter-loupes qui assemblent par conséquent 4 loupes distinctes. Les 2 loupes entièrement conservées (loupe n° 2 et 3) sont sensiblement de même volume.

**Micrographie**

***Section 1***

La section 1 correspond à la zone de soudure entre les loupes 3 et 4 et l'extrémité corrodée de la barre.

L'extrémité corrodée de la barre (loupe 4) livre une propreté inclusionnaire moins élevée par rapport au reste de la masse métallique puisqu'il subsiste beaucoup de porosités et d'inclusions aux contours encore mous (fig. 208 et 210). Le reste de la section est mieux épuré même s'il existe quelques zones d'agglomération métallique incomplète et des inclusions essentiellement fayalitiques avec de la wustite sous forme globulaire. En revanche, il ne reste aucun véritable repli. La zone de soudure diffère de l'ensemble car elle est légèrement mieux compactée. La propreté inclusionnaire des loupes 4 et 3 est différente. La loupe 3 renferme en effet beaucoup moins d'inclusions, mais en revanche plus de porosités, anciennes inclusions où la scorie s'est écoulée. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1,4 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 3*.

L'attaque au nital révèle une soudure qui alterne des deux côtés entre ferrite et acier légèrement carburé (0,1 % de carbone) avec un tracé irrégulier parfois légèrement décarburé. La loupe 4, qui forme l'extrémité de la barre, est essentiellement ferritique avec une alternance de gros et de petits grains non écrouis. Très homogène, elle renferme toutefois quelques zones aciérées localisées tantôt autour de porosités ou de fissures tantôt sur les bords. Elles peuvent par endroits atteindre un acier eutectoïde à 0,8 % de carbone. La loupe 3, équivalente à la loupe 4, est principalement ferritique avec parfois des énormes grains et localement quelques macles. Il s'y développe quelques zones plus aciérées. La zone de soudure de la loupe 3 est légèrement plus carburée que celle de la loupe 4. L'ensemble de la section comporte 80 % de ferrite, 18 % d'acier inférieur à 0,3 % de carbone et 2 % d'acier entre 0,7 et 0,8 %.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie montre que l'alliage ferreux des loupes 3 et 4 contient de manière homogène entre 0,1 et 0,6 % de phosphore.

***Section 2***

La section 2 correspond à la zone de soudure entre les loupes 1 et 2.

D'une manière générale, la section 2 comporte légèrement plus de porosités et d'inclusions que la section 1 (fig. 208 et 210). Elles se tiennent essentiellement dans la loupe 1, à la limite de la soudure visible après l'attaque au nital. La propreté inclusionnaire de la loupe 2 est exceptionnelle et très homogène. Il ne subsiste plus que quelques micro-porosités et quelques inclusions toujours remplies de fayalite et de wustite sous forme essentiellement globulaire. Les inclusions amorphes sont exemptes de la section. Il n'existe pas de véritable repli. La zone de soudure est très correctement compactée. La loupe 1 contient en revanche beaucoup de porosités aux contours vifs et déchiquetés, légèrement plus grosses que la moyenne. Elles sont, soit partiellement vidées de leur scorie, soit en cours d'écoulement. Il n'y a en revanche pas de repli. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1,6 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 3*.

L'attaque au nital révèle une soudure exceptionnelle, ferrite sur ferrite, avec un tracé légèrement irrégulier. Par endroits, cette soudure est cependant légèrement enrichie en carbone (cémentation) avec un acier à 0,1 %. Les loupes 1 et 2 sont homogènes et identiques. Elles sont essentiellement

constituées de ferrite aux grains non écrouis dont la taille, très variable, change brusquement. Quelques zones très localisées sont légèrement carburées à 0,1 % de carbone. Très localement, proche de la surface, il est possible d'observer un épiphénomène de micro-damas dû à la dissipation de l'énergie de choc. L'ensemble de la section comporte 94 % de ferrite et 6 % d'acier inférieur à 0,3 % de carbone.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie montre que l'alliage ferreux des loupes 1 et 2 contient uniformément entre 0,1 et 0,6 % de phosphore.

**Conclusion**

Cette barre est fabriquée à partir de quatre loupes remarquablement soudées. Les zones de soudure sont parfois légèrement cémentées probablement pour abaisser la température du « blanc soudant » et ainsi faciliter l'opération. Chacune des loupes est beaucoup moins bien compactée par rapport aux autres types de barre. Cependant si l'on considère le volume de métal traité, l'épuration demeure correcte. Il existe donc une contradiction entre la qualité des soudures et la qualité de l'épuration. Cette barre se distingue de tous les autres types par sa composition essentiellement ferritique (0,02 % de carbone) et phosphoreuse (entre 0,1 % et 0,6 % de phosphore).

## *Échantillon SM24.2*

**Métrologie**

Masse (g) : 2290
Longueur (mm) : 1483 (+/- 3)
Largeur (mm) : 56 (+/- 2)
Épaisseur (mm) : 43 (+/- 3)

**Estampille**

Série Djaoui n°8 : Deux estampilles identiques sont apposées sur les 2 extrémités d'une des faces principales. Chacune est constituée d'un timbre circulaire (10 (+/- 1) mm de diamètre) encadré par deux cartouches rectangulaires parallèles (20 (+/- 3) x 5 (+/- 1) mm). Si aucune inscription n'est visible, il semble, malgré la corrosion, qu'au moins un des timbres circulaires soit plus profond que les cartouches rectangulaires.

**Morphologie**

Toutes les faces sont uniformément corrodées (fig. 209 et 210). Des plaques d'oxydation se forment et se délitent par endroits sur parfois de grandes surfaces.

**Macrographie**

La propreté inclusionnaire de la barre n'est pas particulièrement élevée (fig. 209 et 210). Les inclusions et les porosités se développent dans l'ensemble de la barre parfois en très grand nombre, hormis au milieu des 2 plus grandes loupes (Loupe 3 et 4) qui ont dû être largement martelées au milieu pour être étirées (observation réalisée après l'attaque au nital). À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital révèle que la barre est essentiellement formée de ferrite (95 % des 2 faces usinées) avec quelques rares îlots d'acier. Elle montre également que la barre est faite à partir de

cinq loupes de volumes variables, soudées ensemble en quatre endroits. Les plus petites sont regroupées dans une moitié (Loupe 1 à 3) tandis que les deux plus grosses forment l'autre moitié (Loupe 3 et 4).

**Micrographie**

***Section 1***

La section 1 concerne la soudure entre la loupe 1 et 2, et ses abords et l'extrémité de la barre formée par la loupe 1.

Les deux loupes (1 et 2) possèdent de multiples inclusions plus ou moins remplies de fayalite et de wustite sous la forme de globules et de dendrites (fig. 209 et 210). Des porosités de quelques microns partiellement refermées sont également présentes en grand nombre à côté de nombreux replis. Plus localement, il existe des zones d'agglomération métallique incomplète ou des fissures intergranulaires. L'extrémité de la barre formée par la loupe 1 montre par endroits un faciès de loupe très peu épurée (proche de son état initial) avec de nombreux chapelets d'inclusions remplies de fayalite et de wustite. Autour de la soudure, certaines zones sont mieux compactées et épurées. D'une manière générale, si la loupe 1 est moins compactée que la loupe 2, toutes les deux affichent, dans le cadre de cette section, une propreté inclusionnaire médiocre notamment par rapport à l'ensemble des autres types étudiés. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2,8 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 4*.

L'attaque au nital révèle deux loupes (Loupes 1 et 2) essentiellement ferritiques avec un grain équiaxe (94 % de la section). Très localement, quelques zones aciérées ne possèdent pas plus de 0,2 % de carbone (4 % de la section) dans la loupe 1 et de 0,4-0,5 % de carbone dans la loupe 2 (2 % de la section). L'attaque au nital révèle également une soudure ferrite sur ferrite entre les loupes 1 et 2. Malgré la médiocre qualité du métal, la soudure est réellement d'excellente facture et parfaitement réalisée. À proximité de la soudure, du côté de la loupe 1, les grains de ferrite sont beaucoup plus gros que du côté de la loupe 2. Cela pourrait suggérer que la loupe 1 a été beaucoup plus chauffée lors de la soudure. Dans l'extrémité de la barre formée par la loupe 1, de nombreuses petites soudures secondaires aux multiples directions sont associées au compactage des porosités et des inclusions du massiau initial.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie montre que l'alliage ferreux des loupes 1 et 2 contient entre 0,1 et 0,6 % de phosphore.

***Section 2***

La section 2 concerne la soudure entre la loupe 2 et 3 et ses abords.

D'une manière générale, la loupe 3 est légèrement mieux épurée que la loupe 2, mais leur propreté inclusionnaire reste assez médiocre, comme dans le cadre de la section 1 (fig. 209 et 210). Ici, il n'y a cependant pas de repli visible. En revanche, il subsiste de nombreuses zones d'agglomération métallique incomplète (chapelets d'inclusions amorphes) principalement localisées près des bords. Dans le cœur, les inclusions et les porosités ont des formes plus anguleuses et sont remplies de fayalite avec de la wustite sous la forme de fines dendrites. La forme générale des impuretés précédemment évoquées montre un sens d'écrasement à partir des deux bords, conformément à une mise en forme traditionnelle. Des micro-inclusions et des micro-porosités se développent également sans zonage particulier. Au niveau de la soudure, la propreté inclusionnaire est nettement plus élevée. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des

porosités et des zones hydroxydées représente environ 1,3 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 1*.

L'attaque au nital révèle une structure essentiellement ferritique avec des grains équiaxes (77 % de la section). Il existe localement des petits îlots d'acier n'excédant pas 0,7 % de carbone dans les deux loupes (13 % de la section a entre 0,3 et 0,7 % de carbone). Cette composition est issue de l'hétérogénéité initiale des loupes. Par endroits, en surface, quelques zones sont en revanche très légèrement cémentées jusqu'à 0,3 % de carbone (10 % de la section). Si la loupe 3 est mieux compactée, dans cette section elle apparaît aussi légèrement moins hétérogène. La soudure entre les deux loupes est un assemblage ferrite sur ferrite. Sa réalisation est si exceptionnelle qu'elle n'est plus visible par endroits.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie montre que l'alliage ferreux des loupes 2 et 3 contient entre 0,1 et 0,6 % de phosphore.

***Section 3***

La section 3 concerne la soudure entre la loupe 3 et 4 et ses abords.

La loupe 4 est légèrement mieux épurée que la loupe 3 et la propreté inclusionnaire générale est meilleure que dans les sections 1 et 2 (fig. 209 et 210). Il reste des inclusions remplies de fayalite et de wustite (globulaire et dendritique) et un semis de micro-inclusions et de micro-porosités avec quelques rares replis. Dans la loupe 3, le nombre de ces impuretés est beaucoup plus élevé que dans la loupe 4. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2,5 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 1*.

L'attaque au nital révèle une composition homogène ferritique (77 % de la section). Les grains, toujours équiaxes, sont localement gros autour des porosités, conséquence directe d'une meilleure transmission de la chaleur due à l'inertie thermique de ces puits de diffusion gazeux. En général, les grains sont petits. Les zones légèrement aciérées sont situées en périphérie et par endroits le long de la soudure inter-loupes (10 % de la section comportent un acier à 0,3 % de carbone, 7 % de la section possèdent entre 0,3 et 0,6 % de carbone et 6 % entre 0,6 et 0,8 %). Pour certaines, il s'agit donc de cémentions involontaires très locales. La soudure inter-loupes associe remarquablement 2 zones essentiellement ferritiques, avec une qualité technique sensiblement identique aux autres assemblages de cette barre.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie montre que l'alliage ferreux de la loupe 3 contient entre 0,1 et 0,6 % de phosphore, contrairement à la loupe 4.

***Section 4***

La section 4 concerne la soudure entre la loupe 4 et 5 et ses abords.

Les loupes 4 et 5 possèdent une qualité d'épuration nettement meilleure que celle observée dans les loupes 1, 2 et 3, mais elle demeure moins élevée que dans les types 1L et 1M. Il subsiste des inclusions remplies de fayalite avec de la wustite (globules et dendrites), des porosités non refermées, des zones d'agglomération métallique incomplète et un semis de micro-porosités et de micro-inclusions (fig. 209 et 210). Il existe également une série de micro-cavités circulaires qui témoignent de température de forge très élevée. En revanche, il n'y a pas de repli. À proximité de la soudure, la qualité inclusionnaire est moins élevée, notamment à cause d'une augmentation générale du nombre d'impuretés, quel qu'en soit le type. À cette échelle, l'ensemble des

inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1,3 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 1*.

L'attaque au nital montre que les deux loupes, au niveau de cette section, sont essentiellement ferritique avec un grain équiaxe (99 % de la section). En périphérie, il existe quelques cémentations locales peu profondes (0,1 % de carbone). D'une manière générale, les grains de ferrite sont légèrement plus gros dans le cœur de la barre. La soudure associe deux parties ferritiques. Elle témoigne d'une très grande qualité de fabrication avec une maîtrise technique exceptionnelle. En effet, elle assemble parfaitement les deux loupes. Elle est d'ailleurs par endroits presque invisible. Pratiquement aucune inclusion n'est visible le long de son tracé.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie montre que l'alliage ferreux des loupes 4 et 5 ne contient pas de phosphore.

***Section 5***

La section 5 correspond à l'extrémité de la barre formée par la loupe 5. Cette section concerne l'épaisseur de la barre afin d'observer en coupe les estampilles.

La propreté inclusionnaire de cette partie est relativement médiocre (fig. 209 et 210). Il subsiste de nombreuses inclusions remplies de fayalite et de globules de wustite. Il existe également de multiples porosités aux divers faciès d'écrasement plus ou moins refermés et de nombreux replis. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 3,4 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 4*. Les creusements des cartouches rectangulaires et du timbre circulaire comportent des angles vifs, ce qui signifie qu'ils sont réalisés avec un outil possédant lui-même des angles vifs. Il n'est cependant pas possible d'aller plus en avant dans les observations car la corrosion a déjà entamé sérieusement la surface de la barre.

L'attaque au nital révèle une composition principalement ferritique avec un grain équiaxe (92 % de la section). L'unique zone aciérée (8 % de la section) concerne toute l'extrémité de la barre avec structure trempée à 0,8 de carbone (bainite nodulaire).

**Conclusion**

Cette barre, constituée de cinq loupes (quatre soudures inter-loupes), est essentiellement composée d'un alliage ferritique, mais seulement les trois plus petites d'entre elles (loupes 1 à 3) sont riche en phosphore (entre 0,1 et 0,6 %). Si une médiocre qualité de compactage est observée sur une majorité de la barre (Loupe 1 à 3), toutes les soudures réalisées possèdent une très grande qualité de réalisation. Cette dichotomie technique est un élément important pour comprendre les raisons qui ont motivé la fabrication de ce type de barre, le plus gros et long spécimen des types découverts aux Saintes-Maries-de-la-Mer. La plus grande propreté inclusionnaire des loupes 4 et 5 peut être expliquée par leur gros volume qui nécessite un grand étirement et donc un meilleur compactage. Cette différence de compactage pourrait aussi être expliquée par la composition distincte de ces deux loupes qui ne contiennent pas de phosphore. Celui-ci implique des contraintes thermiques importantes. Il est plus facilement forgeable entre 700 et 900°C. Il semble cependant que la première hypothèse soit davantage valide puisqu'aucun signe technique (fissuration intergranulaire importante) ne permet d'envisager la seconde. Les différences de volume et de composition observées entre les loupes 1 à 3 et les loupes 4 et 5 pourraient peut-être indiquer que la matière première assemblée provient de différents lieux de réduction. Suivant cette hypothèse, les demi-produits seraient fabriqués par des grossistes qui s'approvisionneraient en loupes provenant de divers centres de réduction.

## *Échantillon SM24.3*

### Métrologie

Masse (g) : 27140
Longueur (mm) : 1624
Largeur (mm) : 66 (+/- 2)
Épaisseur (mm) : 47 (+/- 3)

### Particularités morphologiques

La dimension de la section de la barre varie de manière importante d'une extrémité à l'autre (fig. 206 et 207). Étant donné qu'elle est l'un des spécimens les plus volumineux du type 4L, elle pourrait peut-être former le volume maximum de métal que les forgerons du type 4L soient capables de travailler. Elle est correctement conservée mise à part une extrémité qui est totalement corrodée. La corrosion fait éclater ou boursoufler localement toutes les surfaces.

### Macrographie

La propreté inclusionnaire de cette barre est plutôt élevée notamment par rapport à l'ensemble des barres étudiées de ce type (fig. 206 et 207). Quelques porosités et inclusions, plutôt de grande dimensions (5 mm), se développent sans zonage particulier. La dimension de certaines d'entre elles est accentuée par une légère corrosion. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % des 2 faces usinées.

L'attaque au nital met en évidence une structure entièrement ferritique (100 % des deux faces usinées) constituée à partir de quatre loupes soudées (trois soudures inter-loupes). La soudure entre les loupes 1 et 2 ne semble pas parfaitement réalisée. Il reste en effet une grande cavité le long de son tracé. Les deux autres soudures témoignent en revanche à cette échelle d'une facture de qualité. Même si la loupe 3 est plus petite que les autres, les faibles différences de volume ne peuvent pas signaler une quelconque divergence de provenance.

### Conclusion

Cette barre offre un nouvel exemple du type 4L avec une composition essentiellement ferritique de quatre loupes. Elle diverge de l'ensemble des autres individus par son taux de compactage qui paraît légèrement plus élevé et par l'important volume de métal assemblé qui a pu poser quelques problèmes notamment dans l'uniformisation de la taille de la section et dans la réalisation d'une soudure entre les loupes 1 et 2.

## *Échantillon SM24.4*

### Métrologie

Masse (g) : 17870
Longueur (mm) : 1358 (+/-)
Largeur (mm) : 57 (+/- 3)
Épaisseur (mm) : 43 (+/- 3)

### Estampille

Série Djaoui n°8 : Une estampille est apposée sur l'extrémité d'une des grandes faces. Elle est composée d'un timbre circulaire (10 (+/- 1) mm de diamètre) encadré par deux timbres

rectangulaires parallèles (20 (+/- 3) x 5 (+/- 1) mm). Si aucune inscription n'est visible, il semble, malgré la corrosion, que le timbre circulaire soit plus profond que le cartouche rectangulaire.

**Particularités morphologiques**

Toutes les surfaces sont uniformément corrodées (fig. 206 et 207). Des plaques d'oxydation se forment et se délitent par endroits, parfois sur de grandes zones, mais la barre est conservée dans son intégralité. Sa section s'affine légèrement et progressivement d'une extrémité à l'autre.

**Macrographie**

Comme l'échantillon SM24.3, celui-ci possède une bonne propreté inclusionnaire par rapport à l'ensemble des barres étudiées de ce type (fig. 206 et 207). En revanche, ici la corrosion est beaucoup plus développée notamment dans les deux extrémités. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital signale que la barre est constituée de trois loupes de volume sensiblement équivalent. Une importante soudure secondaire de compactage de la loupe 2 est associée à la soudure inter-loupe avec la loupe 3. Si cette dernière est essentiellement ferritique, par contre la loupe 1 est en partie aciérée et la loupe 2 l'est pratiquement entièrement. L'ensemble des zones carburées couvrent 42 % des deux faces usinées.

**Conclusion**

Cette barre montre que si le type 4L est toujours multi-loupes, certaines loupes peuvent être largement aciérées. La composition structurale différente des loupes pose le problème de leur origine commune ou distincte.

---

## *Échantillon SM24.5*

**Métrologie**

Masse (g) : 13920
Longueur (mm) : 1352
Largeur (mm) : 47 (+/- 3)
Épaisseur (mm) : 36 (+/- 2)

**Estampille**

Série Djaoui n°8 : Une estampille est apposée sur l'extrémité d'une des grandes faces. Elle est constituée d'un timbre circulaire (10 (+/- 1) mm de diamètre) encadré par deux cartouches rectangulaires parallèles (20 (+/- 3) x 5 (+/- 1) mm). Si aucune inscription n'est visible, il semble, malgré la corrosion, que le timbre circulaire soit plus profond que les cartouches rectangulaires.

**Particularités morphologiques**

Toutes les surfaces sont uniformément corrodées (fig. 206 et 207). Des plaques d'oxydation se forment et se délitent par endroits parfois sur de grandes zones, mais la barre est conservée dans son intégralité. Sa section s'affine légèrement et progressivement d'une extrémité à l'autre.

**Macrographie**

La propreté inclusionnaire de cette barre est conforme à ce type (fig. 206 et 207). Moyennement épurée, elle possède de multiples inclusions ou porosités qui se développent préférentiellement

aux extrémités ou par petits groupes le long de la barre. Leur grosseur est parfois accentuée par la corrosion actuelle. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital permet de déterminer que la barre est essentiellement ferritique (100 % des deux faces usinées) et constituée à partir de quatre loupes soudées. Si les loupes 1 et 4 sont de grosses dimensions, les loupes 2 et 3 possèdent des volumes deux fois plus petits.

**Conclusion**

Entièrement ferritique et constituée de quatre loupes, cette barre est conforme à l'ensemble du type 4L. Ses loupes se rapportent à deux volumes différents. Cette variabilité souligne peut être des lieux de productions distincts.

---

## *Échantillon SM24.6*

**Métrologie**

Masse (g) : 9480
Longueur (mm) : 1015
Largeur (mm) : 53 (+/- 2)
Épaisseur (mm) : 29 (+/- 3)

**Estampille**

Série Djaoui n°8 : Une estampille est apposée sur l'extrémité d'une des grandes faces. Elle est constituée d'un timbre circulaire (10 (+/- 1) mm de diamètre) encadré par deux timbres rectangulaires parallèles (20 (+/- 3) x 5 (+/- 1) mm). Si aucune inscription n'est visible, il semble, malgré la corrosion, que le timbre circulaire soit plus profond que les deux autres.

**Particularités morphologiques**

Cette barre est bien conservée (fig. 206 et 207). Même si ses faces sont très corrodées, elles livrent toujours un aspect lisse. En revanche, une de ses extrémités a totalement disparu, certainement à cause d'un phénomène de corrosion différentielle.

**Macrographie**

La propreté inclusionnaire de cette barre est très moyenne (fig. 206 et 207). Il subsiste de très nombreuses inclusions et porosités dont la grosseur est parfois accentuée par la corrosion actuelle. Elles sont principalement localisées aux extrémités. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital permet de mettre en évidence une composition de quatre loupes entièrement aciérées. S'il est difficile de connaître la taille de la loupe 4 à cause de la corrosion de son extrémité, il apparaît que la loupe 1 est deux fois plus petite que les loupes 2 et 3. La loupe 3 apparaît la mieux compactée peut-être parce qu'elle est la plus grosse et donc la plus étirée.

**Conclusion**

Cette barre fournit le seul exemple du type 4L entièrement aciéré. En cela, il diffère radicalement des autres individus étudiés même s'il est constitué de quatre loupes soudées conformément au

type. Cette dichotomie pose la question des origines peut-être différentes des barres ou des loupes mises en œuvre.

# TYPE 5C

## *Morphologie générale*

Courte barre métallique trapue (26 à 30 cm de longueur) et renflée au milieu qui comporte deux extrémités légèrement amincies et une section rectangulaire (50 x 35 mm) (fig. 214). Il correspond au type dit en forme de « saumon ». Les faces des extrémités ne semblent pas particulièrement mises en forme, à moins que ceci ne soit dû à un phénomène de corrosion. Sur l'échantillon étudié, aucun indice ne suggère différentes zones de martelage ou une fréquence dans les zones martelées. En principe, ce type de barre ne porte pas d'estampille. Par rapport à leur volume général, le type 5C est voisin du type 4C dont la forme est en revanche parallélépipédique.

## *Échantillon SM6.2*

### Métrologie

Masse (g) : 2838
Longueur (mm) : 272
Largeur (mm) : 48 (+/- 7)
Épaisseur (mm) : 36 (+/- 6)

### Particularités morphologiques

La corrosion a gagné l'ensemble de la pièce (fig. 212 et 213). Même si des plaques d'hydroxyde se délitent, les surfaces semblaient initialement lisses. Les extrémités sont difficilement observables, mais elles ne paraissent pas avoir une mise en forme particulière.

### Macrographie

A cette échelle, cette barre possède une mauvaise propreté inclusionnaire, bien plus faible que le type 4C voisin morphologiquement (fig. 212 et 213). Des gros fragments de charbon de bois (plus d'1 cm de côté) sont visibles dans une extrémité. Les porosités et les inclusions toujours très écrasées se concentrent sur la face la plus large. Ceci montre que le martelage a préférentiellement porté sur ce côté et son opposé. La configuration indique clairement qu'il s'agit d'une loupe proche de l'état initial avec un faible taux dont de compactage et d'agglomération. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2 % des deux faces usinées.

L'attaque au nital révèle une composition hétérogène issue d'une unique loupe. Les zones aciérées concernent uniquement la périphérie de la masse. L'ensemble est majoritairement ferritique (74 % des deux faces usinées).

### Micrographie

La section micrographique correspond à la moitié de la face latérale usinée qui renferme encore des fragments de charbon de bois.

La propreté inclusionnaire de la section est moyenne (fig. 212 et 213). Il existe en effet de nombreuses zones d'agglomération métallique incomplète, des inclusions plus ou moins remplies de fayalite avec de la wustite principalement globulaire. Des porosités sont également présentes avec des contours plus ou moins écrasés, mais il n'y a pas de repli. En revanche, de très gros fragments de charbon de bois sont visibles. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 3,6 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 4*.

L'attaque au nital indique une composition hétérogène principalement ferritique (53 % de la section). Plus ou moins localement, des zones carburées peuvent atteindre 0,8 de carbone (28 % de la section) avec généralement des faciès de trempe (troostite). Les transitions sont progressives. Une zone intermédiaire à 0,3-0,5 % de carbone (19 % de la section) est souvent localisée entre les parties ferritiques et celles eutectoïdes. La majorité du métal entourant les charbons offre des décarburations périphériques, mais il existe parfois quelques zones carburées jusqu'à l'hypereutectoïde autour de petits fragments de charbon de bois.

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

**Conclusion**

Cet échantillon montre que le type 5C est constitué d'une unique loupe partiellement compactée. L'existence de nombreux fragments de charbon de bois issus de la réduction pourrait indiquer que le compactage du massiau initial a été réalisé dans la suite directe de la réduction. Dans tous les cas, ces observations signifient clairement que l'attention portée au compactage de ce type n'est pas particulièrement grande. Même si cet échantillon est principalement ferritique (74 % des deux faces usinées), ce type semble hétérogène comme le type 4C. C'est à dire qu'il ne possède pas de caractéristique structurale réellement discriminante comme le type 2M ou 4L. Ces considérations abondent dans le sens d'un demi-produit sans spécificité particulière, à faible valeur ajoutée. Seul un échantillon du type 5C a pu être étudié notamment parce que sa disponibilité documentaire est mauvaise. Il faudra donc multiplier ce type d'étude sur d'autres échantillons pour s'assurer de la récurrence des ces observations.

# TYPE 6C

## *Morphologie générale*

Courte masse de fer (de 27 à 33 cm) de section rectangulaire (10 x 4 cm +/- 1) qui possède un aspect aplati et massif (fig. 218). Toutes les faces, y compris les extrémités, sont mises en forme de plat. Les angles entre celles-ci sont souvent arrondis, mais sensiblement perpendiculaire. Sur l'ensemble des échantillons étudiés, aucun indice ne suggère différentes zones de martelage ni une fréquence dans les zones martelées. Ce type ne porte généralement pas d'estampille.
Tous les échantillons ont été sortis de l'eau anciennement. Par conséquent, toutes les surfaces, et en particulier les extrémités, sont largement gagnées par la corrosion. L'état de surface conservé dans l'hydroxyde montre cependant qu'initialement les faces étaient correctement martelées de manière à former des surfaces sensiblement planes.

## *Échantillon SM6.1*

**Métrologie**

Masse (g) : 4910
Longueur (mm) : 320
Largeur (mm) : 89 (+/- 2)
Épaisseur (mm) : 43 (+/- 3)

**Macrographie**

Une seule des 2 faces principales a été usinée pour observer la mise en forme.

A cette échelle, la propreté inclusionnaire de la pièce est élevée (fig. 216 et 217). Par endroits, il subsiste uniquement quelques zones moins bien agglomérées où se développent des inclusions et des porosités. Certaines d'entre elles, principalement situées en périphérie, ont donné naissance à la corrosion actuelle. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % de la face usinée.

L'attaque au nital révèle une structure principalement ferritique (75 % de la face usinée). Les zones aciérées sont toutes regroupées sur le bord d'un côté et des extrémités. Ces dernières ne possèdent pas une propreté inclusionnaire particulière.

**Micrographie**

La section micrographique correspond à la moitié la moins corrodée de la face usinée.

La qualité de l'épuration est très bonne, notamment si l'on considère l'homogénéité de la masse de métal traitée (fig. 216 et 217). Il existe néanmoins un nombre important de replis plus ou moins fermés et plus ou moins gros (parfois 1 mm). Les porosités sont relativement peu nombreuses tandis que les inclusions, encore plus minoritaires, sont remplies majoritairement de fayalite et de wustite globulaire et dendritique. Quelques-unes peuvent être amorphes. Certaines parties très localisées renferment des zones d'agglomération métallique incomplète formées par

des chapelets d'inclusions principalement amorphes. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 0,5 % de la section polie et, suivant la norme AFNOR NF 04-106 corrigée d'un facteur 10, l'échelle 1*.

L'attaque au nital révèle une structure essentiellement ferritique (71 %) à gros grains équiaxes. Un reliquat d'écrouissage transversal est visible dans les grains du centre de la section. Les zones carburées sont uniquement situées en périphérie. Elles possèdent un acier à 0,8 % de carbone entièrement trempé (troostite) (14 % de la section). La transition avec la zone ferritique est progressive par l'intermédiaire d'un acier entre 0,4 et 0,6 % de carbone (15 % de la section).

L'attaque Oberhoffer de la section à nouveau polie après l'attaque au nital montre que l'alliage ferreux ne contient pas de phosphore.

**Conclusion**

Cet échantillon définit le type 6C comme étant formé d'une unique loupe hétérogène, mais principalement ferritique, qui est correctement compactée malgré la présence de nombreux replis parfois importants.

## *Échantillon SM6.8*

**Métrologie**

Masse (g) : 8120
Longueur (mm) : 354 (+/- 15)
Largeur (mm) : 150 (+/- 2)
Épaisseur (mm) : 47 (+/- 4)

**Macrographie**

Cet échantillon possède une bonne propreté inclusionnaire, aujourd'hui en partie atténuée par la corrosion importante de certaines zones légèrement moins bien compactées essentiellement localisées à une extrémité (fig. 215 et 217). À l'exclusion des zones corrodées, on ne remarque pas de différence flagrante dans la propreté inclusionnaire des deux faces usinées. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 2 % de la face usinée.

L'attaque au nital confirme que cet échantillon est constitué d'une unique loupe plutôt hétérogène principalement ferritique (81 % des 2 faces usinées). Les zones aciérées sont essentiellement situées en périphérie, mais il ne semble pas s'agir d'un cas de cémentation.

**Conclusion**

Cet échantillon est un nouvel exemple du type 6C constitué à partir d'une loupe hétérogène, mais principalement ferritique, plutôt bien compactée.

## *Échantillon SM6.9*

**Métrologie**

Masse (g) : 4890

Longueur (mm) : 280 (+/- 15)
Largeur (mm) : 115 (+/- 3)
Épaisseur (mm) : 40 (+/- 5)

**Particularités morphologiques**

Toutes les surfaces sont largement gagnées par la corrosion (fig. 215 et 217). Par conséquent, les extrémités sont plus profondément corrodées. Leur façonnage est donc souvent invisible. L'état de surface conservé dans l'hydroxyde montre cependant qu'à l'origine les faces étaient correctement martelées de manière à former des surfaces sensiblement planes.

**Macrographie**

Cet échantillon possède une médiocre qualité inclusionnaire, certainement accentuée par la corrosion actuelle importante de certaines zones essentiellement localisées à une extrémité (fig. 215 et 217). Il subsiste en effet de nombreuses porosités et inclusions d'une taille parfois encore importante. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 4 % de la face usinée.

L'attaque au nital montre que cet échantillon est constitué d'une unique loupe plutôt hétérogène principalement ferritique (73 % des 2 faces usinées). Les zones aciérées se trouvent essentiellement en périphérie, mais il ne semble pas s'agir d'un cas de cémentation.

**Conclusion**

Cet échantillon atteste une fois de plus que ce type est constitué à partir d'une loupe hétérogène principalement ferritique. Il se démarque du lot par son taux de compactage nettement moins élevé que dans les autres du type 6C.

---

## *Échantillon SM6.10*

**Métrologie**

Masse (g) : 6790
Longueur (mm) : 295 (+/- 10)
Largeur (mm) : 105 (+/- 3)
Épaisseur (mm) : 52 (+/- 3)

**Macrographie**

Cet échantillon propose une bonne propreté inclusionnaire, aujourd'hui en partie atténuée par la corrosion importante de certaines zones, légèrement moins bien compactées et essentiellement présentes à une extrémité (fig. 215 et 217). À l'exclusion des zones corrodées, on ne note pas de différence flagrante entre la propreté inclusionnaire des deux faces usinées. À cette échelle, l'ensemble des inclusions, des porosités et des zones hydroxydées représente environ 1 % de la face usinée.

L'attaque au nital révèle que cet échantillon est formé d'une unique loupe homogène essentiellement ferritique (93 % des deux faces usinées). Très localement, des zones aciérées apparaissent en périphérie. Il pourrait peut-être s'agir d'un phénomène de cémentation.

**Conclusion**

Cet échantillon apporte un nouvel exemple de ce type qui est souvent constitué à partir d'une loupe principalement ferritique plutôt correctement compactée.

**RÉSUMÉ :**
Cette thèse de doctorat en archéologie propose un panorama sur la métallurgie du fer en France méditerranéenne de l'Antiquité au début du Moyen Âge. Pour se faire, elle se fonde sur une démarche archéologique dans laquelle est assimilée une approche archéométrique spécialement adaptée à l'analyse de la sidérurgie ancienne : la métallographie et la pétrographie.
Des inventaires bibliographiques précis sont dressés pour envisager le problème dans son ensemble et faire état des connaissances acquises par le passé, mais cette thèse s'ancre principalement sur les études inédites et détaillées de douze contextes métallurgiques dits témoins et significatifs de problématiques propres. Ces derniers sont documentés par l'ensemble des données archéologiques et, spécialement, sur la base d'une description rigoureuse des aménagements, du tri de près de vingt-huit mille pièces métallurgiques – objets et scories – et de l'analyse archéométrique de cent soixante-neuf d'entre elles.
Cette thèse est structurée autour des trois grandes activités qui se dégagent de la chaîne opératoire de la métallurgie du fer directe : la production du matériau fer – la réduction directe du minerai –, la fabrication des objets – leur forgeage – et le commerce du matériau fer sous une forme semi-finie – la circulation des demi-produits. Ainsi, à travers l'évolution de ces trois types d'activités économiques, il est possible de mettre en évidence les choix et les comportements qui ont été adoptés pour un même exercice des cadres antiques à l'orée de la réforme carolingienne pour, au final, contribuer à une meilleure connaissance de la société de l'époque romaine au début du Moyen Âge en Gaule du Sud.

**MOTS-CLÉS :**
Métallurgie directe du fer, Gaule du Sud, Antiquité romaine, Antiquité tardive, archéologie, archéométrie, artisanat, économie.

**ABSTRACT:**
*Iron metallurgy in Mediterranean France from Roman Antiquity to the beginning of the Middle Ages: interdisciplinary approach landmarks*
This PhD work in archaeology proposes a panorama on the iron metallurgy in Mediterranean France from Roman Antiquity to the beginning of the Middle Ages. It is based on an archaeological step assimilating an archaeometric approach especially adapted to the analysis of the ancient iron artefacts: metallography and petrography.
Precise bibliographical inventories are drawn up to globally consider the problem and to make a state of the art of knowledge acquired in the past, moreover the present work is mainly anchored on the new and detailed studies of twelve significant metallurgical contexts with specific topics – said, pilot archaeological site. Those are documented by the completeness of archaeological data and, especially, by a rigorous description of installations, sorting of practically 28000 metallurgical materials – objects and slags – and archaeometric analysis of 169 of them.
This thesis is structured around the three great activities which emerge from iron bloomery process: the production of the metal – the direct reduction of the ore –, the manufacture of the objects – their forging – and the trade of ferrous artefacts in a semi-finished form – the circulation of the semi-products. Thus, through the evolution of these three economic types of activity, it is possible to highlight the choices and the behaviors which were adopted for the same exercise to finally contribute to a better knowledge of the society to the Roman Antiquity at the beginning of the Middle Ages in the south of Gaul.

**KEYWORDS:**
Iron bloomery process, south of Gaul, roman Antiquity, late Antiquity, archaeology, archaeometry, craft industry, economy

**DISCIPLINE :**
Section 21 du conseil national des universités : Histoire, civilisation, archéologie et art des mondes anciens et médiévaux.

**ADRESSE DU LABORATOIRE D'ACCUEIL :**
Laboratoire «Archéologie des sociétés méditerranéennes» U.M.R. 5140
Centre de Documentation Archéologique Régional
390, av. de Pérols, 34 970 Lattes
Tel : 04.67.15.61.25 ; Fax : 04.67.22.55.15 ; http://www.archeo-lattes.cnrs.fr/