

200 av. de la République 92001 Nanterre Cedex www.parisnanterre.fr École doctorale 395 : Milieux, cultures et sociétés et passé et du présent ArScAn, UMR7041, Equipe GAMA

Membre de l'université Paris Lumières

Manon GOSSELIN

Qualités des alliages ferreux :

une approche diachronique et statistique

Volume 2 : Annexes

Thèse présentée et soutenue publiquement le 02/12/2021 en vue de l'obtention du doctorat de Histoire et archéologie des mondes médiévaux de l'Université Paris Nanterre sous la direction de M. Philippe Dillmann

	Jury :	
Rapporteuse :	Mme Caroline Robion-Brunner	Chargé de Recherche de Classe Normale, CNRS, Laboratoire TRACES,UMR5608, Toulouse
Rapporteur :	M. Paolo Piccardo	Professeur, Università di Genova, DCCI, Italy
Membre du jury :	Mme Danielle Arribet-Deroin	Maître de conférence, LAMOP, Université Paris Panthéon Sorbonne,CNRS
Membre du jury :	M. Ivan Guillot	Professeur ,UPEC : Université Paris-Est Créteil
Membre du jury :	M. Yohann Tendero	Professeur, IPSA Lyon
Membre du jury :	M. Gaspard Pagès	Chargé de Recherche de Classe Normale, CNRS, UMR7041, ArScAn, Equipe GAMA Université Paris Nanterre
Membre du jury :	M. Florian Téreygeol	Directeur de Recherche, LAPA-IRAMAT, NIMBE, CEA, CNRS,Université Paris- Saclay, CEA Saclay
Membre du jury :	M. Philippe Dillmann	Directeur de Recherche, LAPA-IRAMAT, NIMBE, CEA, CNRS,Université Paris- Saclay, CEA Saclay

Table des matières

Annexe A :	7
Catalogue analytique	7
Artefacts relatifs au corpus antique	9
SM42.18.5(30)	
SM42.18.4(29)	
SM42.18.2(27)	
SM43.18.6(25)	
PRD-1 (Prades)	
PRD-2 (Prades)	
PLM-1 (La Palme)	
PRD-3 (Prades)	
DMG-1 (La Domergue)	
SM31.1	
SM31.2	
SM31.3	49
SM31.4	53
SM31.5	60
SM29A	64
SM29B	67
SM29C	
SM3215B2	
SM3215B4	
SM3215B5	79
SM33.18.C2.3.68	
SG.1.16.2-1 (SG16-1)	86
GRSL-1 (Le Grésil)	
SM-34-18-C3-80	
PLM-2	
GRU-1 (Gruissan)	
PZL (Paziols)	102
BLS-1 (Baillestavy)	105
THR-1 (Thuir)	108
THR-2 (Thuir)	111
Artefacts issus du site de Castel-Minier	115
13284	116
13286	119
13287	

12185	125
12234-3	127
12188	129
12684	131
13376-5	133
11887	136
12292/2	139
12292/5	142
12247-3	145
12472/2-1	148
12678/3-9	151
12678/4-6	153
12678-4-7	156
12678-14-2	159
13380-1	
13380-2	163
13381-6	165
13381-15	167
13383-1	170
13383-2	173
13383-3	176
13383-8	179
13383-9	
13383-10	
13383-15	
13383-20	189
13383-21	192
13383-22	195
13383-24	198
13383-25	200
13509	203
13570/3	206
13625/3	209
13646	212
13382-1	215
13382-2	218
13382-3	221
13382-4	224
13382-5	227

13382-б	230
13382-7	
13382-8	
13382-11	
13382-13	
13382-15	
13382-17	
13625-1	
11085-1	
12485	
12830	
13069	
12468	
12687	
13893	
13894	
13895	
13396-1	
13269-1	
13269-2	
Artefacts issus du site de Glinet	277
GL00-03-2	
Artefacts issus du site de Glinet GL00-03-2 GL04-93	
Artefacts issus du site de Glinet GL00-03-2 GL04-93 GL06-135	
Artefacts issus du site de Glinet GL00-03-2 GL04-93 GL06-135 GL00-39	
Artefacts issus du site de Glinet GL00-03-2 GL04-93 GL06-135 GL00-39 GL00-50	277 278 281 284 286 288
Artefacts issus du site de Glinet GL00-03-2 GL04-93 GL06-135 GL00-39 GL00-50 GL04-42	277 278 281 284 286 286 288 291
Artefacts issus du site de Glinet GL00-03-2 GL04-93 GL06-135 GL00-39 GL00-50 GL04-42 GL05-32	277 278 281 284 286 286 288 291 294
Artefacts issus du site de Glinet GL00-03-2 GL04-93 GL06-135 GL00-39 GL00-50 GL00-50 GL04-42 GL05-32 GL05-37	277 278 281 284 286 288 288 291 294 296
Artefacts issus du site de Glinet GL00-03-2 GL04-93 GL06-135 GL00-39 GL00-50 GL00-50 GL04-42 GL05-32 GL05-37 GL05-38	277 278 281 284 286 288 288 291 291 294 296 298
Artefacts issus du site de Glinet GL00-03-2 GL04-93 GL06-135 GL00-39 GL00-50 GL04-42 GL05-32 GL05-37 GL05-38 GL05-40	277 278 278 281 284 286 288 291 294 294 296 298 301
Artefacts issus du site de Glinet GL00-03-2 GL04-93 GL06-135 GL00-39 GL00-50 GL04-42 GL05-32 GL05-37 GL05-38 GL05-40 GL06-15	277 278 278 281 284 286 288 291 291 294 296 298 301 304
Artefacts issus du site de Glinet GL00-03-2 GL04-93 GL06-135 GL00-39 GL00-50 GL00-50 GL04-42 GL05-32 GL05-37 GL05-38 GL05-38 GL05-40 GL06-15 GL06-37	277 278 278 281 284 286 288 291 294 296 298 301 304 307
Artefacts issus du site de Glinet GL00-03-2 GL04-93 GL06-135 GL00-39 GL00-50 GL00-50 GL04-42 GL05-32 GL05-37 GL05-37 GL05-38 GL05-40 GL06-15 GL06-131	277 278 278 281 284 286 286 288 291 294 296 298 301 304 307 310
Artefacts issus du site de Glinet	277 278 278 281 284 286 288 291 294 296 298 301 304 307 310 313
Artefacts issus du site de Glinet	277 278 278 281 284 284 286 288 291 294 294 296 298 301 304 304 307 310 313
Artefacts issus du site de Glinet GL00-03-2 GL04-93 GL06-135 GL00-39 GL00-50 GL04-42 GL05-32 GL05-37 GL05-38 GL06-15 GL06-131 GL06-37 GL06-131 GL07-89 GL08-30 GL08-112	277 278 278 281 284 284 286 288 291 294 294 296 298 301 304 307 310 313 316 318
Artefacts issus du site de Glinet	277 278 278 281 284 284 286 288 291 291 294 296 298 301 304 307 310 313 316 318 321

GL06-13	
GL08-133-1	
GL04-114	
GL08-43-1	
GL08-77-2	
GL08-80	
GL08-100	
Annexes B :	345
Résultats des essais de traction	
Barre SM2.6	346
Barre SM2.7	349
Barre SM2.8	356
Barre SM6.9	358
Barre SM9.5	360
Barre SM9.7	362
Barre SM24.5	364
Barre SM24.6	365
Barre SM25.3	373
Annexe C :	
Algorithme semi-automatique	
Glossaire : Symboles et annotations	380
Conception de l'algorithme : version détaillée	381
Répétabilité de l'algorithme	390
Comparaison entre les approches manuelle et algorithmique.	395
Annexes D :	
Tableau récapitulatif par ordre chronologique des différents sites issus de considérés dans le chapitre VI	la bibliographie et 403

Annexe A :

Catalogue analytique

Cette première annexe présente l'ensemble des résultats issus des analyses métallographiques obtenus sur les artefacts considérés par cette étude. Elle se divise en trois grandes parties relatives aux trois sous corpus à savoir les artefacts associés à la période antique et issus du pourtour du bassin Méditerranéen, les artefacts issus du site de Castel-Minier entre le XIII^{ème} siècle et le XVI^{ème} siècle et les artefacts issus du site de Glinet entre la fin du XV^{ème} siècle et le milieu du XVI^{ème} siècle. L'ordre de présentation des artefacts correspond à leur ordre d'apparition dans le manuscrit.

Chaque artefact possède une fiche analytique qui lui est propre, dont l'intitulé correspond à la référence de l'artefact (code laboratoire). Cette fiche se divise en plusieurs parties. La première concerne les informations générales relatives à l'artefact. Parmi celles-ci sont indiqués le site d'appartenance, le contexte de la découverte, et les informations métrologiques. Juxtaposée à ces informations, une photographie de l'artefact est présentée, accompagnée d'une description à l'échelle macroscopique. Sur cette dernière, les traits de coupe correspondant aux prélèvements des échantillons sont indiqués par des pointillés et la face observée renseignée par des flèches. Pour la période antique uniquement, et pour des artefacts volumineux, une section longitudinale a été prélevée et analysée à l'échelle macroscopique (*cf.* chapitre IV). Dans ce cas, conjointement à la photographie de l'objet, se trouve l'image de la section après attaque au réactif Nital, l'interprétation métallographique qui en a été faite, et l'indication des zones de prélèvements d'échantillons représentatifs de cette section. Le pourcentage inclusionnaire (% Inc) et le pourcentage surfacique carburé (% C > 0,3) de cette grande section sont précisés dans le tableau de cette même partie.

Viennent ensuite les résultats issus de l'analyse microscopique sur les différents échantillons prélevés sur l'objet. Lorsque plusieurs échantillons ont été analysés pour un même objet, les indications concernent l'ensemble des observations faites sur les échantillons. Les valeurs chiffrées sont la moyenne pondérée par la surface de chacun des échantillons pour le paramètre considéré. % Inc correspond au pourcentage inclusionnaire, %C > 0,3 correspond au pourcentage surfacique carburé (correspond au pourcentage de la surface occupée par un acier à plus de 0,3% de carbone), %C* correspond au taux de carbone moyen; Ecart type indique l'écart type au taux de carbone moyen d'après la définition employée par Leroy *et al.*, 2017. La présence de structures fantômes après attaque au réactif Oberhoffer est également renseignée. La microdureté moyenne, correspondant à la moyenne de l'ensemble des pointés sur la surface entière de l'échantillon (ou de plusieurs échantillons si plusieurs prélèvements ont été réalisés), est ensuite indiquée ainsi que l'écart type à cette moyenne. Enfin, les derniers paramètres évalués concernent ceux inhérents aux conditions thermiques et mécaniques du travail du métal. Sont décrits, la forme de la perlite (lamellaire ou globulaire), la présence de martensite ou de bainite, la présence de structure de Widmanstätten et l'écrouissage des grains.

Chaque échantillon prélevé sur l'artefact est ensuite présenté individuellement. Rappelons que lorsque ce dernier présente des structures de trempe de type martensite, bainite ou perlite nodulaire, une fourchette des taux de carbone moyens (et des écart-types) est indiquée. Elle est calculée en pondérant la surface trempée par 0,3 pour la valeur basse et par 0,8 pour la valeur haute (*cf.* chapitre IV, vol.1) La première illustration correspond à l'échantillon après attaque au réactif Nital. Sur cette dernière, les carrés rouges indiquent la localisation des micrographies présentées à la fin de la fiche analytique. Sauf mention contraire, les micrographies correspondent à des observations réalisées après attaque au réactif Nital (4%). La carte interprétative de la distribution des différentes teneurs en carbone est ensuite présentée, puis vient la cartographie de distribution des valeurs de dureté. La carte interprétative de la distribution des zones carburées correspond à celle issue par la méthode manuelle et non par l'algorithme car ce dernier nécessite quelques ajustements pour pouvoir intégrer l'image correspondant à la partie corrosion.

<u>Artefacts relatifs au corpus</u> <u>antique</u>

SM42.18.5(30)

Informo	tiong	gón	árolog
morma	lions	gen	erales

Site/Lieu-dit	Commune	Contexte	Dat	ation
Epave SM42, Saintes-Maries-de-la- Mer	Saintes-Maries- de-la-Mer	Circulation	I ^{er} siècle -	II ^{ème} siècle
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie
360 mm	220 mm	160 mm	16000 g	/



A)Photographie de l'objet avant découpe B) Observation macroscopique de la section après attaque Nital C) Schéma interprétatif de l'analyse macroscopique et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

Observations macroscopiques :

Cette masse brute se présente sous la forme d'une masse oblongue. Une des faces est plane, elle pourrait avoir été martelée. Le martelage, si existant, reste sommaire car les autres surfaces sont irrégulières. Après découpe et attaque au réactif Nital, la section prélevée se révèle être entièrement aciérée (%C > 0,3). Les porosités sont nombreuses, elles occupent 28% de la section et se distribuent sur l'ensemble de la surface.

Analyses Macro		
%Inc	%C > 0,3	
28	100	

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	47	Caractéristiques résultantes des conditions thermiques et mécaniques de trovoil	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	100		Martensite/Bainite	Non, mais perlite nodulaire
Carburation	%C*	1,4		Structures de Widmanstätten	Non
	Ecart type	0	uavali	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	/	Phosphore	Structures fantômes	/
	Ecart type	/			

L'analyse à l'échelle microscopique d'une partie de la section étudiée à l'échelle macroscopique dévoile un échantillon entièrement aciéré. La teneur en carbone dépasse l'eutectoïde. Elle atteint 1,4% de carbone en moyenne. Les porosités et les inclusions sont présentes sur l'ensemble de la surface à hauteur de 47%. Elles sont peu déformées.





1, 2, 3, 4: Acier hypereutectoïde, aiguilles de cémentite et matrice perlitique.

SM42.18.4(29)

	1			
Site/Lieu-dit	Commune	Contexte	Dat	ation
Epave SM42, Saintes-Maries-de-la- Mer	Saintes-Maries- de-la-Mer	Circulation	I ^{er} siècle -	II ^{ème} siècle
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie
370 mm	300 mm	270 mm	35000 g	/



Photographie de l'objet avant découpe et trait de coupe

Observations macroscopiques :

Cette masse brute est une masse globalement circulaire et informe. Les concrétions marines recouvrant la masse empêchent une lecture correcte de son état de surface. Il n'est pas possible de savoir si cette masse a été martelée ou découpée. Une section entière, prélevée dans la largeur, a été analysée à l'échelle microscopique.

Informations générales :

Observations microscopiques : *Nature et caractéristiques du métal*

Inclusions	%Inc	27		Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	100	caracteristiques résultantes des conditions	Martensite/Bainite	Non, mais perlite nodulaire
Carburation	%C*	0,4-0,84	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Non
	Ecart type	0,2-0,4		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	/	Phosphore	Structures fantômes	/
	Ecart type	/			

La section transversale de la masse brute est entièrement carburée. L'acier se présente sous la forme de perlite nodulaire témoignant d'un refroidissement rapide. On note, autour des porosités, une légère décarburation du métal, qui atteint alors des teneurs en carbone proches de 0,3% de carbone. Par endroit, des structures d'acier hypereutectoïde, sous la forme d'aiguille de cémentite dans une matrice perlitique ont été observées.



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées











2







1 : Porosité ouverte et peu déformée dans la matrice métallique

2: Multiples porosités, certaines sont ouvertes, d'autres sont fermées et des replis du métal sont observés.

3 : Décarburation périphérique de l'acier

4: Acier, perlite nodulaire

5: De l'acier hypereutectoïde à gauche à l'acier eutectoïde

6 : Acier hypereutectoïde, aiguilles de cémentite et matrice perlitique.

SM42.18.2(27)

Informations ge	énérales :
-----------------	------------

Site/Lieu-dit	Commune	Contexte	Datation	
Epave SM42, Saintes-Maries-de-la- Mer	Saintes-Maries- de-la-Mer	Circulation	I ^{er} siècle - II ^{ème} siècle	
Longueur	Largeur	Epaisseur	paisseur Masse T	
410 mm	300 mm	320 mm	54000 g	/



Photographie de l'objet avant découpe et trait de coupe

Observations macroscopiques :

Cette masse brute est une masse oblongue et informe. Les concrétions marines recouvrant la masse empêchent une lecture correcte de son état de surface. Il n'est pas possible de savoir si cette masse a été martelée ou découpée. Une section entière, prélevée dans la largeur, a été analysée à l'échelle microscopique.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal						
Inclusions	%Inc	34	a 4 • 4	Forme de la perlite	Lamellaire	
Carburation	%C > 0,3	99	Caracteristiques résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	résultantes des conditions Martensite/Bainite	Martensite/Bainite	Non, mais perlite nodulaire
	%C*	0,54-0,88		Structures de Widmanstätten	Oui	
	Ecart type	0,2-0,4		Ecrouissage	Non	
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	/	Phosphore	Structures fantômes	:	
	Ecart type	/				

A la découpe, la section transversale de la masse brute s'est brisée en deux parties. Les deux parties sont entièrement aciérées. Une légère décarburation en périphérie des porosités est à noter. La perlite est nodulaire par endroit, ce qui atteste d'un refroidissement rapide. Ailleurs, elle est lamellaire. Les porosités se répartissent sur l'ensemble de la surface de la section. Une grande porosité centrale est observée.



Mosaïque après attaque au réactif Nital



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées

Micrographies









1 :Acierhypereutectoïdeenpériphériedel'échantillon.

2: Acier eutectoïde, perlite nodulaire

3: Acier hypereutectoïde et porosités peu déformées.

4 : Structures de Widmanstätten, acier à 0,3% de carbone environ

5: Perlite nodulaire



SM43.18.6(25)

=	J			
Site/Lieu-dit	Commune	Contexte	Dat	ation
Epave SM43, Saintes-Maries-de-la- Mer	Saintes-Maries- de-la-Mer	Circulation	I ^{er} siècle -	II ^{ème} siècle
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie
210 mm	180 mm	190 mm	11000 g	/



A)Photographie de l'objet avant découpe et traits de coupe B) Observation macroscopique de la section après attaque Nital C) Schéma interprétatif de l'analyse macroscopique et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

Observations macroscopiques :

Cette masse brute se présente sous la forme d'une masse informe et irrégulière de 11 kg. La concrétion accumulée en périphérie empêche une lecture correcte des surfaces. Après découpe, elle présente un cœur métallique, riche en inclusions et en porosités (10% de la surface), entouré de corrosion et de concrétions. L'attaque au réactif Nital montre qu'elle possède 53% de sa surface carburée (%C > 0,3).

Analyses Macro			
%Inc	%C > 0,3		
10	53		

Informations générales :

22 Inclusions %Inc Forme de la perlite Lamellaire Caractéristiques Non, mais résultantes des %C > 0,375 Martensite/Bainite perlite conditions nodulaire thermiques et Carburation Structures de %C* 0,5-0,8 mécaniques de Oui Widmanstätten travail Ecart type 0,36-0,39 Ecrouissage Non

/

/

L'analyse à l'échelle microscopique d'une partie représentative de la section étudiée montre que cette masse brute se compose principalement d'acier. Dans l'échantillon, l'acier est présent à hauteur de 75%. La teneur en carbone augmente en se rapprochant de la périphérie de l'objet. Les teneurs en carbone atteignent celles des aciers eutectoïdes et hypereutectoïdes. Le cœur est moins carburé, autour de 0,3% de carbone. Les porosités sont encore très ouvertes et peu déformées. Elles occupent 22% de la surface.

Phosphore





Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Microdureté

moyenne (HV) Ecart type

Microdureté

:

Structures

fantômes



1:. Acier à 0,2-0,3% de carbone environ, structures de Widmanstätten

2: Acier eutectoïde (haut) et acier à 0,3% de carbone environ (bas)

3: Acier hypereutectoïde

4: Acier à l'eutectoïde, avec porosités déformées et replis de la matière

PRD-1 (Prades) Informations générales : Site/Lieu-dit Commune Contexte Datation Prades (Pyrénées-Fin du Ier siècle – Début du Rue de la Basse Stockage IIème siècle Orientales) Longueur Largeur Epaisseur Masse Typologie 100 mm 80 mm 90 mm 1500 g / 0 5 cm

Photographie de l'objet avant découpe

Observations macroscopiques :

Ce fragment de masse brute est de forme relativement informe. Toutefois, il possède trois faces planes témoignant d'un début de martelage. L'une est particulièrement lisse est plane. Considérant ses surfaces, il semblerait que cette masse ait été repliée sur elle-même puis que cette zone de repli ait été martelée. L'axe de découpe a alors été choisi de telle sorte à observer ce repli.

Observations microscopiques : *Nature et caractéristiques du métal*

Inclusions	%Inc	16	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	21	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,19		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,18		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	/	Phosphore	Structures fantômes	Non
	Ecart type	/			

La section prélevée pour analyse microscopique présente un gradient de la propreté inclusionnaire de la partie gauche (schéma ci-dessous) martelée est propre à la partie droite informe et riche en inclusions, porosités et corrodée. De même, de la partie martelée à la partie informe, un gradient des teneurs en carbone est observé, de la ferrite (80 HV) à l'acier eutectoïde et parfois même hypereutectoïde.



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Analyse de microdureté

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées





Cartographie de dureté

Micrographies















1: Nombreuses porosités au cœur de la matrice métallique

2: Nodules de métal dans matrice scoritique

3 : Aiguille de cémentite (acier hypereutectoïde)

4: Acier à 0,5% de carbone et acier à 0,2% de carbone environ

5: De l'acier à 0,2-0,3% de carbone environ (gauche) à l'acier eutectoïde (droite)

6 : Bande de ferrite entre deux zones d'acier à 0,2% de carbone environ.

7: Acier à 0,1% de carbone environ

8: Grains de ferrite équiaxes

PRD-2 (Prades)						
Informations générales :]					
Site/Lieu-dit	Commune	Contexte	Dat	ation		
Prades, rue de la Basse	Prades	Stockage	Fin du I ^{er} siè II ^{ème}	cle - début du siècle		
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie		
110 mm	80 mm	60 mm	1600 g	/		



Photographie de l'objet avant découpe, analyse à l'échelle macroscopique et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique

Observations macroscopiques :

Ce fragment de masse brute est relativement informe. Cette masse, de même dimensions que la masse PRD-1, semble avoir été moins martelée que son homologue. Elle possède seulement deux faces planes, les autres sont irrégulières.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal							
Inclusions	%Inc	13	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire		
Carburation %C > 0,3 Carburation %C* Ecart type	74	résultantes des	Martensite/Bainite	Non			
	%C*	>0,75	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui		
	Ecart type	>0,56		Ecrouissage	Non		
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	/	Phosphore	Structures fantômes	Non		
	Ecart type	/					

La section étudiée pour la masse PRD-2 peut être divisée en deux parties tenant compte de la nature du métal qui la compose. La partie inférieure (schéma ci-après), dont la surface est plane, est composée de ferrite ou d'acier peu carburé (% C < 0,3). En progressant vers la partie supérieure, informe, les teneurs en carbone augmentent pour atteindre celles des aciers hypereutectoïdes et de la fonte. Les porosités et inclusions deviennent par ailleurs plus nombreuses. A noter, une grande porosité se trouve au cœur de cette masse.



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées





1 :. Repli de la matière au sein d'une porosité

2: Acier hypereutectoïde (gauche) et fonte (droite)

3 : De gauche à droite, acier à 0,2% de carbone, acier eutectoïde, et acier hypereutectoïde.

4: De gauche à droite, acier à 0,4-0,5% de carbone et acier à 0,2-0,3% de carbone.

5 : Fonte blanche

6: Acier hypereutectoïde proche de la limite avec la fonte, plaquette de cémentite

7: Acier à 0,1% de carbone environ

8 : Acier à 0,1-0,2% de carbone, structures de Widmanstätten

PLM-1 (La Palme)

Informations générales :

Site/Lieu-dit	Commune	Contexte Datation		atation
La Palme	La Palme, Aude	Circulation/Stockage Haut-Empir		ıt-Empire
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie
205 mm	80 mm	40 mm	2500 g	/



Orthophotographies et section d'après photomodèle Minutes et infographie : J.-Ch. Méaudre

0

5 cm

A)Photographie de l'objet avant découpe B) Observation macroscopique de la section après attaque Nital C) Schéma interprétatif de l'analyse macroscopique et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

Observations macroscopiques :

Le produit de la Palme se présente sous la forme d'une galette dont les deux faces les plus larges sont martelées et convexes. Une des extrémités est aussi martelée tandis que les autres sont irrégulières. Il se place donc à un stade intermédiaire entre la masse en cours de compactage et la barre mise en forme. L'étude d'une section longitudinale montre que ce produit est majoritairement ferritique. Seul 20 % de la surface est carburé.

Analyses Macro				
%Inc	%C > 0,3			
7	20			

Observations incroscopiques : ivalure et caracteristiques du metal							
Inclusions	%Inc	11	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire		
Carburation%C > 0,3%C*Ecart type	%C > 0,3	14	résultantes des	Martensite/Bainite	Non		
	%C*	0,16	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui		
	Ecart type	0,22		Ecrouissage	Non		
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	/	Phosphore	Structures fantômes	Non		
	Ecart type	/					

Les sections 1 et 2 présentent des différences en termes de nature de métal. La section 1 prélevée à une extrémité est aciérée en périphérie et ferritique dès lors que l'on se rapproche du centre de la barre. En périphérie, les zones carburées se concentrent autour des porosités, qui sont encore largement ouvertes. De l'acier hypereutectoïde a été observé. La section 2 est quant à elle est majoritairement ferritique et les grains de ferrite sont équiaxes.



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées





1: Ferrite

2 : Acier à 0,2% de carbone environ et porosités

3 : Gradation des teneurs en carbone d'un acier à 0,2% de carbone à un acier eutectoïde

4: Acier à 0,7% de carbone environ

5 : Acier hypereutectoïde et porosités



PRD-3 (Prades)

Site/Lieu-dit	Commune	Contexte	Dat	ation
Rue de la Basse	Prades (Pyrénées- Orientales)	Stockage	Fin du I ^{er} siè II ^{ème}	cle – Début du siècle
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie
140 mm	40 mm	35 mm	1400 g	/



Photographie de l'objet avant découpe

Observations macroscopiques :

La barre de Prades, de section rectangulaire, possède toutes ses faces martelées. Une des extrémités paraît avoir été tranchée à chaud. Contrairement aux autres barres étudiées, elle ne présente pas de surfaces aussi lisses et des arrêtes aussi franches. Elle est un produit intermédiaire entre la masse brute en cours de compactage et la barre mise en forme.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	13		Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	39	Caractéristiques résultantes des conditions	Martensite/Bainite	Non, mais perlite nodulaire
	%C*	0,21-0,34	mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,2-0,3		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	/	Phosphore	Structures fantômes	?
	Ecart type	/			

La section longitudinale de la barre en compactage de Prades présente de grandes porosités très peu déformées associées à des porosités plus fines et refermées. La section est majoritairement ferritique. 40% de la surface est occupée par un acier dont la teneur en carbone dépasse 0,3%. Les zones aciérées se localisent autour des porosités qui peuvent avoir facilité la diffusion du carbone. Autour de ces porosités, la perlite est par ailleurs nodulaire, témoignant d'un refroidissement rapide. L'attaque au réactif Oberhoffer n'a pas mis en évidence la présence de structures fantômes. Néanmoins des variations mésoscopiques ont été observées.



Mosaïque après attaque au réactif Nital



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées

Analyse de microdureté	80-: HV 80-: <80	102 124-146 102-124 14	168-190 6-168 190	212-234 -212 234	256-278 -256 278-:	>300
		EDer.		The		1 cm
	.				A A	
			e a la construcción de la constr			

Cartographie de dureté



1: Porosité déformée qui se referme et inclusions

2: Chapelets d'inclusions plus ou moins déformée

3 : Repli de la matière au cœur d'une porosité

4: Inclusions de scories dans une matrice ferritique

5 : Acier à 0,1-0,2% de carbone

6 : Gradation des teneurs en carbone de l'acier à 0,2-0,3% de carbone vers l'acier eutectoïde

100 µm

200 µm

50 µm

7: Acier eutectoïde avec perlite nodulaire autour d'une soudure de repli, puis en s'éloignant de la soudure, acier à 0,2% de carbone environ

8: Acier hypereutectoïde, aiguilles de cémentite.

SM41-1

Informations générales :

Site/Lieu-dit	Commune	Contexte	Da	tation
Saintes-Maries-de-la-Mer, épave 41	Saintes-Maries- de-la-Mer	Circulation	I ^{er} siècle	
Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Masse (g)	Typologie
105	85	40	1600	8



Photographie de l'objet avant découpe, analyse à l'échelle macroscopique et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique

Observations macroscopiques :

Ce lopin se présente sous la forme d'un bloc relativement circulaire. Ses deux faces parallèles sont planes. Deux dépressions sont visibles sur sa tranche gauche. Le lopin n'est pas estampillé. Il représente le type 8 de la classification établie par Luc Long à partir des barres des Saintes-Maries-de-la-Mer.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	15	Caractéristiques résultantes des conditions	Forme de la perlite	/
Carburation	%C > 0,3	99		Martensite/Bainite	Oui
	%C*	0,32-0,77	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,1	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	455	Phosphore	Structures fantômes	/
	Ecart type	257			

La section longitudinale de ce lopin montre une bande d'inclusions localisée au cœur de la matière. Elle s'organise autour d'une porosité centrale, d'environ 1 cm. Les bords et les extrémités sont plus propres. La surface est carburée ((C > 0,3) à plus de 80%. Elle présente des structures de martensite et de bainite mélangées à quelques îlots de perlite nodulaire. C'est pourquoi la dureté de ce lopin est élevée (455 HV). Vers la partie supérieure du lopin, seule la perlite nodulaire est présente. Une phase de transition vers un acier à 0,7% de carbone est visible. Quelques rares zones d'acier à 0,2% sont présentes. Elles représentent moins de 2% de la surface.


Micrographies









1 : Porosité déformée qui se referme

2 : Acier à 0,5% de carbone environ vers un acier à 0,1% de carbone.

3 : Structures hors équilibre de type martensite, bainite et perlite nodulaire

4: Structures hors équilibre de type martensite, bainite et perlite nodulaire, vers acier hypereutectoïde

5 : Structures hors équilibre de type martensite, bainite et perlite nodulaire



DMG-1 (La Domergue)					
Informations générales :]				
Site/Lieu-dit	Commune	Contexte	Dat	ation	
Villa de La Domergue	Sauvian, Hérault	Villa, forge	V ^{ème}	siècle	
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie	
113 mm	84 mm	38 mm	1896 g	/	



A)Photographie de l'objet avant découpe B) Observation macroscopique de la section après attaque Nital C) Schéma interprétatif de l'analyse macroscopique et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit se présente sous la forme d'une masse métallique parallélépipédique. Les faces ne sont pas toutes parfaitement planes mais semblent avoir été toutes martelées. L'une des faces les plus larges est convexe, l'autre concave. Les faces ne sont pas perpendiculaires deux à deux, les angles ne sont pas droits mais sont émoussés. De ce fait, elle possède un aspect circulaire qui nous amène à la classer parmi les lopins. A la surface, des traces de martelage sont observées. A la découpe de grandes porosités se révèlent ainsi que des traces de charbon de bois. L'attaque Nital montre que ce lopin est majoritairement ferritique.

Observation	s microscopiques :	Nature et cai	ractéristiques du m	vétal	
Inclusions	%Inc	20	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	20	résultantes des conditions	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,25	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,3	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	127	Phosphore	Structures fantômes	Non
	Ecart type	61			

Le lopin de la Domergue présente de nombreuses inclusions, porosités et charbons de bois emprisonnés dans la matrice métallique. Il est majoritairement ferritique. Seules les zones métalliques situées autour des charbons de bois et des porosités sont carburées, ces dernières pouvant avoir facilité l'accès du monoxyde de carbone gazeux et la diffusion du carbone au sein de la réduction. Elles se composent d'acier hypereutectoïde ou eutectoïde.

Section 1 :

Analyse métallographique

% C 0,9-2,1 0,7-0,9 0,5-0,7 0,3-0,5 0,1-0,3 < 0,1 Inclusions, Martensite > 2.1 porosités, Bainite. corrosion perlite

Perlite nodulaire seule nodulaire



Mosaïque après attaque au réactif Nital



1 cm

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées





1 : Porosité et inclusion au sein de la matrice métallique



3: Acier hypereutectoïde et eutectoïde en périphérie d'une porosité.



2 : Chapelet de scorie dans matrice métallique



4 : Ferrite équiaxe

SM31.1				
Informations générales :				
Site/Lieu-dit	Commu	Commune		Datation
Epave SM31, Saintes-Maries-de- la-Mer	Saintes-Maries- Bouches-du	Saintes-Maries-de-la-Mer, Bouches-du-Rhône		I ^{er} siècle de notre ère
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie
930 mm	23 mm	20 mm	610 g	7L



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

Observations macroscopiques :

La barre SM31.1 est une barre de type 7L de section très fine et proche du carré. Sa surface est très corrodée.

Observations microscopiques : *Nature et caractéristiques du métal*

Inclusions	%Inc	1,3	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	0,2	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,07	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Non
	Ecart type	0,03	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	/	Phosphore	Structures fantômes	Non
	Ecart type	/			

Les différentes sections prélevées sur cette barre 7L sont toutes majoritairement ferritiques et présentent peu d'inclusions.



% C Section 2 : > 2,1 0,9 - 2,1 0,7 - 0,9 0,5 - 0,7 0,3 - 0,5 0,1 - 0,3 < 0,1 Inclusions, Martensite Perlite Bainite, nodulaire porosités, seule corrosion perlite Analyse métallographique nodulaire 2 mm 2 mm Cartographie correspondante indiquant la Mosaïque après attaque au réactif Nital

répartition des différentes zones carburées

Inclusions. Martensite porosités,

. corrosion

Bainite, nodulaire

seule

perlite

nodulaire

 $2 \mathrm{mm}$



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



1 : Grains de ferrite

2: Grains de ferrite et zone plus aciérée en périphérie à 0,7% de carbone environ.

- 3 : Grains de ferrite
- 4 : Grains de ferrite

SM31.2					
Informations générales :					
Site/Lieu-dit	Commu	Commune		Datation	
Epave SM31, Saintes-Maries-de- la-Mer	Saintes-Maries- Bouches-du-	Saintes-Maries-de-la-Mer, Bouches-du-Rhône		I ^{er} siècle de notre ère	
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie	
820 mm	14 mm	12 mm	415 g	7L	



Photographie de l'objet avant découpe indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

Observations macroscopiques :

La barre SM31.2 est une barre de type 7L plus courte et de section plus fine que la barre SM31.1. Sa surface présente un état de corrosion avancé.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	2	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	14	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,14	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Non
	Ecart type	0,2	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	109	Phosphore	Structures fantômes	Non
	Ecart type	19			

Les sections étudiées pour la barre SM31.2 sont majoritairement ferritiques. Les grains sont équiaxes, aucune trace d'écrouissage n'est visible. Certaines zones sont plus carburées. Les teneurs en carbone peuvent atteindre l'eutectoïde.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones



Cartographie de dureté



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones



Cartographie de dureté



répartition des différentes zones carburées



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



1: Grains de ferrite équiaxes

2: Bande d'acier à 0,7% de carbone environ vers un acier à 0,1% de carbone.

3 : Grains de ferrite équiaxes

4 : Bande d'aciers à 0,7% de carbone environ vers un acier à 0,1%-0,3% de carbone.

5 : Acier à 0,7% de carbone environ

6: Grains de ferrite équiaxes

SM31.3					
Informations générales :					
Site/Lieu-dit	Commu	Commune		Datation	
Epave SM31, Saintes-Maries-de- la-Mer	Saintes-Maries- Bouches-du-	Saintes-Maries-de-la-Mer, Bouches-du-Rhône		I ^{er} siècle de notre ère	
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie	
713 mm	15 mm	12 mm	220 g	7L	



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

Observations macroscopiques :

La barre SM31.3 est similaire aux autres barres de type 7L précédemment décrite. Elle présente un état de corrosion très avancé qui empêche une bonne lecture de ses surfaces.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	1	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	1,6	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,07	thermiques et	Structures de Widmanstätten	Non
	Ecart type	0,08	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	/	Phosphore	Structures fantômes	Non
	Ecart type	/			

Les sections étudiées sont majoritairement ferritiques. Quelques zones d'acier sont présentes, et s'organisent sous forme de lignes pouvant laisser penser à une carburation consécutive à une soudure.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones





Mosaïque après attaque au réactif Nital

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



1: Deux bandes d'acier à l'eutectoïde dans une matrice principalement ferritique

2 : Détail du 1

3 : Zone aciérée autour d'une ligne de soudure dans une matrice ferritique

4: Zone aciérée autour d'une ligne de soudure, dans une matrice ferritique

5, 6, 7, 8 : Grains de ferrite

SM31.4					
Informations générales :					
Site/Lieu-dit	Commu	ine	Contexte	Datation	
Epave SM31, Saintes-Maries-de- la-Mer	Saintes-Maries- Bouches-du-	Saintes-Maries-de-la-Mer, Bouches-du-Rhône		I ^{er} siècle de notre ère	
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie	
800 mm	18 mm	12 mm	385 g	7L	



A)Photographie de l'objet avant découpe B) Observation macroscopique de la section après attaque Nital et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

Cette barre s'est brisée en deux parties du fait de son fort état de corrosion. Elle se présente sous la forme d'une fine barre de section proche du carrée. Elle est la seule barre de type 7L pour laquelle un fraisage sur la surface a été réalisée afin d'observer en amont, sur l'ensemble de la barre, la distribution des inclusions et des zones carburées.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	1,6	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	0,8	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,07	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Non
	Ecart type	0,04	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	105	Phosphore	Structures fantômes	Non
	Ecart type	10			

Observations macroscopiques :

Cette barre est ferritique dans l'ensemble. Quelques zones plus carburées ont été observées mais elles sont anecdotiques.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Microdureté		
Moyenne	109	
Ecart type	11	

Cartographie de dureté



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones





Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones



Cartographie de dureté

Microdureté			
Moyenne	102		
Ecart type	9		



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones

56



Cartographie de dureté



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté

% Inc	0,5
Carbura	tion
%C*	0,08
%C > 0,3	3,7
Ecart type	0,09
Microdu	reté
Moyenne	105
Ecart type	18



Micrographies



1: .Inclusions de scories dans matrice métallique



3 : .Acier à 0,3% de carbone environ et structures de Widmanstätten, ferrite en partie basse de l'image



5 : Légère carburation périphérique



7 : Zone d'acier à 0,5% de carbone environ encerclée par une matrice ferritique



2 :. Grains de ferrite équiaxes



4 : .Zone plus carburée au cœur d'une zone ferritique



6 : Grains de ferrite équiaxes



8: Corrosion au cœur de la matrice ferritique principalement

SM31.5						
Informations générales :						
Commu	Commune		Datation			
Saintes-Maries- Bouches-du	Saintes-Maries-de-la-Mer, Bouches-du-Rhône		I ^{er} siècle de notre ère			
Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie			
23 mm	17 mm	705 g	7L			
	SM3 Commu Saintes-Maries- Bouches-du Largeur 23 mm	SM31.5 Commune Saintes-Maries-Ja-Mer, Bouches-du-Rhône Largeur Epaisseur 23 mm 17 mm	SM31.5CommuteContexteSaintes-Maries-de-la-Mer, Bouches-du-RhôneCirculationLargeurEpaisseurMasse23 mm17 mm705 g			



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

Observations macroscopiques :

Cette barre de section très fine et de grande longueur est caractéristique du type 7L. Elle possède, comme les autres barres de ce type étudiées, un état de corrosion avancé.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	0,9	Caractéristiques	Forme de la perlite	Absente
	%C > 0,3	1,2	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,06	thermiques et	Structures de Widmanstätten	Non
	Ecart type	0,05	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	/	Phosphore	Structures fantômes	Non
	Ecart type	/			

Cette barre est majoritairement ferritique, tout comme les autres barres de type 7L.



Mosaïque après attaque au réactif Nital



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



Mosaïque après attaque au réactif Nital

2 mm

répartition des différentes zones carburées



 $2 \mathrm{mm}$ Cartographie correspondante indiquant la Mosaïque après attaque au réactif Nital répartition des différentes zones carburées

Micrographies











- 1 : Grains de ferrite et zone plus aciérée en périphérie à 0,7% de carbone environ.
- 2 : Grains de ferrite.
- 3 : Grains de ferrite.
- 4 : Zone plus aciérée en périphérie à 0,3% de carbone environ.
- 5 : Grains de ferrite.

SM29A						
Informations générales :						
Site/Lieu-dit	Comr	nune	Contexte	Datation		
Epave SM29, Saintes-Maries-de-la- Mer	Saintes-Maries-de-la-Mer, Bouches-du-Rhône		Circulation	I ^{er} siècle de notre ère		
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie		
515 mm	40 mm	40 mm	2600 g	2M		



A)Photographie de l'objet avant découpe B) Observation macroscopique de la section après attaque Nital C) Schéma interprétatif de l'analyse macroscopique et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

Observations macroscopiques :

La barre SM29A est une barre de type 2M, de section carrée. Les grandes faces sont martelées mais les extrémités ne sont pas mises en forme. La barre a été découpée en plusieurs tronçons puis un tronçon représentatif a été retenu pour analyse microscopique.

Analyses Macro			
%Inc	%C > 0,3		
0,4	1,3		

Observations microscopiques : Nature et caracteristiques au metal							
Inclusions	%Inc	0,3	Caractéristiques	Forme de la perlite	Absente		
%C > 0,3 Carburation %C* Ecart type	0	résultantes des	Martensite/Bainite	Non			
	%C*	0,06	thermiques et	Structures de Widmanstätten	Non		
	Ecart type	0	travail	Ecrouissage	Non		
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	/	Phosphore	Structures fantômes	Non		
	Ecart type	/					

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

L'ensemble de l'échantillon issu de la section prélevée est entièrement ferritique. Les grains sont équiaxes. Les porosités sont peu nombreuses (0,3%). L'attaque au réactif Oberhoffer n'a pas mis en évidence la présence de phosphore.





Cartographie de dureté



1: Grains de ferrite équiaxes



3: Grains de ferrite équiaxes



2 : Grains de ferrite équiaxes



4 : Grains de ferrite équiaxes

SM29B

Informations générales :

Site/Lieu-dit	Commune		Contexte	Datation
Epave SM29, Saintes-Maries-de-la-	Saintes-Maries-de-la-Mer,		Circulation	I ^{er} siècle de
Mer	Bouches-du-Rhône		Circulation	notre ère
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie
510 mm	40 mm	35 mm	2000 g	2M



A)Photographie de l'objet avant découpe B) Observation macroscopique de la section après attaque Nital C) Schéma interprétatif de l'analyse macroscopique et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

Observations macroscopiques :

La barre SM29B est une barre de type 2M de section proche du carré. Les quatre faces sont martelées et les extrémités sont encore brutes. La barre a été découpé en quatre tronçons et un tronçon représentatif a été retenu pour analyse à l'échelle microscopique.

Analyses Macro				
%Inc	%C > 0,3			
0,3	3,3			

Obset vations inicioscopiques. Ivalure et caracteristiques au metal								
Inclusions	%Inc	2	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire			
%C > 0,3Carburation%C*Ecart type	10	résultantes des	Martensite/Bainite	Non				
	0,11	thermiques et	Structures de Widmanstätten	Oui				
	Ecart type	0,12	travail	Ecrouissage	Non			
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	108	Phosphore	Structures fantômes	Non			
	Ecart type	18						

La section prélevée pour analyse microscopique se compose principalement de ferrite, ce qui explique la dureté moyenne de 108 HV. Les grains de ferrite sont équiaxes. 10% de la surface possède une teneur en carbone supérieure à 0,3%. La perlite est lamellaire. Les inclusions sont peu présentes, et s'organisent sous forme de bande orientée dans le sens du martelage.



Mosaïque après attaque au réactif Nital



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté

Micrographies



1: Ferrite équiaxe



3: De l'acier eutectoïde (bas) vers l'acier à 0,2% de carbone, fissure dans le métal



2 : Bande d'acier à 0,1% environ.



4: Acier à 0,3-0,4% de carbone.

SM29C						
Informations générales :						
Site/Lieu-dit	Commu	ne	Contexte	Datation		
Epave SM29, Saintes-Maries-de- la-Mer	Saintes-Maries-de-la-Mer, Bouches-du-Rhône		Circulation	I ^{er} siècle de notre ère		
Longueur	Largeur	Largeur Epaisseur		Typologie		
472 mm	40 mm	40 mm	2400 g	2M		
Α		<i>N</i>	lacro	1		



A)Photographie de l'objet avant découpe B) Observation macroscopique de la section après attaque Nital C) Schéma interprétatif de l'analyse macroscopique et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

Observations macroscopiques :

La barre SM29C est une barre de type 2M, de section proche du carré. Les quatre faces sont martelées mais les extrémités sont informes. La découpe d'une section longitudinale montre que la barre se compose majoritairement de ferrite. Seul 4% est occupé par un acier dont la teneur est supérieure à 0,3%. Les inclusions sont peu présentes.

Analyses Macro				
%Inc	%C > 0,3			
0,9	4			

Observations microscopiques : *Nature et caractéristiques du métal*

Inclusions	%Inc	2	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	2,8	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	C* 0,07 thermic mécanic	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Non
	Ecart type	0,06	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	116	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	14			

L'échantillon prélevé pour analyse à l'échelle microscopique est composé de ferrite dont les grains sont équiaxes. 3% de la section se compose d'acier dont la teneur est proche de 0,3-0,4% de carbone. La zone aciérée se situe au centre de l'échantillon autour d'une ligne de porosité et d'inclusions. Dans cette zone la dureté est légèrement plus élevée que dans la ferrite. Elle se situe aux alentours de 180 HV, tandis que pour la ferrite, elle est de 100 HV.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté

Micrographies



1: Grains de ferrite équiaxes.



3: Acier à 0,4-0,5% de carbone environ.



2 : Grains de ferrite équiaxes.



4: Acier à 0,3% de carbone environ.
SM3215B2

Informations générales :

Site/Lieu-dit	Comr	nune	Contexte	Datation
Epave SM32, Saintes-Maries-de-la- Mer	Saintes-Maries-de-la-Mer, Bouches-du-Rhône		Circulation	I ^{er} siècle avant notre ère - I ^{er} siècle de notre ère
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie
512 mm	40 mm	35 mm	2600 g	2M
		Macro	<0,3%C >0,3%C Inclusions Porosités Corrosion	

1 10 cm

A)Photographie de l'objet avant découpe B) Observation macroscopique de la section après attaque Nital C) Schéma interprétatif de l'analyse macroscopique et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

Observations macroscopiques :

La barre SM3215B2 est une barre de type 2M, de section proche du carré. Les quatre faces sont martelées mais les extrémités sont informes. La découpe d'une section longitudinale montre que la barre se compose uniquement de ferrite. Les inclusions sont peu présentes.

Analyses Macro			
%Inc	%C > 0,3		
1	0		

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal						
Inclusions	%Inc	1	Caractéristiques	Forme de la perlite	Absente	
	%C > 0,3	0	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non	
Carburation	%C*	0,06		Structures de Widmanstätten	Non	
	Ecart type	0,01		Ecrouissage	Non	
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	114	Phosphore	Structures fantômes	Non	
	Ecart type	8				
L'échantillon prélevé se compose uniquement de ferrite, dont les grains sont équiaxes. Les inclusions sont peu présentes, et très fines. L'attaque au réactif Oberhoffer n'a pas permis de mettre en évidence la présence de phosphore.						



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



1 : Micro-inclusions de scories



3 : Grains de ferrite équiaxe



2 : Inclusion de scorie dans la matrice métallique



4 : Acier à 0,1% de carbone environ

	SM321	5B4		
Informations générales :]			
Site/Lieu-dit	Com	mune	Contexte	Datation
Epave SM32, Saintes-Maries-de-la- Mer	Saintes-Marie Bouches-e	es-de-la-Mer, du-Rhône	Circulation	I ^{er} siècle avant notre ère - I ^{er} siècle de notre ère
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie
495 mm	35 mm	30 mm	1800 g	2M
	10 cm		<0,3%C >0,3%C >0,3%C Inclusions Porosités Corrosion	

A)Photographie de l'objet avant découpe B) Observation macroscopique de la section après attaque Nital C) Schéma interprétatif de l'analyse macroscopique et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

Observations macroscopiques :

La barre SM3215B4 est une barre de type 2M, de section proche du carré. Les quatre faces sont martelées mais les extrémités sont informes. La découpe d'une section longitudinale montre que la barre se compose majoritairement de ferrite. Seul 6% est occupé par un acier dont la teneur en carbone est supérieure à 0,3%. Les inclusions sont peu présentes. On note la présence d'une grande inclusion au centre de la barre.

Analyses Macro			
%Inc	%C > 0,3		
0,7	6		

observations meroscopiques : ivalure el caracteristiques au metal							
Inclusions	%Inc	1	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire		
Carburation %	%C > 0,3	0	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non		
	%C*	0,07		Structures de Widmanstätten	Non		
	Ecart type	0,03		Ecrouissage	Non		
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	103	Phosphore	Structures fantômes	Non		
	Ecart type	8					

L'échantillon sélectionné pour analyse microscopique se compose de ferrite aux grains équiaxes, dont la dureté est comprise entre 80 HV et 120 HV. Une zone aciérée est présente au cœur de l'échantillon. Dans cette zone, la teneur en carbone est de 0,2% environ. Les inclusions se concentrent principalement dans la partie inférieure de l'échantillons sous forme d'une bande orientée dans le sens du martelage.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Micrographies



1 : Inclusions de scories peu déformées



3 : Acier à 0,1% de carbone environ



2 : Grains de ferrite



4 : Grains de ferrite et cémentite aux joints de grains

Site/Lieu-dit	Com	nune	Contexte	Datation
Epave SM32, Saintes-Maries-de-la- Mer	Saintes-Maries-de-la-Mer, Bouches-du-Rhône		Circulation	I ^{er} siècle avant notre ère – I ^{er} siècle de notre ère
Longueur	Largeur Epaisseur		Masse	Typologie
500 mm	45 mm	40 mm	3000 g	2M



A)Photographie de l'objet avant découpe B) Observation macroscopique de la section après attaque Nital C) Schéma interprétatif de l'analyse macroscopique et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

Observations macroscopiques :

La barre SM3215B5 est une barre de type 2M, de section proche du carré. Les quatre faces sont martelées mais les extrémités sont informes. La découpe d'une section longitudinale montre que la barre se compose majoritairement de ferrite. Seul 2% est occupé par un acier dont la teneur est supérieure à 0,3%. Les inclusions sont peu présentes.

Analyses Macro			
%Inc	%C > 0,3		
0,5	2		

Observations	microscopiques :	Nature et car	ractéristiques du m	tal			
Inclusions	%Inc	1	Caractéristiques	Forme	de la perlite	Absente	
	%C > 0,3	0	résultantes des conditions	Marten	site/Bainite	Non	
Carburation	%C*	0,06	thermiques et mécaniques de	Strue Widn	ctures de nanstätten	Non	
	Ecart type	0	travail	Ecro	ouissage	Non	
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	113	Phosphore	Str far	uctures ntômes	Non	
	Ecart type	9					
<u>Se</u> Analyse n	Section 1 : % C > 2,1 0,9 - 2,1 0,7 - 0,9 0,5 - 0,7 0,3 - 0,5 0,1 - 0,3 <0,1 Inclusions, Martensite Peritie Analyse métallographique seule peritie seule peritie seule						
3 2 4 Mosaïaue après attaque au réactif Nital							
Smm							
Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées							



Cartographie de dureté

Micrographies



1 : Inclusions de scories dans la matrice métallique



3 : Grains de ferrite équiaxes



2 : Inclusions de scories dans la matrice métallique



4 : Grains de ferrite équiaxes

SM33.18.C2.3.68							
Informations générales :							
Site/Lieu-dit	Commune	Contexte	Da	atation			
Epave SM33, Saintes-Maries- de-la-Mer	Saintes-Maries-de- la-Mer, Bouches- du-Rhône	Circulation	I ^{er} siècle av I ^{er} siècle	cele avant notre ère – siècle de notre ère			
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie			
680 mm	25 mm	25 mm	1700 g	2M			
		Macri Section 3 Section 3 Section 3 Section 3 Section 4 Section 3 Section 4 Section 3 Section 4 Section 4 Section 3 Section 4 Section 4	20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 2				

A)Photographie de l'objet avant découpe B) Observation macroscopique de la section après attaque Nital C) Schéma interprétatif de l'analyse macroscopique et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

Observations macroscopiques :

La barre SM33.18.C2.3.68 est une barre de type 2M. Elle possède une section proche du carrée. Ses quatre faces sont martelées mais ses extrémités ne sont pas mises en forme. Elle présente un état de corrosion avancé. Après découpe et attaque au réactif Nital, la barre se révèle être composée majoritairement de ferrite ou d'aciers peu carburés (%C < 0,3).

Analyses Macro			
%Inc	%C > 0,3		
0,8	5,0		





Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



 $5 \mathrm{mm}$

Cartographie de dureté



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté

Micrographies



- 1: Ferrite
- 2: Ferrite

3 : Bande d'acier eutectoïde au cœur d'une zone moins carburée

4: Bande d'acier eutectoïde au cœur d'une zone moins carburée



SG.1.16.2-1 (SG16-1)						
Informations générales :						
Site/Lieu-dit	Commune	Contexte	Da	tation		
Epave Saint-Gervais I	Fos-sur-Mer, Bouches-du-Rhône	Circulation	Ier	siècle		
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie		
540 mm	40 mm	> 25 mm	/	2M		
			Macro			

A)Photographie de l'objet avant découpe B) Observation macroscopique de la section après attaque Nital C) Schéma interprétatif de l'analyse macroscopique et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

10 cm

Observations macroscopiques :

La barre de Saint-Gervais est une barre de type 2M. Elle était englobée dans une masse de concrétions marines à l'une de ses extrémités. La barre avait déjà été usinée sur toute sa longueur avant que nous la recevions pour analyse. Les traces noires observées sur la photographie B correspondent à une surchauffe du métal lors de cette première découpe. L'analyse macroscopique de sa section longitudinale montre, comme attendu pour le type 2M, qu'elle se compose majoritairement de ferrite et comporte peu d'inclusions.

0

Analyses Macro			
%Inc	%C > 0,3		
3	6		

Observations microscopiques : Nature et caracteristiques au metat							
Inclusions	%Inc	2	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire		
Carburation Microdureté	%C > 0,3	8	résultantes des	Martensite/Bainite	Non		
	%C*	0,13	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui		
	Ecart type	0,11		Ecrouissage	Non		
	Microdureté moyenne (HV)	115	Phosphore	Structures fantômes	Non		
	Ecart type	14					

Observations microscopiques : *Nature et caractéristiques du métal*

Les sections 1 et 2 se composent principalement de ferrite ou d'acier peu carburés (%C<0,3). Quelques zones d'acier plus carburés (autour de 0,5% de carbone) peuvent aussi être observées mais de façon minoritaires. Les inclusions sont présentes au cœur de la barre, et s'organisent sous forme d'une bande longitudinale traversant les échantillons.



Cartographie de dureté



Widmanstätten, ferrite aciculaire

3 : Acier à 0,2-0,3% de carbone environ, de

4: Acier à 0,2-0,3% de carbone environ, de Widmanstätten

1 cm Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées

L cm

80-102

нv

124-146

168-190

146-168

190-212

212-234 256-278

234-256

>300

278-300

Cartographie de dureté



1: Grains de ferrite équiaxe.

2 : Acier à 0,2-0,3% de carbone, structures de Widmanstätten, ferrite aciculaire

3 : Acier à 0,4-0,5% de carbone environ, structure de Widmanstätten

4 : Acier à 0,4-0,5% de carbone environ, structure de Widmanstätten

GRSL-1 (Le Grésil)						
Informations générales :]					
Site/Lieu-dit	Commune	Contexte	Dat	ation		
La villa du Grésil	Orival, Seine- Maritime		Seconde moiti de no	ié du II ^{ème} siècle otre ère		
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie		
101 mm	33 mm	21 mm	374 g	Apparenté 2M		





Observations macroscopiques :

Cette barre se présente sous la forme d'une barre courte de 10 cm de long et de section quadrangulaire. Les quatre faces les plus larges sont planes suite à une phase de martelage. La barre est légèrement recourbée dans sa longueur. Une extrémité est droite, perpendiculaire à la section. Elle pourrait avoir été tranchée. L'autre extrémité présente un surplus de matière formant une petite pointe arrondie. La barre est correctement conservée. Ses dimensions et sa forme pourrait laisser penser qu'il s'agit d'un fragment de barre de type 2M de la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer

Obset vations microscopiques. Ivalure et caracteristiques au metal							
Inclusions	%Inc	6	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire		
Carburation Microdureté	%C > 0,3	58,7	résultantes des	Martensite/Bainite	Non		
	%C*	0,4	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui		
	Ecart type	0,27		Ecrouissage	Non		
	Microdureté moyenne (HV)	192	Phosphore	Structures fantômes	Oui		
	Ecart type	48					

Observations microscopiques : *Nature et caractéristiques du métal*

La section longitudinale de la barre du Grésil est composée d'inclusions à hauteur de 6%, organisée autour d'une ligne de soudure traversant la section longitudinalement en son centre. Elle est composée à 59% d'acier dont la teneur en carbone est supérieure à 0,3%. Elle se compose d'une ligne centrale d'acier eutectoïde encerclée par des aciers hypereutectoïdes. La transition vers des teneurs en carbone plus faibles, atteignant celle de la ferrite, s'effectue graduellement. L'attaque au réactif Oberhoffer a mis en évidence la présence de structures fantômes témoignant de la présence de phosphore. Ceci explique que les duretés observées dans la ferrite soient plus élevées que celles attendues. Elles sont comprises entre 130 et 180 HV.



Cartographie de dureté

Micrographies



1 : De haut en bas, gradation des teneurs en carbone de la ferrite à l'acier eutectoïde.



: Acier hypereutectoïde



: Séparation franche par ligne de soudure entre un acier à 0,1% de carbone environ et un acier à 0,5-0,6% de carbone.



: Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer

SM-34-18-C3-80

Informations générales :

Site/Lieu-dit	Commune	Contexte	Da	tation
Saintes-Maries-de-la-Mer, épave 34	Saintes-Maries-de-la-Mer, Bouches-du-Rhône	Circulation	I ^{er} siècle av I ^{er} siècle	ant notre ère - de notre ère
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie
245 mm	45 mm	40 mm	2100 g	4C



Photographie de l'objet avant découpe

Observations macroscopiques :

La barre SM34-18-C3-80 est une barre de type 4C. Elle possède une largeur et une épaisseur qui la placent parmi les plus petits représentants de cette forme. Elle présente un niveau de corrosion très avancé. Une section longitudinale a été prélevée.

Observations microscopiques : *Nature et caractéristiques du métal*

Inclusions	%Inc	2	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	8,13	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,13		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,1		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	/	Phosphore	Structures fantômes	Non
	Ecart type	/			

L'analyse à l'échelle microscopique de la section longitudinale de la barre montre qu'elle est majoritairement ferritique, ce qui est rare pour une barre de type 4C. L'échantillon s'est brisé en deux parties lors de la découpe. La partie gauche (schéma ci-dessous) est entièrement ferritique, tandis que la partie droite est plus aciéré. Les teneurs en carbone dépassent toutefois rarement localement 0,5%.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées

5 cm





1 : Grains de ferrite équiaxe.

2: Grains de ferrite équiaxe.

3 : Acier à 0,3-0,5% de carbone environ, structure de Widmanstätten

4: Acier à 0,2-0,3% de carbone environ, structure de Widmanstätten

PLM-2					
Informations générales :]				
Site/Lieu-dit	Commune	Contexte	Dat	ation	
La Palme	La Palme (Aude)	Circulation	Haut-	Empire	
Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)	Masse (g)	Typologie	
292	66	76	10400	4C	







Photographie de l'objet avant découpe - Observation macroscopique de la section après attaque Nital - Schéma interprétatif de l'analyse macroscopique et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique

Observations macroscopiques :

Cette barre est une barre massive, de section rectangulaire, présentant six faces martelées. Ses dimensions et sa forme l'apparentent au type 4C de la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer. Un œil réalisé probablement à l'aide d'un poinçon est visible sur l'une des faces les plus larges.

Les deux sections longitudinales présentent de nombreuses inclusions et porosités, principalement aux extrémités de la barre. Les deux sections se composent à 75% de ferrite. Les extrémités sont plus carburées.

Analyses Macro					
Section	%Inc	%C > 0,3			
Total	7	21			

Observations microscopiques : <i>Nature et caractéristiques du métal</i>						
Inclusions	%Inc	5	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire	
Carburation	%C > 0,3	10	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non	
	%C*	0,14		Structures de Widmanstätten	Oui	
	Ecart type	0,21		Ecrouissage	Non	
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	/	Phosphore	Structures fantômes	Non	
	Ecart type	/				

Une partie représentative de l'ensemble de la section longitudinale a été étudiée microscopiquement. Si la ferrite est majoritairement présente, des structures d'acier eutectoïde et hypereutectoïde sont présentes en périphérie de la section. Très localement de la fonte est observée. La perlite est lamellaire. Par endroit, un refroidissement rapide a généré des structures de perlite nodulaire, principalement au niveau de la





1: Acier à 0,2-0,3% de carbone environ.

2: Gradient de teneur en carbone de la périphérie de l'objet au cœur, acier hypereuctoïde, acier eutectoïde et ferrite.

3: Acier hypereuctoïde

4 : Inclusion de scorie dans la matrice métallique.

5 : Acier eutectoïde (haut), acier eutectoïde et acier à 0,2% de carbone environ (bas).

6 : Acier à 0,1-0,2% de carbone.

GRU-1 (Gruissan)

Informations générales :

Site/Lieu-dit	Commune	Contexte	Datation	
Saint-Martin-le-Bas	Gruissan (Aude)		15-25 de	e notre ère
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie
230 mm	30 mm	10 mm	565 g	/



Photographie de l'objet avant découpe, analyse à l'échelle macroscopique et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique

Observations macroscopiques :

Cette barre longue de 23 cm présente une section rectangulaire aplatie s'amincissant dans sa longueur. Aucune trace de tranchage n'est visible, elle semble donc entière. Elle présente un percement circulaire d'un centimètre de diamètre centré sur une de ses faces les plus larges, à 2,5 cm d'une de ses extrémités. Cette barre ne s'apparente à aucun type connu de la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer.

observations incroscopiques. Ivalure et caracteristiques au metal							
Inclusions	%Inc	1	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire		
Carburation Microdureté	%C > 0,3	75	résultantes des	Martensite/Bainite	Oui		
	%C*	0,27-0,62	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui		
	Ecart type	0,1-0,3		Ecrouissage	Oui		
	Microdureté moyenne (HV)	249	Phosphore	Structures fantômes	Oui		
	Ecart type	143					

a fait a fait and the second and

scopiques · Natu

La section longitudinale est quasiment exempte d'inclusions. Quelques fissures ont été observées dans le métal. Après découpe, on remarque que le percement n'est pas traversant. Il est bouché sur un tiers environ. La section est composée à plus de 70% d'acier (%C >0,3). D'une extrémité à l'autre de la barre, elle se compose de martensite, bainite et de perlite nodulaire, puis d'acier de teneur en carbone avoisinant 0,2% puis de ferrite. L'attaque au réactif Oberhoffer a révélé la présence de phosphore dans la barre.



Mosaïque après attaque au réactif Nital



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté

Oh



1: Transition entre un acier à l'eutectoïde et un acier à 0,1% de carbone environ.

2: Séparation franche par une ligne de soudure entre un acier à 0,1% de carbone environ et un acier trempé.

3 : Grains de ferrite de taille variable.

4: Ferrite écrouie dans la partie bouchée du percement.

5 : Structures hors équilibre de type martensite et perlite nodulaire.

6: Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer

PZL (Paziols)					
Informations générales :]				
Site/Lieu-dit	Commune	Contexte	Dat	ation	
La Tuilerie	Paziols (Aude)	Circulation	Antiquité d	e façon large	
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie	
252 mm	35 mm	25 mm	1850 g	Barre 2M	



A)Photographie de l'objet avant découpe B) Observation macroscopique de la section après attaque Nital C) Schéma interprétatif de l'analyse macroscopique et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

Observations macroscopiques :

Cette barre de section rectangulaire possède toutes ses faces martelées. Une des extrémités est effilée, tandis que l'autre semble avoir été légèrement repliée puis tranchée à chaud. Un léger renflement de la matière est visible au centre de la barre. Après découpe, la section longitudinale révèle peu d'inclusions. L'attaque au réactif Nital montre que la barre est aciérée (%C >0,3) à hauteur de 47%

Analyses Macro		
%Inc	%C > 0,3	
1,21	47	

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal Caractéristiques 0,5 Lamellaire Inclusions %Inc Forme de la perlite résultantes des %C > 0.353 Martensite/Bainite Oui conditions Structures de thermiques et %C* Carburation 0,21-0,47 Oui Widmanstätten mécaniques de Ecart type 0,26 Ecrouissage Non travail Microdureté Structures 163 Phosphore Non Microdureté moyenne (HV) fantômes 62 Ecart type

Dans la section prélevée jugée représentative de l'ensemble, l'acier se présente par sous forme de martensite, de bainite ou de perlite nodulaire. Par endroit, les structures ne sont pas clairement définies. Perlite nodulaire, perlite globulaire et martensite coexistent. La barre pourrait avoir subi un traitement de revenu après trempe. Ceci expliquerait pourquoi les duretés sont plus faibles que celles attendues pour les aciers trempés.



нν

<80

102-124

Mosaïque après attaque au réactif Nital

Analyse de microdureté



190-212

146-168

234-256 278-300



Cartographie de dureté



: Acier à 0,5-0,6% de carbone



: Acier à 0,2-0,3% de carbone, structure de Widmanstätten



: Ferrite non équiaxe



4 : Perlite nodulaire



A)Photographie de l'objet avant découpe B) Observation macroscopique de la section après attaque Nital C) Schéma interprétatif de l'analyse macroscopique et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

Observations macroscopiques :

Cette demi-produit est une barre de section rectangulaire. Elle est fine et relativement bien conservée. Les quatre faces les plus larges sont planes et parallèles deux à deux. Elles ont été martelées. Les deux extrémités ne sont pas mises en forme. L'une d'elle est arrondie, l'autre semble avoir été tranchée à chaud. Après découpe, la surface laisse apparaitre un métal très compacté, quelques inclusions sont visibles mais elles sont très petites, fines et réparties sur l'ensemble de la surface. Elles occupent moins de 1% de la surface. La barre est essentiellement ferritique, seules quelques zones d'acier (%C > 0,3%) sont visibles, par endroit en périphérie de la barre à hauteur de 13% de la surface.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal						
Inclusions	%Inc	2	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire	
Carburation	%C > 0,3	15	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non	
	%C*	0,13		Structures de Widmanstätten	Oui	
	Ecart type	0,17		Ecrouissage	Oui	
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	107	Phosphore	Structures fantômes	Non	
	Ecart type	23				

La section observée présente de très fines inclusions allongées dans le sens du martelage et concentrées principalement dans la partie supérieure. La section est majoritairement ferritique. Un liseré d'acier plus carburé, autour de 0,3% de carbone longe les deux extrémités. Toutefois, un gradient des teneurs en carbone n'est pas noté. Il s'agit donc probablement de l'hétérogénéité de la masse brute initiale et non d'une cémentation.







1 : Inclusions déformées par martelage au niveau d'une des extrémités de la barre



3: Macles observées dans des grains de ferrite, probablement suite à un choc à froid.



2 : Bande d'acier à 0,3% de carbone environ



4 : Acier presque eutectoïde



A)Photographie de l'objet avant découpe B) Observation macroscopique de la section après attaque Nital C) Schéma interprétatif de l'analyse macroscopique et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

Observations macroscopiques :

La barre de Thuir THR-1 est un bloc court parallélépipédique compacté. Il est entièrement mis en forme, les six faces ont été martelées jusqu'à devenir planes. Les arrêtes sont franches et les angles sont droits. Elle présente de grande similitude morphologique et métrologique avec la barre de Thuir THR-2. Les sections longitudinale et transversale sont majoritairement aciérée et riches en inclusion.

Analyses Macro		
%Inc	%C > 0,3	
6	65	
Observations microscopiques : *Nature et caractéristiques du métal*

Inclusions	%Inc	13	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	56	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,35		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,23		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	/	Phosphore	Structures fantômes	Non
	Ecart type	/			

L'analyse à l'échelle microscopique de la section transversale montre qu'elle est composée à 56% d'acier. Les surfaces aciérées sont distribuées de façon aléatoire et reflètent l'hétérogénéité de la masse brute à partir de laquelle est issu ce bloc métallique. Des structures d'acier hypereutectoïde ont été observées. Les inclusions sont encore nombreuses et occupent 13% de la surface de la section.

> 2,1

Section 1 :

Analyse métallographique



Mosaïque après attaque au réactif Nital



% C 0.9 - 2.1 0.7 - 0.9 0.5 - 0.7 0.3 - 0.5 0.1 - 0.3 < 0.1 Inclusions, Martensite porosités, Bainite, nodulaire corrosion perite nodulaire



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées





1 : Chapelet scoritique



3 : Bande d'acier à 0,3% de carbone environ entourée d'acier eutectoïde



2 : Acier à 0,4-0,5% de carbone environ



4 : Acier hypereutectoïde

THR-2 (Thuir)

Informations générales :

Site/Lieu-dit	Commune		Contexte	Datation
Els Vidrers	Thuir, Pyrénées-Orientales		Circulation/Stockage	IV ^{ème} siècle
Longueur	Largeur	Epaisseur	Masse	Typologie
115 mm	66 mm	53 mm	1900 g	/



A)Photographie de l'objet avant découpe B) Observation macroscopique de la section après attaque Nital C) Schéma interprétatif de l'analyse macroscopique et indications des zones prélevées pour analyses à l'échelle microscopique (encadrés rouges)

Observations macroscopiques :

La barre de Thuir THR-2 est un bloc court parallélépipédique compacté. Il est entièrement mis en forme, les six faces ont été martelées jusqu'à devenir planes. Les arrêtes sont franches et les angles sont droits. Elle présente de grande similitude morphologique et métrologique avec la barre de Thuir THR-1. Après découpe et attaque au réactif Nital, la section longitudinale et transversale présentent une surface majoritairement aciérée et encore riche en inclusions. Une grande porosité centrale est présente sur la section longitudinale.

Analyses Macro					
%Inc	%C > 0,3				
5	52				

Observations microscopiques	: Nature et	t caractéristiques	du métal
------------------------------------	-------------	--------------------	----------

Inclusions	%Inc	9	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	60	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,42	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,26		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	/	Phosphore	Structures fantômes	Non
	Ecart type	/			

L'analyse à l'échelle microscopique de la section transversale montre qu'elle est composée à 60% d'acier. Les surfaces aciérées sont distribuées de façon aléatoire et reflètent l'hétérogénéité de la masse brute à partir de laquelle est issu ce bloc métallique. Les porosités sont présentes sur l'ensemble de la section, elles occupent 9% de la surface.



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées





1 : Zone aciérée à 0,5% au cœur d'une zone à 0,2% de carbone environ.



3 : Acier à 0,2-0,3% de carbone



2 : Acier à 0,6-0,7% de carbone environ



4 : Acier à 0,1-0,2% de carbone

<u>Artefacts issus du site de Castel-</u> <u>Minier</u>

13284



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit se présente sous la forme d'un fragment de barre. Il présente un écrasement par martelage de son extrémité gauche. Un pincement de la matière est visible au niveau de sa partie droite.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	1,3	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	43	résultantes des conditions	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,34	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,32		Ecrouissage	Oui
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	168			
	Ecart type	65			

Observations microscopiques : Ce demi-produit présente une hétérogénéité de composition entre sa section longitudinale hétérogène en composition et sa partie transervale très carburée. Les zones carburées s'organisent en bandes orientées dans le sens de la longueur, pouvant refléter l'hétérogénéité de la masse brute initiale à partir duquel il est issu. Des lignes de soudures sont également visibles. Autour d'elles, la matière est parfois décarburée, tout comme sur les bords de l'objet par endroit. Pour la section longitudinale, on remarque sur la partie supérieure un bord très carburé, composé d'acier hypereutectoïde. L'extremité gauche présente des replis et une zone d'écrouissage dû au martelage et à l'écrasement. Des structures hypereutectoïdes sont présentes sur la partie inférieure droite. Ainsi, la tête est faiblement carburée contrairement à la pointe. C'est pourquoi, en corrélation avec sa forme, ce produit pourrait être une ébauche.

Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 6016
- Secteur : Source
- Isolat : 44599
- Année de découverte : 2016
- **Datation** : Fin XIII^{ème} siècle
- Longueur : 125 mm
- Largeur : 34 mm
- Epaisseur : 7 mm
- Masse : 271 g



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées

Cartographie de dureté







1: Décarburation autour d'une ligne de soudure



3: Gradation d'un acier hypereutectoïde à la ferrite



2 : Ecrouissage des grains dans une zone de repli



4: Fonte et acier hypereutectoïde





Cartographie de dureté

Microdureté					
Moyenne	205				
Ecart type	59				

Micrographies



1: Acier à 0,5% de carbone



3 : Bande d'acier de carburation diverse



2 :De la ferrite à l'acier eutectoïde



4: Acier eutectoïde

13286 **Informations générales :** Site : Castel-Minier • 13286a **US**: 6016 Secteur : Source **Isolat** : 44600 13286b Année de découverte : 2016 • **Datation** : Fin XIII^{ème} siècle • Longueur : 125 mm • Largeur : 70 mm • -> Epaisseur : 5 mm • 5 cm Crédits : J-C Méaudre 0 **Masse** : 291 g

119

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit, martelée sur toutes ses faces, présente un percement et une trace de découpe en biseau sur une partie de son extrémité gauche. Un second percement semble se deviner sur l'extrémité droite. Ce demi-produit se rapproche davantage de l'ébauche ou de l'objet fini.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	0,7	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3 92 resultantes des conditions	Martensite/Bainite	Non		
Carburation	%C*	0,65	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,19		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	210			
	Ecart type	55			

<u>Observations microscopiques</u> : L'étude métallographique révèle un demi-produit entièrement aciéré. La section transversale est légèrement moins carburée que la section longitudinale. On note, pour cette section, une diminution des teneurs en carbone en s'approchant du bord de l'objet. En périphérie des sections, quelques zones de perlite nodulaire sont remarquées. Des lignes de soudure sont également visibles, avec décarburation de la matière.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



1 : Bande d'acier de carburation différente



3 : Acier à 0,6% de carbone environ



2 : Décarburation autour d'une ligne de soudure



4 : Décarburation autour d'une ligne de soudure



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté

Micrographies



1 : Acier à 0,6% de carbone environ



3: Ferrite (haut) et acier à 0,4% de carbone (bas)



2 : Gradation : acier à 0,3% de carbone vers la ferrite



4: Acier eutectoïde, perlite nodulaire

13287



Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 6016
- Secteur : Source
- **Isolat** : 44597
- Année de découverte : 2016
- **Datation** : Fin XIII^{ème} siècle
- Longueur : 80 mm
- Largeur : 65 mm
- **Epaisseur** : 4,6 mm
- Masse : 179 g

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit se présente sous la forme d'une tôle fine et martelée, avec repli de deux extrémités.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	0,7	Caractéristiques résultantes des	Forme de la perlite	Lamellaire et globulaire
Carburation	%C > 0,3	33	conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Oui
	%C*	0,21-0,37		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,1-0,3		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	129			
	Ecart type	37			

<u>Observations microscopiques</u> : Ce demi-produit présente un gradient de teneurs en carbone dans l'épaisseur, d'un bord à l'autre de l'objet, d'une zone carburée et trempée à une zone ferritique. Un revenu semble avoir été effectué après la trempe. Des lignes de soudures sont visibles. Elles séparent la zone la plus carburée et trempée de la zone ferritique. La cémentation semble donc à exclure.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées

нv



80-102 124-146 168-190 212-234 256-278





Analyse de microdureté

1 : De la ferrite vers un acier trempé avec revenu



3 : Structure de trempe avec revenu probable



>300

2 : Ferrite équiaxe



4 : Structure de trempe avec revenu probable



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



1 : De la ferrite vers un acier trempé avec revenu



3 : Structure de martensite et de ferrite



2 :Structure de martensite



4 : Ferrite équiaxe

12185



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 3082
- Secteur : *Castrum*-flanc ouest (Bâtiment 10)
- **Isolat** : 39972
- Année de découverte : 2014
- **Datation** : XIV^{ème} siècle
- Longueur : 92 mm
- Largeur : 16-44 mm
- Epaisseur : 22 mm
- Masse : 292 g

Ce demi-produit se présente sous la forme d'une barre trapézoïdale. D'une extrémité à l'autre, le demiproduit s'amincit dans la largeur et dans l'épaisseur. Il présente une trace de tranchage à chaud à une extrémité avec un surplus de matière. Il pourrait s'agir plus probablement d'un ébauche d'objet.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	0,9	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	32	résultantes des	Martensite/Bainite	Oui
Carburation	%C*	0,14-0,3	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,11-0,34		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	190			
	Ecart type	122			

<u>Observations microscopiques</u>: La section longitudinale se divise en deux parties de carburation différente. La partie supérieure (schéma ci-dessous), se compose de ferrite équiaxe. La partie inférieure est composée d'acier, trempé sous forme de martensite, bainite et perlite nodulaire. Un alignement d'inclusions pouvant matérialiser une soudure sépare ces deux parties. Les inclusions sont quasi-absentes du reste de la section.



10 mm

Cartographie de dureté



Micrographies

1 : De la ferrite à l'acier eutectoïde, puis structure de trempe

2 : Gradation de la ferrite à l'acier eutectoïde

3 : Zone ferritique et zone aciérée trempée

4 : Ferrite équiaxe



127

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cet artefact se présente sous la forme d'une petite massette de section ronde. L'une des extrémités est large et évasée, et semble avoir été aplanie par martelage. L'autre se resserre et présente donc un plus petit diamètre. Il se rapproche davantage d'une ébauche d'objet que d'un demi-produit.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	2,4	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation Microdureté	%C > 0,3	87	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Oui
	%C*	0,27-0,7		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,1-0,25		Ecrouissage	Oui
	Microdureté moyenne (HV)	262			
	Ecart type	140			

<u>Observations microscopiques</u> : La section longitudinale de cette ébauche est composée de bande de carburation différente. Des bandes de ferrite et d'acier trempé se succèdent. La partie droite, écrasée par martelage est entièrement aciérée et trempée. Il pourrait s'agir d'une cémentation visant à renforcer cette partie spécifique de l'ébauche.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté





1: Structure de trempe, martensite et bainite nodulaire

2 : Acier trempé, martensite, et aiguilles de ferrite, structure de Widmanstatten.

3 : Structure de trempe, martensite et bainite nodulaire

4: Structure de trempe, martensite et bainite nodulaire

50 um

12188



Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 3082
- Secteur : *Castrum*-flanc ouest (Bâtiment 10)
- Isolat : 39975
- Année de découverte : 2014
- **Datation** : XIV^{ème} siècle
- Longueur : 78 mm
- Largeur : 21 mm
- Epaisseur : 21 mm
- Masse : 171 g

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit est une courte barre de section octogonale. Les faces sont parallèles et martelées. Aucune trace de tranchage à chaud n'est visible.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	2	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	38	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,29	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,23		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	140			
	Ecart type	28			

<u>Observations microscopiques</u>: La section transversale présente une hétérogénéité de composition. Composée d'acier peu carburé (%C<0,3) à hauteur de 62%, elle présente toutefois quelques zones d'acier plus carburés, et eutectoïdes, distribués de façon aléatoire, et reflétant ainsi l'hétérogénéité de la masse brute initiale. Les inclusions sont distribuées de façon uniforme dans la section.



ΗV



Mosaïque après attaque au réactif Nital



Cartographie de dureté

Micrographies



1: Ferrite avec inclusions, en périphérie zone d'acier.

Inclusions,

corrosion

Cartographie correspondante indiquant la

répartition des différentes zones carburées

80-102 124-146 168-190 212-234 256-278 >: 102-124 146-168 190-212 234-256 278-300

Perlite

seule

Martensit porosités, Bainite, nodulaire

perlite nodulaire

>300

2: Acier à 0,7% de carbone environ encerclé par un acier à 0,3% de carbone.

3 : Acier peu carburé à 0,1% carbone de environ et inclusions.

4: Gradation de la ferrite à un acier à 0,7% de carbone.



131

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit se présente sous la forme d'une barre de section grossièrement circulaire et de diamètre avoisinant les 10 mm. Elle semble tranchée à ses extrémités mais son état de corrosion avancé empêche une lecture correcte de son état de surface.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	1,7	Caractéristiques	Forme de la perlite	Globulaire
	%C > 0,3	47	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,29		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,18		Ecrouissage	Oui
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	/			
	Ecart type	/			

<u>Observations microscopiques</u> : La section transversale de cette chute de barre ronde est hétérogène. Elle comporte des zones ferritiques et des zones aciérées parfois jusqu'à l'eutectoïde. Les bandes de carburation s'organisent symétriquement autour d'une ligne de soudure traversant la section en son centre. De fait, il pourrait s'agir d'une soudure par repli. La perlite est globulaire, témoignant d'un maintien en température puis d'un refroidissement modéré.



13376-5



Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 3214
- Secteur : Castrum- flanc sud
- Isolat : /
- Année de découverte : 2016
- **Datation** : XIV^{ème} siècle
- Longueur : 79 mm
- Largeur : 25-31 mm
- Epaisseur : 3-13 mm
- Masse : 53 g

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit se présente sous la forme d'une barre de section quadrangulaire, martelée sur toutes ses faces. Une des extrémités est tranchée, tandis que l'autre n'est pas mise en forme. D'une extrémité à l'autre du demi-produit, la largeur augmente et l'épaisseur diminue. Il pourrait s'agir d'une soie de préhension.

Observations microscopiques : *Nature et caractéristiques du métal*

Inclusions	%Inc	1,5	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	29	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,26		Structures de Widmanstätten	Oui
Ecart type 0,24 trav	travail	Ecrouissage	Non		
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	142			
	Ecart type	35			

<u>**Observations microscopiques</u></u> : La section longitudinale et la section transversale de cette chute de demiproduits présentent des profils identiques. Toutes deux se composent majoritairement de ferrite ou d'acier peu carburé (%C<0,3). Quelques zones plus carburée, dont la teneur en carbone peut atteindre l'eutectoïde s'organisent sous forme de bande traversant longitudinalement la section longitudinale et transversalement la section transversale.</u>**



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Microdureté				
Moyenne	140			
Ecart type	28			

Cartographie de dureté



1: Inclusions allongées par martelage dans matrice ferritique

2 : Acier à 0,7% de carbone environ

3 : Bande de ferrite et d'acier de carburation diverse allongées perpendiculairement au sens du martelage, au même titre que les inclusions.

4: Acier à 0,6-0,7% de carbone entouré par un acier à 0,2-0,3% de carbone.









Mosaïque après attaque au réactif Nital



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



Microdureté		
Moyenne	144	
Ecart type	42	











1: Acier à 0,2-0,3% de carbone (partie supérieure) et acier à 0,4-0,5% de carbone (partie inférieure).

2: Bande d'acier quasiment eutectoïde entouré par un acier à 0,3% de carbone environ.

3: Ferrite avec chapelets d'inclusions

4 : Ferrite entourée par un acier à 0,1% de carbone.



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit se présente sous la forme d'une plaque trapézoïdale. La largeur d'une des extrémités devient plus fine. Elle présente une trace de tranchage à chaud à une des extrémités.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	1,3	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	19,1	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,2		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,21		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	123			
	Ecart type	40			

<u>**Observations microscopiques</u></u> : Ce demi-produit se compose majoritairement de ferrite et de quelques zones d'acier à perlite lamellaire, notamment sur la section transversale. Les zones carburées se distribuent de façon aléatoire au sein de la matrice métallique. La section longitudinale se compose principalement de ferrite et d'acier peu carburé (%C<0,3). Des lignes de soudure traversent la section, potentiellement dûes au repli de la matière sur elle-même.</u>**





Microdureté				
Moyenne	107			
Ecart type	12			

Cartographie de dureté



1: Lignes d'inclusions matérialisant des lignes de soudures. Structures d'acier à 0,3% de carbone et acier à 0,1% de carbone.

2 : Zone d'acier à 0,2% de carbone avec des grandes plages de perlite.

3 : Ferrite équiaxe à taille de grains très variable.

4: Acier à 0,1% de carbone environ.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Microdureté				
Moyenne	138			
Ecart type	50			

Cartographie de dureté



1 : Acier à 0,2% de carbone entouré d'acier eutectoïde.

2 : Alternance de bandes d'acier de carburation différentes

3 : Ferrite équiaxe

4 : Acier à 0,7% de carbone environ, perlite lamellaire

12292/2

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit se présente sous la forme d'une petite barre de section rectangulaire, dont l'une des extrémités est martelée tandis que l'autre n'est pas mise en forme.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	9,4	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	97	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,64		Structures de Widmanstätten	Non
	Ecart type	0,18		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	208			
	Ecart type	43			

<u>Observations microscopiques</u>: Ce demi-produit est composé uniquement d'acier dont la teneur en carbone est supérieure à 0,3 %. La section longitudinale présente de nombreuses inclusions réparties sur l'ensemble de la surface de l'échantillon.

Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 3067
- Secteur : *Castrum*-flanc sud, Plat du Roi
- Isolat : /
- Année de découverte : 2014
- Datation : XV^{ème} siècle
- Longueur : 90 mm
- Largeur : 10,5 mm
- **Epaisseur** : 10,3 mm
- Masse : 49 g





Cartographie de dureté

нν



Acier 1: à l'eutectoïde.

2: Bande d'acier à 0,6% de carbone environ au cœur d'une zone d'acier eutectoïde.

3 : Acier à 0,4-0,5% de carbone.

4: Acier hypereutectoïde.



100 μm

141

12292/5



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 3067
- Secteur : *Castrum*-flanc sud
- Isolat : /
- Année de découverte : 2014
- **Datation** : XV^{ème} siècle
- Longueur : 70 mm
- Largeur : 14 mm
- Epaisseur : 9 mm
- Masse : 80 g

Ce demi-produit se présente sous la forme d'une barre de section carrée, tranchée à une extrémité et martelée à l'autre. Les faces sont parallèles deux à deux, planes et régulières.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	1,7	Caractéristiques résultantes des	Forme de la perlite	Lamellaire et globulaire
	%C > 0,3	19	conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,22		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,2		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	122			
	Ecart type	28			

<u>Observations microscopiques</u> : La section longitudinale est majoritairement ferritique. Seules quelques zones plus carburées sont présentes en périphérie sur une des faces, laissant penser potentiellement à une cémentation sur une seule des faces. La section transversale est plus carburée. La perlite, lamellaire et globulaire par endroit, montre qu'un maintient à haute température a été effectué.





Microdureté			
Moyenne	120		
Ecart type	24		

Cartographie de dureté



1 : Acier à 0,8% de carbone en périphérie de l'échantillon et acier à 0,3%-0,4% de carbone vers le cœur.

2 : Acier à 0,1% de carbone à petits grains et ferrite à plus gros grains.

3 : Transition entre un acier à 0,5% de carbone et un acier à 0,2% de carbone.

4: Acier à 0,1%-0,2% de carbone. Perlite en cours de globularisation.





Cartographie de dureté

Micrographies

Inclusions		
% Inc	1,6	
Corhuration		
%C*	0,36	
Surface carburée	46,1	
Ecart type	0,27	

Microdureté			
Moyenne	135		
Ecart type	39		



1: Transition entre un acier à 0,8% de carbone et un acier à 0,2% de carbone.

2 : Transition entre un acier à 0,8% de carbone et un acier à 0,2% de carbone.

3: Acier à 0,3%-0,4% de carbone – Structure de Widmanstätten.

4: Acier à 0,5% de carbone – Perlite en cours de globularisation.


145

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit se présente sous la forme d'une petite barre de section carrée, tranchée à une des extrémités et amincie en épaisseur à l'autre. Elle correspond à une extrémité de demi-produit. Il pourrait s'agir d'une soie de préhension, d'autant plus que l'extremité non tranchée n'est pas mise en forme.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	2,8	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	57	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,37		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,25		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	147			
	Ecart type	42			

<u>Observations microscopiques</u> : Ce demi-produit est relativement hétérogène en composition. L'hétérogénéité provient de l'hétérogénéité de la masse brute initiale.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées







1 : Ferrite équiaxe.

2 : Acier à 0,7%C vers un acier à 0,2%C.

3: Acier à 0,7%C.

4: Acier à 0,6%C, perlite lamellaire.

Section transversale: 12247-3b

Analyse métallographique



5 mm

Mosaïque après attaque au réactif Nital



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Micrographies



% C

> 2,1 0,9 - 2,1 0,7 - 0,9 0,5 - 0,7 0,3 - 0,5 0,1 - 0,3 < 0,1 Inclusions, Martensite

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Inclusions						
% Inc	3,9					
Carburation						
%C*	0,34					
%C > 0,3	53,5					
Ecart type	0,23					

Microdureté				
Moyenne	144			
Ecart type	37			



1: Gradation des teneurs en carbone de la ferrite à l'acier eutectoïde.

2 : Acier à 0,6-0,7% de carbone.

3 : Acier à 0,1% de carbone environ.

4 : Acier à 0,6% de carbone environ.

Perlite

seule

porosités, Bainite, nodulaire

perlite

nodulaire

corrosion

12472/2-1



Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 3017
- Secteur : *Castrum*-flanc ouest
- Isolat : /
- Année de découverte : 2015
- Datation : XV^{ème} siècle
- Longueur : 71 mm
- Largeur : 30 mm
- Epaisseur : 2 mm
- Masse : 49 g

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit se présente sous la forme d'une plaque de faible épaisseur, dont une des extrémités est tranchée à chaud, tandis que l'autre est arrondie et n'est pas mise en forme.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	1,1	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	92,5	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Perlite nodulaire
	%C*	0,37-0,63		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,03-0,16		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	222			
	Ecart type	52			

<u>Observations microscopiques</u> : Ce demi-produit se compose majoritairement d'acier dont le refroidissement a été rapide comme le témoigne la présence de perlite nodulaire. Une ligne de soudure, autour de laquelle la matière est décarburée, est visible. Une décarburation périphérique semble avoir eu lieue, probablement consécutive au martelage.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées





1: Acier à 0,3% de carbone environ

2: Perlite nodulaire

3 : Bande d'acier à 0,2-0,3% de carbone entourée d'acier plus carburé, sous forme de perlite nodulaire

4: Décarburation de la matière (environ 0,2% de carbone) autour d'une ligne de soudure joignant deux parties aciérées composées de perlite nodulaire.



200 µm

200 µm



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit se présente sous la forme d'une soie de préhension. Elle possède une forme triangulaire, amincie à une extrémité et tranchée à l'autre. La matière est repliée sur elle-même au niveau de l'extremité tranchée. Deux parties métalliques sont soudées l'une à l'autre.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	2,7	Caractéristiques	Forme de la perlite	Globulaire
Carburation	%C > 0,3	57	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,45		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,36		Ecrouissage	Oui
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	173			
	Ecart type	45			

Observations microscopiques : Ce demi-produit se compose de deux parties se faisant face, l'une ferritique, l'autre à 0,8% de carbone. Aucune ligne de soudure n'est visible entre les deux parties. En revanche, on note une ligne de soudure est visible dans la partie ferritique. Il pourrait alors s'agir d'une soudure de repli de la matière sur elle-même avec décarburation autour de la ligne de soudure. Il semble qu'un revenu ait été opéré sur la surface. La perlite est globulaire. Les extrémités ont ensuite été repliées.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées

5 mm



Cartographie de dureté

Micrographies



1 : Interface entre acier eutectoïde et ferrite



3: Acier eutectoïde, perlite globulaire



2 : Grains de ferrite et inclusions



4 : Perlite en cours de globularisation



153

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit est une chute de demi-produit de section rectangulaire. Les faces sont planes, martelées et parallèles deux à deux. Une des extrémités présentent une trace de tranchage à chaud. L'autre semble cassée ou non mise en forme.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	2,4	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	49,6	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,36		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,34		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	146			
	Ecart type	40			

Observations microscopiques : La section longitudinale et la section transversale sont toutes deux hétérogènes. Les structures observées sont très variables de la ferrite à l'acier hypereutectoïde. Les différentes zones carburées s'organisent sous forme de bandes suivant le sens du martelage de la barre.



80-102 124-146 168-190 212-234 256-278

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Microdureté					
Moyenne	152				
Ecart type	44				

>300

Cartographie de dureté



1: Bande de carburation différente.

2: Ferrite à petits grains, acier eutectoïde et acier hypereutectoïde.

3: Gradation des teneurs en carbone, acier hypereutectoïde en périphérie, acier eutectoïde et acier à 0,4% de carbone.

4: Acier hypereutectoïde – aiguilles de cémentite.



5 mm

Cartographie de dureté



1: De la périphérie au cœur : acier eutectoïde, ferrite, acier à 0,6% de carbone. Possible cémentation en périphérie de l'objet.

2 : Acier à 0,3% de carbone avec grandes plages de perlite.

3: Acier hypereutectoïde.

4: Acier hypereutectoïde – Aiguilles de cémentite.



prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit est un fer plat, de section rectangulaire. Les traces de tranchage à chaud ne sont pas visibles aux extrémités. Les surfaces sont parallèles les unes aux autres.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	1,3	Caractéristiques résultantes des	Forme de la perlite	Lamellaire et globulaire
Carburation	%C > 0,3	68	conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,32-0,48		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,17-0,28		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	191			
	Ecart type	58			

Observations microscopiques : Ce demi-produit présente une structure aciérée sur sa partie longitudinale. Une décarburation périphérique est possible. Au centre, la perlite nodulaire explique les valeurs de dureté plus fortes que celles attendues pour l'acier eutectoïde. La taille des grains, très petite, peut également être une raison d'une augmentation de dureté. La perlite lamellaire et globulaire par endroit témoigne d'un maintien à haute température.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



1: De la ferrite à l'acier à 0,5%C.

2 : Acier à 0,5%C.

3 : Ferrite avec cémentite aux joints de grains.

4 : De l'acier à 0,5%C à l'acier à 0,1%C.



HV

102-124

5 mm

Mosaïque après attaque au réactif Nital

Analyse de microdureté



répartition des différentes zones carburées 124-146 168-190 212-234 256-278 80-102 >300 146-168 190-212 234-256 278-300

Cartographie correspondante indiquant la

Inclusions						
1,2						
tion						
0,32						
48,1						
0,19						

Microdureté				
Moyenne	151			
Ecart type	29			

Mosaïque après attaque au réactif Nital



1: Zone ferritique encerclée par un acier à l'eutectoïde.

2: Grains de ferrite équiaxes autour d'inclusions et acier à 0,2-0,3% de carbone.

3 : Ferrite en périphérie et acier à 0,2-0,3% de carbone à cœur.

4: Acier à l'eutectoïde

12678-14-2



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- US: 2529
- Secteur : Mouline, canal du XV^{ème} siècle
- Isolat : /
- Année de découverte : 2015
- Datation : XV^{ème} siècle
- Longueur : 60 mm
- Largeur : 20 mm
- Epaisseur : 5 mm
- Masse : 37,8 g

Ce demi-produit se présente sous la forme d'un éclat de compactage. Aucune trace de tranchage à chaud nette n'est à remarquer. Les extrémités semblent plutôt fragmentées. Les faces sont parallèles deux à deux mais ne sont pas tout à fait planes.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	2,3	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	55	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,59	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,4		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	176			
	Ecart type	70			

<u>Observations microscopiques</u> : La section longitudinale présente deux natures de métal différentes se faisant face. La partie supérieure se compose de ferrite, quelques zones plus carburées en périphérie peuvent laisser penser à une cémentation. L'autre partie se compose d'acier hypereutectoïde. Les deux parties sont séparées par un liseré d'acier à l'eutectoïde. La section est traversée par une ligne de soudure dans laquelle la corrosion s'est infiltrée.





161

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zone. prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit se présente sous la forme d'une barre de section rectangulaire, tranchée à chaud à une extrémité. D'une extremité à l'autre, la largeur de la barre diminue mais son épaisseur reste constante. La seconde extremité est appointée. En ce sens, elle s'apparente à une soie de préhension. Les quatre faces ont été martelées.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	0,5	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	73,5	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Oui
	%C*	0,25-0,62		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,1-0,3		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	284			
	Ecart type	136			

Observations microscopiques : Ce demi-produit présente des structures de type martensite, bainite et perlite nodulaire témoignant d'un refroidissement rapide de la matière. Ces structures de trempe expliquent la dureté élevée de cet échantillon. Les zones ferritiques présentent également des duretés élevées probablement car le carbone s'y trouve piégé en solution.





50 µm

1: Martensite, bainite et perlite nodulaire.

2 : De gauche à droite, martensite, perlite nodulaire puis acier à 0,2% de carbone environ.

3 : Martensite, bainite et perlite nodulaire, ferrite aux joints de grains

4: Martensite, bainite et perlite nodulaire, ferrite aux joints de grains

50 µm



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit se présente sous la forme d'une barre de section rectangulaire, tranchée à chaud à une extrémité. Il présente de grande similitude avec le demi-produit CL13380-1. Tout comme pour ce dernier, la largeur de la barre diminue au fur et à mesure que l'on s'approche de la seconde extrémité non tranchée. Cette diminution est dûe à un repli de la matière dans la largeur. En ce sens, cet artefact s'apparente, lui aussi à une soie de préhension.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	1,6	Caractéristiques résultantes des	Forme de la perlite	Lamellaire et globulaire
Carburation	%C > 0,3	39,6	conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,25		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,21		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	126			
	Ecart type	27			

<u>**Observations microscopiques</u>** : Ce demi-produit, majoritairement ferritique, présente néanmoins 40 % de sa surface carburée (%C > 0,3). La perlite est en cours de globularisation, ce qui signifie que la matière a été maintenue à haute température.</u>





Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



1: Hétérogénéité du demi-produit, acier à 0,8% de carbone vers la ferrite.

2: Gradation des teneurs en carbone du centre vers la périphérie de l'objet, de la ferrite à un acier à 0,6% de carbone. Cémentation possible.

3 : Ferrite équiaxe et inclusions.

4: Acier à 0,7% de carbone environ, perlite en cours de globularisation.



165

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit se présente sous la forme d'une tige de fer plate de section rectangulaire. Les deux faces ne sont pas totalement planes, une des extrémités est légèrement recourbée. L'autre extrémité est tranchée à chaud.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	2	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	78,2	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,45	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,19		Ecrouissage	Léger
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	156			
	Ecart type	31			

Observations microscopiques : Ce demi-produit est composé majoritairement d'un acier à 0,6 % de carbone environ. La périphérie de l'objet semble avoir été décarburée. Les grains de l'une des extrémités sont écrouis.



Mosaïque après attaque au réactif Nital



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées





Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit se présente sous la forme d'une tige de fer plate de section rectangulaire. Une des extrémités semble brisée, on ne note pas de trace nette de tranchage à chaud.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	0,8	Caractéristiques résultantes des	Forme de la perlite	Lamellaire et globulaire
	%C > 0,3	86,7	conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,43-0,6		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,20-0,22		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	230			
	Ecart type	48			

Observations microscopiques: Cette chute de demi-produit présente une section longitudinale et transversale majoritairement aciérée. La perlite est nodulaire ce qui témoigne d'un refroidissement rapide. Pour la section transversale, les bandes de carburation suivent le mouvement induit par le martelage du métal.



5 mm

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



1: Acier à 0,2% de carbone entre deux bandes d'acier à 0,8% de carbone.

2 : Acier à 0,1 − 0,2 % de carbone.

3 : Acier à 0,2 % de carbone et 0,6 % de carbone.

4 : Acier à 0,5 % de carbone, perlite lamellaire.



HV

<80

Cartographie correspondante indiquant la

répartition des différentes zones carburées

1,23

0,56 78

0,29

80-102 124-146 168-190 212-234 256-278 >300

102-124 146-168 190-212 234-256 278-300

Carburation

% Inc

%C*

%C > 0,3 Ecart type

Mosaïque après attaque au réactif Nital

Analyse de microdureté



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Micrographies



1: Hétérogénéité de la matière, bande d'acier à 0,8% de carbone et bandes à 0,3% de carbone suivant le sens du martelage.

Microdureté

Moyenne Ecart type 209

35

2: Frontière nette entre un acier à 0.8 % de carbone et un acier à 0.2 % de carbone.

3 : Acier hypereutectoïde.

4: Perlite en cours de globularisation dans un acier à 0,8% de carbone.

169



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

170

Ce demi-produit est un fer plat, de section rectangulaire dont une des extrémités est tranchée à chaud tandis que l'autre n'est pas mise en forme et forme un arrondi. Il s'agit donc probablement de l'extrémité d'un fer plat. Les traces du marteau sont visibles car la matière forme un épatement.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	5,1	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	6,23	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,11	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,1		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	115			
	Ecart type	17			

Observations microscopiques : Ce demi-produit est majoritairement ferritique. Seul 6% de sa surface est carburé. Il présente quelques zones d'acier dont la teneur en carbone dépasse rarement 0,5% de carbone. Ces zones aciérées se situent en périphérie de l'objet, ce qui pourrait laisser penser à une cémentation, mais peuvent aussi se rencontrer au cœur de l'objet. Il présente un pourcentage inclusionnaire plus élevé que les autres chutes de demi-produits. Les inclusions sont distribuées sur l'ensemble de la surface, et s'orientent de façon perpendiculaire au martelage.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées





Cartographie de dureté

1: De haut en bas : ferrite équiaxe, acier à 0,3-0,4% de carbone.

2: Ferrite équiaxe et lignes d'inclusions.

3 : Acier à 0,3-0,4% de carbone.

4 : Ferrite équiaxe.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



1: Acier à 0,2% de carbone vers ferrite.

2 : Acier à 0,2-0,3% de carbone.

3 : Acier à 0,2% de carbone environ.

4 : Ferrite légèrement écrouie.

13383-2



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 6015
- Secteur : Source, canal du XV^{ème} siècle
- Isolat : /
- Année de découverte : 2016
- Datation : XV^{ème} siècle
- Longueur : 50 mm
- **Largeur** : 60 mm
- Epaisseur : 10 mm
- Masse : 142 g

Cette chute de demi-produit se présente sous la forme d'une barre large de section rectangulaire. Les faces sont planes et martelées. Une extrémité est tranchée à chaud tandis que l'autre n'est pas mise en forme.

Observations microscopiques : *Nature et caractéristiques du métal*

Inclusions	%Inc	1,4	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	77	resultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Oui
	%C*	0,27-0,65		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,1-0,27		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	364			
	Ecart type	252			

Observations microscopiques : La section longitudinale et transversale sont toutes deux majoritairement aciérées. La section transversale l'est entièrement, tandis que la section longitudinale est ferritique au niveau de l'extrémité gauche (schéma ci-dessous). Toutes deux présentent des structures de trempe de type martensite, bainite et perlite nodulaire. Ces structures se situent en périphérie et au cœur de l'objet. Sur la section transversale, de la fonte est visible en périphérie. Sa présence est anecdotique, elle occupe moins d'un pourcent de la surface.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



1: Acier à 0,3% de carbone vers un acier eutectoïde.

2 : Martensite, bainite et perlite nodulaire sous forme de rosace.

3 : Martensite, bainite et ferrite aux joints de grains.

4 : Martensite, bainite et perlite nodulaire sous forme de rosace.







Micrographies



1: De la périphérie (gauche) au cœur de l'objet, acier à 0,2-0,3% de carbone structures de Widmanstätten, acier à 0,5-0,6% de carbone, structures de trempe (martensite, bainite).

2: Fonte en périphérie et acier hypereutectoïde.

3: Martensite, bainite et perlite nodulaire en rosace.

4 : Acier à 0,2-0,3% de carbone, structures de Widmanstätten.



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit est l'extrémité d'une barre. Elle a été séparée du reste de la barre par tranchage à chaud comme l'atteste la marque à l'extrémité gauche de la chute. L'autre extrémité n'est pas mise en forme, elle est arrondie, et aplatie ce qui génère un épatement de la matière. Des traces de martelage (au marteau hydraulique) sont visibles.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	2,2	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	24,9	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,23	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,24		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	126			
	Ecart type	42			

<u>Observations microscopiques</u>: Ce demi-produit est majoritairement ferritique. Sur la section longitudinale, sur une de faces, de la périphérie au cœur de l'objet, une gradation d'un acier eutectoïde à la ferrite est visible. Il pourrait s'agir d'une cémentation. Sur la section transversale, l'acier est distribué aléatoirement.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées





1 : Gradient de teneur en carbone



3 : Ferrite et perlite lamellaire.



2: Ferrite et bandes d'inclusions.



4: Acier eutectoïde.





179

prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit est l'extrémité d'une barre. Elle présente à l'une de ses extrémités une trace de tranchage à chaud, l'autre n'est pas mise en forme. Cette barre présente ses deux larges faces martelées et parallèles. Des traces de martelage, dûes au marteau hydraulique, sont visibles à la surface, matérialisées par des creux et des bosses. On note un évasement de la matière, là où se situe la zone de frappe. De fait, les côtés présentent un motif sinusoïdal.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	3,2	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	29,9	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,25	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,23		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	135			
	Ecart type	41			

Observations microscopiques : Cette chute de demi-produit est majoritairement ferritique. Une des extrémités de la section transversale est plus carburée. Les inclusions sont réparties sur toute la surface de façon uniforme



Mosaïque après attaque au réactif Nital



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



1 : Structure ferritique en périphérie. Au cœur, acier à l'eutectoïde.

>300

2 : Zone d'acier à 0,4-0,5% de carbone dans une zone d'acier à 0,2-0,3% de carbone.

3 : Acier à 0,1% de carbone.

4 : Ferrite équiaxe.
13383-9 **Informations générales :** Site : Castel-Minier ^{13383-9b} I ← • **US**: 6015 Secteur : Source, canal du XV^{ème} siècle Isolat : / 13383-9a Année de découverte : 2016 • Datation : XV^{ème} siècle • 5 cm 0 1 Crédits : J-C Méaudre Longueur : 80 mm • Largeur : 30 mm • Epaisseur : 8 mm • **Masse** : 126 g • Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit est une chute de demi-produit qui a été tranché à chaud à une de ses extrémités. Des traces de martelage sont visibles à la surface. Il est parfaitement conservé.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	0,7	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	68	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,49	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,3	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	206			
	Ecart type	73			

<u>Observations microscopiques</u> : La section longitudinale de ce demi-produit est entièrement aciérée. Un alignement des inclusions retranscrit potentiellement une ligne de soudure par corroyage du métal. La section transversale présente une partie aciérée (gauche sur le schéma) et ferritique (droite sur le schéma).



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



1: De haut en bas, décarburation périphérie de l'objet, acier eutectoïde puis acier à 0,3-0,4% de carbone.

2 : De haut en bas, acier à 0,5% de carbone et acier eutectoïde.

3 : Acier eutectoïde, décarburation d'un côté d'une ligne d'inclusions, acier à 0,5% de carbone environ.

4 : Grains de ferrite et perlite lamellaire.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



1: Acier eutectoïde

2 : Décarburation en périphérie de l'objet, acier eutectoïde.

3 : Variation des tailles de grains de ferrite.

4: Acier eutectoïde, perlite lamellaire.



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit est l'extrémité d'une barre plate de section rectangulaire. Les faces sont martelées et parallèles deux à deux. Une extrémité est tranchée, tandis que l'autre n'est pas mise en forme.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	1,0	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	82,7	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,63	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,25		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	214			
	Ecart type	63			

<u>Observations microscopiques</u>: Les sections longitudinale et transversale sont toutes deux majoritairement aciérées. Des bandes de carburation différentes, perpendiculaires à l'axe de martelage, se superposent. L'acier est souvent eutectoïde. De l'acier hypereutectoïde est visible sur la section transversale.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Micrographies



1 : Bande d'acier à 0,1-0,2% de carbone entourée d'acier eutectoïde.



3: Bande d'acier à 0,1-0,2% de carbone entouré d'acier eutectoïde.



5 mm

2 : Acier eutectoïde et acier à 0,2% de carbone, ligne d'inclusions



4 : Acier à 0,1% de carbone



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



1 : Acier à 0,2-0,3% de carbone entouré d'acier à l'eutectoïde



3: Acier hypereutectoïde



>300

2 : De l'acier eutectoïde à l'acier à 0,2-0,3% de carbone



4 : Acier à 0,3-0,4% de carbone



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit est relativement informe. Sa section est rectangulaire. Les deux grandes faces sont relativement planes et parallèles. Les bords sont irréguliers et semblent brisés.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	1,0	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	79,9	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,42-0,59	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,28-0,31	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	238			
	Ecart type	72			

<u>Observations microscopiques</u> : La section transversale de cette chute de demi-produit comporte une zone aciérée composée de perlite nodulaire et d'acier hypereutectoïde et une zone ferritique. La périphérie de l'objet se compose d'acier hypereutectoïde et eutectoïde, ce qui pourrait supposer qu'une cémentation a été réalisée.



Mosaïque après attaque au réactif Nital

 $5\,\mathrm{mm}$



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



1 : Acier à 0,2-0,3% de carbone vers acier eutectoïde, avec perlite

2: Acier à 0,2-0,3% de carbone vers acier eutectoïde, avec perlite Des d'acier hypereutectoïde sont visibles au cœur de la perlite

3 : Acier à 0,2-0,3% de

Acier hypereutectoïde

13383-20 **Informations générales :** Site : Castel-Minier • 13383-20b I 🗲 **US**: 6015 **Secteur** : Source, canal du XV^{ème} siècle Isolat : / Année de découverte : 2016 • Datation : XV^{ème} siècle • 13383-20a Longueur : 75 mm 0 1 5 cm Largeur : 42 mm • Crédits : J-C Méaudre Epaisseur : 4 mm **Masse** : 106 g

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit est un fer plat, de section rectangulaire dont une des extrémités est tranchée à chaud tandis que l'autre n'est pas mise en forme et forme un arrondi. Il s'agit donc probablement de l'extrémité d'un fer plat. Les traces du marteau sont visibles car la matière s'évase, à l'endroit de la frappe.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	2,2	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	39,2	résultantes des conditions	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,31	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,30	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	129			
	Ecart type	39			

<u>Observations microscopiques</u> : Cette chute de demi-produit est majoritairement ferritique. Toutefois, sur la section longitudinale comme sur la section transversale, la périphérie de l'objet est carburée. Les teneurs en carbone atteignent celles des aciers hypereutectoïdes. Des structures plus aciérées se retrouvent aussi à cœur de l'objet. En périphérie de la section longitudinale, se trouve une structure feuilletée d'acier eutectoïde et d'acier à 0,2-0,3% de carbone.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées





1 : Inclusions allongées dans le sens du martelage



3 : Zone d'acier hypereutectoïde entourée d'acier eutectoïde et de ferrite.



2 : Ferrite et alternance de bandes d'acier eutectoïde et d'acier à 0,2% de carbone



4 : Ferrite équiaxe





Inclusions					
% Inc	2,2				
Carburation					
%C*	0,35				
%C > 0,3	37,5				
Ecart type	0,42				

191

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



1 : Acier hypereutectoïde en périphérie, ferrite à cœur



3 : Acier hypereutectoïde, aiguilles de cémentite



2: Zone d'acier à 0,4-0,5% de carbone dans une zone aciérée à 0,1% de carbone.



4: Structures de Widmanstätten

13383-21



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 6015
- Secteur : Source, canal du XV^{ème} siècle
- Isolat : /
- Année de découverte : 2016
- Datation : XV^{ème} siècle
- Longueur : 70 mm
- Largeur : 30 mm
- Epaisseur : 7 mm
- Masse : 102 g

Cette chute de demi-produit est de section rectangulaire. Les deux faces les plus larges ont été martelées. Elles sont planes et parallèles. Les extrémités sont irrégulières. Elles semblent avoir été cassées.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	1,7	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3 51,7 résultantes des conditions	Martensite/Bainite	Oui		
Carburation	%C*	0,27-0,51	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,18-0,35		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	289			
	Ecart type	218			

Observations microscopiques : La section longitudinale de cette chute de demi-produit se compose majoritairement de ferrite contrairement à la section transversale qui est à dominance aciérée. Pour les deux sections, lorsque l'acier est observé, il se présente sous la forme de structures de trempe, martensitique, bainitique ou sous forme de perlite nodulaire. Ces structures sont présentes aussi bien en périphérie qu'au cœur de l'objet. Des structures d'acier hypereutectoïde sont observées en périphérie de l'objet.





3 : Structure de Widmanstätten, acier à 0,5% de carbone environ.

martelage.

200 µm

20 µm

4 : Vue de détail, perlite





Microdureté				
Moyenne	426			
Ecart type	273			

Cartographie de dureté





1: Structure de trempe, martensite, bainite, perlite nodulaire. Au centre, la teneur en carbone est inférieure à 0,3%, l'acier n'est pas « trempable ».

2 : Acier avec structures de Widmanstätten, et ferrite (partie inférieure)

3 : Martensite et bainite, ferrite aciculaire aux joints de grains

4: Fonte

13383-22



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit est une portion de barre plate de section rectangulaire. Les deux extrémités sont cassées. Les deux grandes faces sont planes et parallèles. On remarque que les bords présentent un motif sinusoïdal, témoignant un passage sous marteau hydraulique.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	1,1	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	80,8	résultantes des conditions	Martensite/Bainite	Oui
Carburation	%C*	0,43-0,75	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,28-0,30		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	289			
	Ecart type	218			

<u>Observations microscopiques</u> : Cette chute de demi-produit est majoritairement aciérée. Des aiguilles de cémentite, caractéristiques des aciers hypereutectoïdes et de la fonte ont été observées. L'acier est trempé et se présente sous la forme de martensite, de bainite ou de perlite nodulaire, ce qui explique les duretés élevées.

Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 6015
- Secteur : Source, canal du XV^{ème} siècle
- Isolat : /
- Année de découverte : 2016
- **Datation** : XV^{ème} siècle
- Longueur : 45 mm
- Largeur : 28 mm
- Epaisseur : 7 mm
- Masse : 63 g



Cartographie de dureté



1: Martensite, bainite et perlite nodulaire. Dans la partie inférieure, l'acier de teneur en carbone inférieur à 0,3% n'est pas « trempable ».

2 : Acier à 0,5-0,6% de carbone (partie supérieure) et acier à 0,2-0,3% de carbone (partie inférieure), structures de Widmanstätten.

3 : Acier à 0,2-0,3% de carbone, structure de Widmanstätten

4: Acier hypereutectoïde, aiguilles de cémentite dans matrice perlitique.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées





Cartographie de dureté

50 µm

Microdureté				
Moyenne	490			
Ecart type	300			

Micrographies

Image: Displaying the second s



20 µm

1: De l'extrémité au cœur de l'objet : fonte, acier hypereutectoïde, martensite, acier à 0,2-0,3% de carbone.

2: En haut à gauche, martensite et perlite nodulaire, en bas à droite, acier dont la teneur est inférieure à 0,3% de carbone, non trempée.

3 : De gauche à droite, acier à 0,2% de carbone environ et structure martensitique.

4: Vue de détail, aiguille de martensite, perlite nodulaire.



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zon prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit se présente sous la forme d'un fer plat de section rectangulaire. Les deux faces les plus larges ont été martelées. L'une est légèrement bombée tandis que l'autre est plane. Les bords sont réguliers, contrairement aux extrémités qui semblent cassées.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	1,8	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	48,8	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,59	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,57	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	196			
	Ecart type	62			

Observations microscopiques : La section longitudinale de cette chute de demi-produit est composée d'un acier à 0,1-0,3% de carbone. Une carburation périphérique de l'objet est observée. Des aciers hypereutectoïdes et de la fonte sont présents.



% C

Alternance de bandes ferritiques ou carburées (%C < 0,3), et de bandes d'acier hypereutectoïde entourées par des aciers

2: De haut en bas, du cœur vers la périphérie, acier à 0,2% de carbone, acier eutectoïde, acier hypereutectoïde, et

3 : Ferrite ou acier à 0,1% de carbone.

Acier hypereutectoïde.



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit se présente sous la forme d'une barre large et peu épaisse de section rectangulaire. Les surfaces ne sont pas tout à fait planes, on note des creux et des bosses reflétant le passage sous marteau hydraulique. Les bords sont réguliers. Une extrémité est cassée.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	2,5	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	8,84	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,11	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,14	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	118			
	Ecart type	23			

Observations microscopiques : Cette chute de demi-produit est majoritairement ferritique. Une bande d'acier traverse la section longitudinale et la section transversale. Elles sont orientées dans le sens du martelage.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



1: De la périphérie au cœur : acier à 0,2-0,3% de carbone, acier à 0,6-0,7% de carbone et ferrite équiaxe.

2: Perlite lamellaire et ferrite aux joints de grains.

3: De haut en bas, acier à 0,4-0,5% de carbone et ferrite.

4: Ferrite équiaxe et inclusions allongées dans le sens du martelage.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



```
1 : Ferrite, acier à 0,1% de carbone.
```

2: De haut en bas, ferrite et acier à 0,5-0,6% de carbone.

3 : Ferrite équiaxe

4 : Ferrite aciculaire et perlite lamellaire.



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit se présente sous la forme d'une barre d'épaisseur constante. La barre semble légèrement repliée à une extrémité. Elle présente un état de corrosion avancé ce qui rend complexe la lecture de ses surfaces.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	10	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation Microdureté	%C > 0,3	6,43	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,1		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,14		Ecrouissage	Non
	Microdureté moyenne (HV)	/			
	Ecart type	/			

<u>**Observations microscopiques</u></u> : Cette chute de barre se compose majoritairement de ferrite dont les grains sont équiaxes et est très riche en inclusions par rapport aux autres demi-produits du corpus. Néanmoins, comme observé sur la section longitudinale et transversale, une zone carburée dont la teneur en carbone peut atteindre 0,8\%_{mass} longe une des bords de la barre. Ceci reflète une carburation périphérique, qui pourrait être inhérente à une cémentation, ou dû à l'hétérogénéité de la masse brute initiale à partir de laquelle le demi-produit a été formé.</u>**



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



1: Ferrite et inclusions de scories



3 : Ferrite et inclusions de scories



2: Carburation périphérique de la barre



4 : Zone d'acier à 0,7% de carbone environ au cœur d'une zone ferritique



: De la périphérie vers le cœur, acier à 0,2% de carbone environ, acier eutectoïde et ferrite

4 : Acier à 0,7% de carbone environ et zone ferritique suite à une décarburation périphérique

13570/3



Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 6058
- Secteur : Source, soufflerie
- Isolat :
- Année de découverte : 2017
- **Datation** : XV^{ème} siècle
- Longueur : 120 mm
- Largeur : 35 mm
- Epaisseur : 5 mm
- Masse : 171 g

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit se présente sous la forme d'un fer plat tranché aux deux extrémités. Un évasement de la matière est visible sur les faces les plus larges, conséquence du martelage au marteau hydraulique.

Observations microscopiques : *Nature et caractéristiques du métal*

Inclusions	%Inc	1,0	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	37	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,23	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,18	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	125			
	Ecart type	22			

<u>Observations microscopiques</u> : Ce demi-produit présente une hétérogénéité de composition. Sa section longitudinale montre deux natures de métal se faisant face : l'une est ferritique, l'autre est un acier à 0,4% environ. Les structures de Widmanstätten témoignent d'un refroidissement hors des conditions de l'équilibre thermodynamique.





Cartographie de dureté



1: Ferrite équiaxe, légère carburation périphérique.

2 : Ferrite aciculaire et perlite lamellaire.

3 : Acier à 0,5-0,6% de carbone, légère décarburation en périphérie de l'objet.

4 : Ferrite équiaxe





5 mm

5

Cartographie de dureté

Micrographies

208



- **1**: Du haut en bas, ferrite, acier à 0,2-0,3% de carbone, et acier à 0,5-0,6% de carbone.
- 2 : Ferrite équiaxe

3 : Ferrite aciculaire et perlite lamellaire.

4 : Ferrite équiaxe.



209

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit se présente sous la forme d'une tige de section proche du rectangle mais dont un angle est cassé. Les deux extrémités semblent avoir été brisées. Les faces sont martelées mais irrégulières.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	3,3	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	% Surface carburée	0	résultantes des conditions	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,07	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,03	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	145			
	Ecart type	20			

<u>Observations microscopiques</u>: La section longitudinale et transversale étudiées sont toutes deux majoritairement composées de ferrite. Quelques zones d'acier dont la teneur en carbone est inférieure à 0,2% de carbone sont parfois observées en périphérie des échantillons. Des fissures intergranulaires sont à noter également.













1: Ferrite et zone aciérée à 0,2% de carbone environ en périphérie de l'échantillon

Ecart type

0,03

2 : Ferrite et zone aciérée à 0,2% de carbone environ en périphérie de l'échantillon

3: Grains de ferrite équiaxe

4: Grains de ferrite équiaxe

5 mm



Mosaïque après attaque au réactif Nital

5 mm



Cartographie de dureté

Micrographies





1: Grains de ferrite équiaxe

2 : Grains de ferrite équiaxe

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées

 $5 \,\mathrm{mm}$



Inclusio	ns		
% Inc	3,42		
Carburation			
%C*	0,06		
Surface	0		
carburée	0		
Ecart type	0,03		
Microdureté			
Moyenne	146		
Ecart type	21		



prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit se présente sous la forme d'une barre de section rectangulaire et d'épaisseur constante. Les quatre faces sont martelées. Les extrémités ne présentent pas de trace de tranchage à chaud évidente.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	0,6	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	86	résultantes des	Martensite/Bainite	Oui
Carburation	%C*	0,27-0,7	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Oui
Ecart type	Ecart type	0,1-0,23	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	/			
	Ecart type	/			

Observations microscopiques : La section longitudinale et transversale de ce demi-produit montre qu'il a été trempé. Des structures de type martensite, bainite et perlite nodulaire sont visibles là où la teneur en carbone était supérieure à 0,3%. Elles se situent principalement en périphérie de l'objet. Le cœur est composé majoritairement de ferrite, ne prenant donc pas la trempe.



	Inclusio	IIIS .
	% Inc	3,42
	Carbura	tion
Mosaïque après attaque au réactif Nital	0/ C*	0,3-
	70C ·	0,74
	%C > 0,3	91,9
	Ecart type	0,1-0,3

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées







1: Bainite, martensite et perlite nodulaire (trempe)



3 : Zone trempée décarburée autour des inclusions (soudure)



2: Bainite, martensite et perlite nodulaire (trempe)



4 :Ferrite





1: Bainite, martensite et perlite nodulaire (trempe)



3: A gauche, partie trempée, à cœur ferrite



2: Bainite, martensite et perlite nodulaire (trempe)



4 :Ferrite

13382-1



Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 6015
- Secteur : Source, canal du XV^{ème} siècle
- Isolat :
- Année de découverte : 2016
- Datation : XV^{ème} siècle
- **Longueur** : 22,6 mm
- **Diamètre** : 13,3 mm
- Masse : 22,1 g
- Forme de la tête : circulaire

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit est une chute de barre ronde de 13 mm de diamètre. Elle présente une tête circulaire écrasée par martelage et un corps cylindrique dont l'extrémité est tranchée à chaud.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	2,3		Forme de la perlite	Lamellaire		
	%C > 0,3	14	Caractéristiques résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Caractéristiques	Caractéristiques	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,17		Structures de Widmanstätten	Oui		
	Ecart type	0,12		Ecrouissage	Dans la tête et dans la zone de tranche		
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	150					
	Ecart type	36					

<u>**Observations microscopiques**</u>: Cette chute de fer ronde est majoritairement ferritique ou composée d'acier peu carburés. (%C < 0,3). Les deux sections comportent 14% d'acier à plus de 0,3% de carbone. La perlite est globulaire ce qui témoigne d'une surchauffe et d'un refroidissement à vitesse modérée. Les inclusions sont déformées dans le sens du martelage.



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Cartographie correspondante indiquant la répartition

278-300

234-256



Inclusions			
% Inc 2,4			
Carburation			
%C*	0,15		
%C > 0,3	7,5		
Ecart type	0,1		

Microdureté		
Moyenne	148	
Ecart type	41	

Cartographie de dureté

Micrographies

5 000



1: Ligne d'inclusions dans le sens du martelage



3: Ligne d'inclusions dans le sens du martelage et ferrite



2: De la ferrite vers l'acier à 0,5% de carbone environ



4 : Acier à 0,2% de carbone environ – Perlite globulaire




Cartographie de dureté

Micrographies



1 : Inclusions dans matrice métallique



3: Ferrite



2 :De la ferrite à l'acier

Carburation

Microdureté

0,2

21

0,13

153

28

%C*

%C > 0,3

Ecart type

Moyenne

Ecart type



4: Acier à 0,2% de carbone environ – Perlite globulaire



Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 6015
- Secteur : Source, canal du XV^{ème} siècle
- Isolat :
- Année de découverte : 2016
- **Datation** : XV^{ème} siècle
- **Longueur** : 23,3 mm
- **Diamètre** : 16,1 mm
- Masse : 45,4 g
- Forme de la tête : circulaire

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit est une chute de barre ronde. Elle présente une tête circulaire écrasée par martelage et un corps cylindrique dont l'extrémité est tranchée à chaud.

Observations microscopiques : *Nature et caractéristiques du métal*

Inclusions	%Inc	1,1		Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	26	Caractéristiques	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,22	résultantes des conditions	Structures de Widmanstätten	Oui
Carburation	Ecart type	0,18	thermiques et mécaniques de travail	Ecrouissage	Dans la tête et dans la zone de tranche
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	129			
	Ecart type	30			

Observations microscopiques : Cette chute de demi-produit est hétérogène. La section longitudinale présente une succession de bandes aciérées de carburation diverse et de bandes ferritiques, orientées dans la longueur de l'objet. Des lignes de soudures, potentiellement des soudures de repli, joignent les différentes bandes. Les grains de ferrite sont équiaxes sauf dans la tête où ils sont déformés par le martelage. Pour la section transversale, les bandes de carburation variables suivent le sens du mouvement circulaire induit par l'objet.



Mosaïque après attaque au réactif Nital





1 : De la ferrite à l'acier à 0,5% environ



3 : Acier à 0,5-0,6% de carbone



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Inclusio	Inclusions					
% Inc 0,98						
Carburat	tion					
%C*	0,23					
%C > 0,3	23,6					
Ecart type	0,15					

Microdureté				
Moyenne	126			
Ecart type	26			



2 : Mouvement des inclusions dans la tête



4 : Soudure entre une bande ferritique et une bande d'acier à 0,1% de carbone environ

Perlite



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Cartographie correspondante indiquant la répartition



Cartographie de dureté

Micrographies

1 : Inclusions de scories dans la matrice métallique



3 : Acier à 0,3-0,4% de carbone



36

2: Légère carburation périphérique

Ecart type



4: Acier eutectoïde au coeur



Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 6015
- Secteur : Source, canal du XV^{ème} siècle
- Isolat :
- Année de découverte : 2016
- **Datation** : XV^{ème} siècle
- **Longueur** : 30,4 mm
- **Diamètre**: 18,7 mm
- Masse : 97,8 g
- Forme de la tête : carrée

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit est une chute de barre ronde. Elle présente une tête carrée écrasée par martelage, qui semble avoir été rajoutée au corps par soudure. Le corps est cylindrique et l'extrémité est tranchée à chaud.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	1,5		Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	55	Caractéristiques	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,35	résultantes des conditions	Structures de Widmanstätten	Oui
Carburation	Ecart type	0,21	thermiques et mécaniques de travail	Ecrouissage	Dans la tête et dans la zone de tranche
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	136			
	Ecart type	35			

Observations microscopiques : Comme pour la chute de fer rond CL13382-2, la section longitudinale présente une alternance de bandes ferritiques et de bandes carburées. Les inclusions suivent le sens des bandes de carburation variée, et s'alignent dans le sens induit par le martelage. Pour la section transversale, les bandes de ferrite et d'acier s'organisent en spirale autour d'un cœur composé d'une inclusion centrale.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées

Mosaïque après attaque au réactif Nital



Micrographies



1: Orientation en spirale des inclusions



3 : Décarburation périphérique : de la ferrite à l'acier à 0,6% de carbone environ



2 : Soudure entre ferrite et acier à 0,1% de carbone



4 : Perlite lamellaire et grains de ferrite.



3: Soudure

: Soudure entre ferrite et acier à 0,1% de carbone



Crédits : J-C Méaudre Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 6015
- Secteur : Source, canal du XV^{ème} siècle
- Isolat :
- Année de découverte : 2016
- **Datation** : XV^{ème} siècle
- **Longueur** : 34,7 mm
- **Diamètre** : 22,2 mm
- Masse : 92 g
- Forme de la tête : circulaire

Cette chute de demi-produit est une chute de barre ronde. Elle présente une tête circulaire écrasée par martelage et un corps cylindrique dont l'extrémité est tranchée à chaud.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	2,9		Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	42,6	Caractéristiques	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,31	résultantes des conditions	Structures de Widmanstätten	Oui
Carburation	Ecart type	0,21	thermiques et mécaniques de travail	Ecrouissage	Dans la tête et dans la zone de tranche
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	125			
	Ecart type	40			

<u>Observations microscopiques</u> : La section longitudinale de cette chute présente deux grandes lignes de soudures mal refermées autour de laquelle s'organise un alignement de bandes de ferrite et d'acier de carburation diverse. Dans la section transversale, ces bandes s'organisent en spirale autour d'une inclusion centrale. Les grains sont écrouis dans la tête et au niveau de la zone tranchée à chaud.



3 : Zone tranchée à chaud, aciérée

4 : De la ferrite à l'acier à 0,4% de carbone environ



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées





Inclusions					
% Inc	1,5				
Carburat	ion				
%C*	0,34				
%C > 0,3	50,4				
Ecart type	0,22				

Microdureté			
Moyenne	141		
Ecart type	43		

Cartographie de dureté

Micrographies



1 : Acier eutectoïde et ferrite



3 : De l'acier à la ferrite



2 : Corrosion dans une soudure ouverte



4 : Acier à 0,1% de carbone environ



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit est une chute de barre ronde. Elle présente une tête carrée écrasée par martelage et un corps cylindrique dont l'extrémité est tranchée à chaud.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	2		Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	43,5	Caractéristiques	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,31	résultantes des conditions	Structures de Widmanstätten	Oui
Carburation	Ecart type	0,21	thermiques et mécaniques de travail	Ecrouissage	Dans la tête et dans la zone de tranche
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	125			
	Ecart type	32			

Observations microscopiques : Cette chute de demi-produit est hétérogène en termes de teneur en carbone. Comme le montre l'étude de la section longitudinale et transversale, elle se compose de bandes ferritiques et aciérées, allongées dans la longueur pour la section longitudinale et orientées en spirale pour la section transversale.



4 : Zone aciérée avec grains de perlite de taille diverse



3 : Acier à 0,4% de carbone environ

: Acier à 0,5% de carbone et acier à 0,2% de carbone



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit est une chute de barre ronde. Elle présente une tête ovale écrasée par martelage et un corps cylindrique dont l'extrémité est tranchée à chaud.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	2,2		Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	21,4	Caractéristiques	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,2	résultantes des conditions	Structures de Widmanstätten	Oui
Carburation	Ecart type	0,18	thermiques et mécaniques de travail	Ecrouissage	Dans la tête et dans la zone de tranche
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	118			
	Ecart type	24			

Observations microscopiques : Cette chute de barre de fer ronde est majoritairement ferritique ou peu carburé. 21% des deux sections étudiées sont composés d'acier à plus de 0,3% de carbone. La section longitudinale présente une alternance de bandes ferritiques et de bandes carburées organisées autour d'une ligne de soudure au centre de la section. Elle correspond à un repli de la matière sur elle-même. Cet enroulement de la matière est aussi visible dans la section transversale où les bandes d'acier et de fer s'enroulent autour d'une soudure centrale.



Smin

Cartographie de dureté

Micrographies



1: Ligne d'inclusions dans le sens du martelage



3 : Ligne d'inclusions dans le sens du martelage, et bandes de ferrite et d'acier



Microdureté

Ecart type

Moyenne



0,15

117

2 : Inclusions et corrosion au cœur de la matrice



4: De la ferrite à l'acier



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées

5,7

26

27

>300





1: Zone d'acier à 0,4% de carbone environ



3 : Ligne de soudure corrodée



2 : Acier à 0,2% de carbone environ



4: Acier à 0,7% de carbone environ



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit est une chute de barre ronde. Elle présente une tête circulaire écrasée par martelage et un corps cylindrique dont l'extrémité est tranchée à chaud.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	3,5		Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	25	Caractéristiques	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,23	résultantes des conditions	Structures de Widmanstätten	Oui
Carburation	Ecart type	0,18	thermiques et mécaniques de travail	Ecrouissage	Dans la tête et dans la zone de tranche
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	122			
	Ecart type	27			

Observations microscopiques : La section longitudinale de cette chute de fer rond se divise en deux parties. La première est composé d'aciers peu carburés, autour de 0,1% de carbone et de quelques zones pour lesquelles la teneur en carbone est élevée et peut atteindre l'eutectoïde. La seconde partie, plus riche en inclusions, se compose uniquement de ferrite. La section transversale présente la même dualité.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées

3,99

0,18

16,4

0,15



Microdu	reté
Moyenne	118
Ecart type	23

Ecart type



Cartographie de dureté

5 mm

1 : Alignement d'inclusions dans la matrice métallique



3 : Variation de la taille des grains de ferrite



2: Acier à 0,1% de carbone et ferrite



4: Acier à 0,4-0,5% de carbone et acier à 0,2% de carbone



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées





% Inc	2,0
Carbura	tion
%C*	0,2
%C > 0,3	31,5
Ecart type	0,16
Ecart type	0,16

Microdureté					
Moyenne	114				
Ecart type	16				

Cartographie de dureté

Micrographies



1: Inclusions dans une zone ferritique



3 : Acier à 0,4% de carbone environ



2 : Grains de ferrite équiaxes



4: Acier à 0,1-0,2% de carbone environ



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit est une chute de barre ronde. Elle présente une tête circulaire écrasée par martelage et un corps cylindrique dont l'extrémité est tranchée à chaud.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	3,5		Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	8	Caractéristiques résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,14		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,14		Ecrouissage	Dans la tête et dans la zone de tranche
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	121			
	Ecart type	28			

<u>Observations microscopiques</u> : La section longitudinale de cette chute de fer ronde se compose de deux parties différentes en termes de teneur en carbone. L'une est composée d'acier peu carburé (majoritairement inférieur à 0,3% de carbone) tandis que l'autre est ferritique. La section est traversée dans sa longueur par deux lignes de soudures. La section transversale présente un profil identique.



: Zone plus aciérée autour de 0,4% de carbone au sein d'une zone à 0,2% de carbone



Mosaïque après attaque au réactif Nital



Cartographie de dureté

Micrographies



1 : Décarburation périphérique



3 : Grains de ferrite



répartition des différentes zones carburées

>300

150-212 254-250 2	
Inclusio	ns
% Inc	4,5
Carburat	tion
%C*	0,18
%C > 0,3	15,7
Ecart type	0,19

Microdureté				
Moyenne	128			
Ecart type	38			



2: Zone d'acier à 0,3-0,4% de carbone dans une zone d'acier à 0,2% de carbone environ



4: Acier eutectoïde et zone ferritique



Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 6015
- Secteur : Source, canal du XV^{ème} siècle
- Isolat :
- Année de découverte : 2016
- **Datation** : XV^{ème} siècle
- **Longueur** : 35,5 mm
- **Diamètre** : 20,2 mm
- Masse : 77 g
- Forme de la tête : Circulaire

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit est une chute de barre ronde. Elle présente une tête circulaire écrasée par martelage et un corps cylindrique dont l'extrémité est tranchée à chaud.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	1,6		Forme de la perlite	Lamellaire	
	%C > 0,3	30	Caractéristiques résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non	
Carburation	%C*	0,27		resultantes des conditions	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,15		Ecrouissage	Dans la tête et dans la zone de tranche	
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	141				
	Ecart type	25				

Observations microscopiques : La section longitudinale comme la section transversale se composent toutes deux d'acier dont la teneur en carbone est proche de 0,2% de carbone. Quelques bandes d'acier plus carburés traversent les sections.



3 : Ecrouissage de la matière dans la tête

4: Acier à 0,3% de carbone environ



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Cartographie correspondante indiquant la répartition

Microdureté

Moyenne

Ecart type

>300

2,43

0,36 59 0,2

159 36

Analyse de microdureté	HV	80-102	124-146 -124 14	168-190 6-168 190	212-234	256-278	>300
					Ι	nclusi	ons
					%]	[nc	2
	5	_					
in the	5 11111				Ca	arbura	tion
					%(C*	0
	-12				%C :	> 0,3	4
					Ecart	type	(

Cartographie de dureté

Micrographies



1: Soudure correspondant à un repli



3: Cœur d'acier peu carburé et carburation périphérique



2: Acier à 0,2% de carbone environ



4: Acier eutectoïde



Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 6015
- Secteur : Source, canal du XV^{ème} siècle
- Isolat :
- Année de découverte : 2016
- **Datation** : XV^{ème} siècle
- Longueur : 31 mm
- Largeur : 14 mm
- Masse : 22 g
- Forme de la tête : Absente

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit est une chute de barre ronde. Si l'extrémité du corps est tranchée à chaud, cette barre se distingue des autres chutes de ce type par l'absence de la tête.

Observations microscopiques : *Nature et caractéristiques du métal*

Inclusions	%Inc	2,0		Forme de la perlite	Lamellaire	
	%C > 0,3	88,5	Caractéristiques résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non	
Carburation	%C*	0,5		résultantes des conditions	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,16		Ecrouissage	Dans la tête et dans la zone de tranche	
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	172				
	Ecart type	36				

<u>Observations microscopiques</u> : La section transversale de cette chute de barre ronde montre clairement que la barre a été formé par repli d'une barre sur elle-même. Les inclusions comme les bandes d'acier suivent ce mouvement circulaire autour d'une soudure non refermée. Cette soudure est également visible dans la section longitudinale, majoritairement aciérée.





Cartographie de dureté

Micrographies



1 : Décarburation autour d'une ligne de soudure



3: Acier à 0,5% de carbone environ



Carburation

Microdureté

0,49

93,6

0,12

176

32

%C*

%C > 0,3

Ecart type

Moyenne

Ecart type

2: Acier à 0,7% de carbone environ



4: Acier à 0,3% de carbone environ



10 µm

3 : Ferrite et perlite lamellaire



4 : Organisation des bandes ferritiques et aciérés suivant le mouvement imposé par le repli



Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 6015
- Secteur : Source, canal du XV^{ème} siècle
- Isolat :
- Année de découverte : 2016
- **Datation** : XV^{ème} siècle
- Longueur : 35 mm
- Diamètre : 17 mm
- Masse : 45 g
- Forme de la tête : Absente

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit est une chute de barre ronde. Si l'extrémité du corps est tranchée à chaud, cette barre se distingue des autres chutes de ce type par l'absence de la tête.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	3		Forme de la perlite	Lamellaire	
	%C > 0,3	64	Caractéristiques résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non	
Carburation	%C*	0,51		resultantes des conditions	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,38		Ecrouissage	Dans la tête et dans la zone de tranche	
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	154				
	Ecart type	33				

Observations microscopiques : Sur cette barre, seule la section transversale a été étudiée. Elle se compose d'une bande d'acier hypereutectoïde traversant la section en son centre. Le reste de la section est peu carburé.





3: Bande d'acier hypereutectoïde

4 : Différentes structures plus ou moins aciérées autour de la zone de repli

200 µm



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit est une chute de barre ronde. Elle présente une tête ovale écrasée par martelage et un corps cylindrique dont l'extrémité est tranchée à chaud.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	1,6		Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	42,8	Caractéristiques	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,31	résultantes des conditions	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,21	thermiques et mécaniques de travail	Ecrouissage	Dans la tête et dans la zone de tranche
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	125			
	Ecart type	30			

Observations microscopiques : Cette chute de demi-produit se compose de zones aciérées peu carburées et de zones ferritiques Les bandes de carburation diverse suivent l'allongement de la matière par martelage. Les grains de ferrite, de taille très variable, sont équiaxes, sauf dans la tête et au niveau de la zone tranchée.





3: Grains de ferrite de taille variable

4: Grains de ferrite équiaxe

100 µm





3 : Acier à 0,2-0,4% de carbone

4: Acier à 0,7% de carbone environ

249



Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 6069
- Secteur : Source
- Isolat : /
- Année de découverte : 2017
- **Datation** : XV^{ème} siècle
- **Longueur** : 150 mm
- Largeur : 140 mm
- Epaisseur : 45 mm
- Masse : 2475 g

Observations macroscopiques :

prélevées

CL13625-1 est un fragment de masse brute en cours de compactage. Elle est de forme globalement circulaire avec une encoche et des excroissances. Des porosités sont visibles à la surface. L'une des deux plus grandes faces est plane, l'autre est bombée. A l'exception d'une des plus petites faces qui est plane, les autres sont irrégulières. Des traces de martelage sont visibles, témoignant d'un début de martelage qui a été abandonné.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	25	Caractéristiques résultantes des conditions	Forme de la perlite	Lamellaire
~	%C > 0,3	98		Martensite/Bainite	Non mais perlite nodulaire
Carburation %C* Ecart type	>0,9	mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Oui	
	Ecart type	0,1	ıravan	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	/			
	Ecart type	/			

Observations microscopiques : La section longitudinale de cette masse en cours de compactage présente de nombreuses inclusions, porosités et charbons de bois emprisonnés dans la matrice métallique. Cette dernière est majoritairement carburée et se compose d'acier eutectoïde pour lequel la perlite est lamellaire et d'acier hypereutectoïde présentant des aiguilles et des plaquettes de cémentite. Des zones de fonte blanche sont également visibles sur la partie gauche de la section. La ferrite ne représente que 2% de la section. Une légère décarburation est visible autour des porosités.



1: Acier eutectoïde et hypereutectoïde décarburation

2 : Zone ferritique très riche en inclusions et hypereutectoïde (partie inférieure).

3: Acier eutectoïde et

Aiguilles de cémentite dans matrice



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

La pointerolle 11085-1 est entière. L'œil est situé au centre de la pointerolle, la pointe est aiguisée et la tête est peu écrasée. Tout comme la pointerolle 12485, on peut penser que cette pointerolle est neuve ou bien qu'elle vient d'être réparée

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	6,2		Nature de la pointe	En partie corrodée
Come	Nature du corps	a corps Perlite localement trempée		Gamme de dureté relevée	170-900
Gamme de dureté relevée (HV)	150-500		Particularité notable	Soudure en bout	

Observations microscopiques : Cette pointerolle est entièrement aciérée. Le corps est composé de trois parties séparées par des lignes de soudures. Une des parties est composée d'un acier à 0,3%- 0,4% de carbone. Les deux autres parties sont présentent des structures de trempe. De la martensite, de la bainite et de la perlite nodulaire sont visibles, au cœur comme en périphérie de l'objet. Au fur et à mesure que l'on s'approche de la pointe, la teneur en carbone augmente et l'acier est entièrement trempée. La nature de la pointe ne peut être définie, cette dernière est entièrement corrodée.


Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées

1 cm



1 : Acier à 0,2-0,3% de carbone. Une ligne de soudure est visible.

2: Décarburation en périphérie de l'objet, structure de martensite, bainite et perlite nodulaire.

3 : Martensite, bainite et rosace de perlite nodulaire.

4: Aiguille de martensite et de bainite.

Definition of the formation of the form

Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- US: 2519
- Secteur : Fonderie bas
- Isolat : /
- Année de découverte : 2015
- **Datation** : XIV^{ème} siècle
- **Longueur** : 101 mm
- Largeur : 24 mm
- Epaisseur : 24 mm
- Masse : 216 g
- **O(R)** : 0,49

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

La pointerolle est entière. L'œil est situé au centre de la pointerolle, la pointe est aiguisée et la tête est peu écrasée. On peut penser que cette pointerolle est neuve ou bien qu'elle vient d'être réparée.

Observations microscopiques : *Nature et caractéristiques du métal*

Inclusions	%Inc	2,4		Nature de la pointe	Acier trempé
Corps	Nature du corps	Ferrite et perlite (majoritairement) localement trempé	Pointe	Gamme de dureté relevée	100-1000
	Gamme de dureté relevée (HV)	120-400		Particularité notable	Soudure en bout

<u>Observations microscopiques</u> : La pointerolle 12485 se compose d'un corps composé de ferrite et d'acier et d'une pointe composée d'acier trempé. Des structures de type martensite, bainite et perlite nodulaire sont aussi visibles dans le corps. La pointe a probablement été ajoutée au corps par soudure en bout.



Mosaïque après attaque au réactif Nital



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté

Micrographies



1: Acier trempé vers acier de teneur en carbone inférieure à 0,3%.



<u>200 μ</u>

2 : Acier à 0,4% de carbone environ, des structures de trempe sont visibles



4 : Martensite, bainite dans la pointe

12830



Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 2405
- Secteur : Fonderie bas
- Isolat :
- Année de découverte : 2015
- **Datation** : XIV^{ème} siècle
- Longueur : 78 mm
- Largeur : 23,5 mm
- Epaisseur : 20 mm
- Masse : 160 g
- **O(R)**:/

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

La pointe de cette pointerolle est manquante. Cette pointerolle s'est donc brisée lors de sa dernière utilisation et n'a pas été réparée.

Observations microscopiques : *Nature et caractéristiques du métal*

Inclusions	%Inc	2,1		Nature de la pointe	Manquante
~	Nature du corps	Ferrite et perlite	Pointe	Gamme de dureté relevée	
Corps	Gamme de dureté relevée (HV)	100-200		Particularité notable	

Observations microscopiques : Le corps de cette pointerolle est composé d'un acier dont la teneur en carbone dépasse très rarement 0,3% de carbone. La tête présente des traces d'écrouissage, là où la matière a été martelée. Dans cette zone, la dureté est par conséquent plus forte que celle attendue.





1: Acier aux grains écrouis, par martelage dans la tête.

2 : Acier de teneur en carbone inférieure à 0,1%.

3 : Acier à 0,2-0,3% de carbone.

4 : Acier à 0,2-0,3% de carbone.

13069 **Informations générales :** Site : Castel-Minier • **US**: 2397 13069a **Secteur** : Fonderie bas Isolat : 44360 • Année de découverte : 2016 • **Datation** : XIV^{ème} siècle • Longueur : 113 mm ٠ Crédits : J-C Méaudre Largeur : 27 mm • 0 5 cm • Epaisseur : 25 mm **Masse** : 280 g •

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

La pointerolle est entière. La tête de la pointerolle est très peu écrasée.

O(R) : 0,42

•

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	3,4		Nature de la pointe	Hétérogène, non entièrement trempé
Corps	Nature du corps	Ferrite et perlite (majoritaire) localement trempé	Pointe	Gamme de dureté relevée	80-650
	Gamme de dureté relevée (HV)	80-300		Particularité notable	

<u>Observations microscopiques</u> : Cette pointerolle est hétérogène. Elle se compose de bandes ferritiques et de bandes aciérées orientées dans le sens de la longueur de la tête à la pointe de la pointerolle. Dans le corps comme dans la pointe, l'acier est trempé. Des structures de martensite, de bainite et de perlite nodulaire sont visibles. Ceci peut expliquer les duretés importantes observées, pouvant atteindre 500 HV. La pointe ne semble pas avoir été rapportée au corps. Cette pointe est différente des autres pointes observées dans ce corpus, car elle n'est pas entièrement aciérée.



Cartographie de dureté



1 : Ferrite équiaxe

2: Possible martensite revenue

3 : Acier eutectoïde, au cœur, une zone d'acier à très petits grains, à 0,5% de carbone environ.

4 : Structures de trempe : martensite, bainite



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

La pointerolle 12468 est entière mais usagée. Un renflement de la matière au niveau de l'œil est visible. La tête présente des signes d'écrasement prononcées.

O(R) : 0,52

•

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	1,4		Nature de la pointe	Acier trempé
Corps	Nature du corps	Ferrito-perlitique avec perlite nodulaire	Pointe	Gamme de dureté relevée	300-680
Corps	Gamme de dureté relevée (HV)	80-300		Particularité notable	Soudure en bout

<u>Observations microscopiques</u> : Dès la découpe d'une section longitudinale, il est observé que la pointe a été rapporté au corps par soudure. En effet, cette ligne de soudure est corrodée. Cette soudure en bout vise à apporter une pointe entièrement aciérée, à un corps hétérogène. La pointerolle a ensuite été trempée, pour durcir la pointe. Les duretés à l'extrême pointe peuvent atteindre 600 HV. On notera également que le corps est aussi trempé



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées







1: Bande d'acier eutectoïde et d'acier à 0,2-0,3% de carbone environ.

2 : Soudure au niveau de la pointe

3 : Acier à 0,7% de carbone.

4 : Structure hors équilibre, martensite, bainite.



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

262

La pointerolle 12687 est entière mais usagée. La tête présente des signes d'écrasement prononcées mais la pointe est encore entière. L'œil est situé à équidistance de la pointe et de la tête.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	2,8		Nature de la pointe	Acier trempé
Corps	Nature du corps	Ferrito-perlitique avec perlite nodulaire	Pointe	Gamme de dureté relevée	150-1000
COLPO	Gamme de dureté relevée (HV)	100-400		Particularité notable	

<u>Observations microscopiques</u> : De la tête à la pointe, cette pointerolle se compose d'une partie supérieure (schéma ci-dessous) aciérée trempée composée de perlite nodulaire et d'une partie inférieure composée d'acier à 0,2-0,3% de carbone, non trempée. L'extrême pointe se compose de martensite. De fait, les duretés y sont plus élevées. Elles dépassent 500 HV.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



1: Acier à 0,8% de carbone et acier à 0,3% de carbone séparé par un chapelet d'inclusions.

2: Acier à 0,2-0,3% de carbone. Les grains sont écrouis par martelage de la tête.

3: Martensite et rosaces de perlite nodulaire.

Structures 4: hors équilibre de martensite et de bainite.

50 µm



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

La pointe de cette pointerolle est acérée. En revanche, la tête est très écrasée. La distance entre la tête est l'œil est très faible. Cette pointerolle est usagée.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	5,9		Nature de la pointe	Acier trempé
Come	Nature du corps	Acier	Pointe	Gamme de dureté relevée	140-600
Corps	Gamme de dureté relevée (HV)	150-230		Particularité notable	

Observations microscopiques : Cette pointerolle est entièrement aciérée. La tête aux grains très écrouis se compose d'un acier à 0,3% de carbone environ. La pointe est composé d'un acier trempé. L'extrême pointe se compose de martensite, et de bainite dont la dureté dépasse 500 HV. Entre la pointe et l'œil, des structures hors équilibres, sous forme de perlite nodulaire ont été observée. Leur dureté est comprise entre 300 et 400 HV.





Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



1: Acier eutectoïde.

2 : Structures hors équilibres, martensite, bainite

3 : Structures hors équilibres, martensite, bainite

4 : Possible martensite revenue



prélevées

Observations macroscopiques :

Cette pointerolle est incomplète. Elle s'est brisée au niveau de l'œil. Seule la pointe est présente. Celle-ci est encore très acérée. La pointerolle s'est probablement brisée lors de son utilisation, alors qu'elle venait d'être réparée.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	2,0	Pointe	Nature de la pointe	Acier trempé
	Nature du corps	Absent		Gamme de dureté relevée	150-1000
Corps	Gamme de dureté relevée (HV)	/		Particularité notable	Soudure en gueule de loup

Observations microscopiques : La pointe de la pointerolle 13894 est entièrement aciérée et trempée. Elle présente à l'extrémité de sa pointe des structures martensitiques et bainitiques dont la dureté dépasse 1000 HV. Au centre de la section, la perlite est nodulaire. La dureté est plus faible, mais reste élevée. Elle se situe aux alentours de 400 HV. Une décarburation est observée autour d'une ligne de soudure. Elle matérialise une soudure en gueule de loup. La dureté est plus faible, autour de 250 HV. Au niveau de l'œil, la perlite nodulaire se mêle à la martensite, la dureté augmente à nouveau et dépasse 700 HV.



Mosaïque après attaque au réactif Nital



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées





Cartographie de dureté



1: De haut en bas, acier à 0,6% de carbone, perlite nodulaire et martensite, bainite.

2 : Martensite, bainite, perlite nodulaire. Fissures intergranulaires.

3: Vue de détail, perlite nodulaire en rosace et martensite.

4: Aiguilles de martensite et de bainite.



• Epaisseur : 15 mm

- Masse : 138 g
- **O(R)** : 0,6

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

La pointerolle 13895 est usagée mais complète. La tête présente des traces d'écrasement, signe de son utilisation. La pointe est encore affutée.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	1,9		Nature de la pointe	Acier trempé
Compa	Nature du corps	Hétérogène dominante ferritique	Pointe	Gamme de dureté relevée	140-270
Corps	Gamme de dureté relevée (HV)	80-160		Particularité notable	Double soudure en bout

Observations microscopiques : Le corps de la pointerolle se compose de ferrite ou d'acier peu carburé (%C<0,3). La pointe aciérée et trempée a été rapportée au corps par soudure en bout. Deux soudures en bout successives sont visibles. La seconde fait probablement suite à une réparation de la pointerolle. La pointe a subi une opération de revenu, non complète. Des structures de martensite sont encore visibles mais la dureté est faible, pour ce type de structure de trempe, autour de 250 HV.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Micrographies

Cartographie de dureté



1: Structures hors équilibre martensite, bainite.

2 : Vue de détail, martensite revenue

3 : Acier à 0,3-0,4% de carbone environ, structure de Widmanstätten.

4 : Ferrite équiaxe

13396-1



Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : 6015
- Secteur : Source
- Isolat :
- Année de découverte : 2016
- **Datation** : XV^{ème} siècle
- Longueur : 27 mm
- Largeur : 20 mm
- Epaisseur : 6 mm
- Masse : 11,7 g

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce fragment métallique découvert dans le canal du XV^{ème} siècle, est un fragment de hache. Il est brisé à l'extrémité opposé au tranchant.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	0,9	Caractéristiques résultantes des	Forme de la perlite	Lamellaire et globulaire
Carburation	%C > 0,3	100	conditions	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,54	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,14		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	190			
	Ecart type	20			

Observations microscopiques : L'échantillon prélevé pour analyse à l'échelle microscopique montre que cette hache présente un caractère dual. Elle se compose de deux parties de carburation différente séparées par une bande d'acier à l'eutectoïde. L'une est composé d'acier dont la teneur en carbone est estimée comprise entre 0,3 et 0,5% de carbone et pour laquelle la perlite est globulaire. La seconde partie est également aciérée à hauteur de 0,2-0,4% de carbone et la perlite est lamellaire.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



1: Bande d'acier eutectoïde séparant la zone d'acier à perlite globulaire et la bande d'acier à perlite lamellaire.

2: Acier eutectoïde et acier à0,3% de carbone environ.

- 3 : Perlite lamellaire
- **4** : Perlite globulaire

13269-1



Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : TB19_11
- Secteur : Les Ouels
- Isolat :
- Année de découverte :
- **Datation** : XV^{ème} siècle
- Diamètre : 25 mm
- Masse : 244 g

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

L'objet 13269-1 est un crochet de section circulaire. Il est fragmentaire, une des extrémités s'est brisée. L'autre extrémité a été tranchée à chaud, elle matérialise la pointe du crochet. Le diamètre de 25 mm de ce crochet est à rapprocher des modules observés pour les barres de fer rondes.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	2,9	a 4 • 4•	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	60	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,45	conditions thermiques et	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,27	mécaniques de travail	Ecrouissage	Dans la zone de tranche
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	174			
	Ecart type	48			

Observations microscopiques : La section longitudinale du crochet présente, comme pour les barres de fer rondes, une organisation des structures aciérées et ferritiques, en bande, alignées dans le sens de l'allongement de l'objet. La partie interne du crochet est davantage carburée. Les teneurs en carbone y atteignent celles de l'eutectoïde. Les inclusions s'alignent également dans le sens du martelage. L'alignement des inclusions pourrait matérialiser des lignes de soudure.



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Micrographies



1: Soudure entre deux parties aciérées, l'une à 0,7% de carbone l'autre à 0,1% de carbone environ



3: Acier à 0,1% de carbone environ



2 : De l'acier à 0,1% de carbone environ à l'acier eutectoïde



4 : Acier à 0,4-0,5% de carbone environ





274

1 : Acier à 0,7% de carbone environ traversée par une ligne de soudure



3: De la ferrite à l'acier à 0,7% de carbone environ et ligne de soudure.



2 : Grains de ferrite équiaxe.



4: Acier à 0,4% de carbone et zone d'acier à 0,2% de carbone environ

13269-2



Informations générales :

- Site : Castel-Minier
- **US** : TB19_11
- Secteur : Les Ouels
- Isolat :
- Année de découverte :
- **Datation** : XV^{ème} siècle
- Diamètre : 20 mm
- Masse : 204 g

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cet objet est un anneau fragmentaire brisé à ses deux extrémités. Sa section circulaire de 20 mm de diamètre est à rapprocher des modules observés pour les barres de fer rondes.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	1,9	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	73	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,54	conditions thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,28		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	190			
	Ecart type	52			

<u>Observations microscopiques</u> : La section transversale de ce crochet ne permet pas d'apprécier la nature du métal sur l'ensemble de la section. En effet, plus de la moitié de la section est corrodée. La partie visible montre néanmoins que comme pour le crochet, l'anneau est formé de bandes aciérées et ferritiques soudées entre elles.





: Structures de Widmanstätten, acier à 0,3% de

: Structures de Widmanstätten, acier à 0,3% de carbone environ

50 µm

Artefacts issus du site de Glinet

GL00-03-2



Informations générales :

- Site : Glinet
- US : 655
- Secteur : Haut-Fourneau
- **Datation** : Fin du XV^{ème} siècle -XVI^{ème} siècle
- Longueur : 70 mm
- Largeur : 35 mm
- Epaisseur : 7 mm
- Masse : 62 g

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit est un morceau de plaque de forme triangulaire. Il possède deux faces parallèles martelées et des bords découpés en biseau. Une des extrémités présente une potentielle trace de tranchage à chaud, perpendiculaire aux faces martelées.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	5	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	0,8	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,08		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,05	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	159	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	36			

Observations microscopiques : Ce demi-produit est majoritairement ferritique. Les zones aciérées dépassent rarement 0,3% de carbone. Après attaque au réactif Oberhoffer, des structures fantômes ont été observées sur la section longitudinale et sur la section transversale, témoignant de la présence de phosphore dans la matrice métallique.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté

Micrographies

1: Acier à 0,1% de carbone et ferrite.



3 : Acier à 0,1% de carbone et ferrite.



162 40

2 : Ferrite et inclusions



4 : Acier à 0,1-0,2% de carbone.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté

Micrographies



1 : Acier dont la teneur en carbone est inférieure à 0.1%



3 : Structures fantômes visibles après attaque Oberhoffer



2 : Acier dont la teneur en carbone est inférieure à



4 : Structures fantômes visibles après attaque Oberhoffer

GL04-93



Informations générales :

- Site : Glinet
- **US** : 985
- Secteur : Chaufferie
- Datation : Fin du XV^{ème} siècle -XVI^{ème} siècle
- **Longueur** : 140 mm
- Largeur : 80 mm
- Epaisseur : 14 mm
- Masse : 871 g

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit est un fragment de plaque de forme parallélépipédique. Les faces sont irrégulières mais relativement parallèles. Les bords sont parallèles deux à deux. Une extrémité semble avoir été tranchée à chaud.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	3,5	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	0,09	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
	%C*	6,11		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,11		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	165	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	31			

<u>Observations microscopiques</u> : Ce demi-produit se compose de façon majoritaire de ferrite, seul 6% de la surface présente une teneur en carbone supérieure à 0,3%. La distribution des zones aciérées est aléatoire. La section transversale est légèrement plus carburée que la section longitudinale. Des structures fantômes, témoignant de la présence de phosphore, ont été observées.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté

Micrographies



1 : Grains de ferrite équiaxe de taille variable



3: Acier à 0,4 - 0,5% C



2: Ferrite et cémentite aux joints de grains



4 : Structures fantômes visibles après attaque Oberhoffer



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



1 : Grains de ferrite équiaxes de taille variable.

2: Variation des teneurs en carbone de la ferrite à l'acier à 0,5% de carbone.

3 : Acier à 0,3-0,5% de carbone.

4: Structures fantômes observées après attaque Oberhoffer.

GLO6-135Informations générales :Site : GlinetUS : 1166Secteur : Chaufferie
(marteau)Obtation : Fin du XVème
siècle -XVIème siècleLargeur : 107 mmLargeur : 50 mmEpaisseur : 12 mmMasse : 351 g

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cet artefact est une barre de section quadrangulaire. Une face est plane et martelée tandis que l'autre est un peu bombée avec une dépression attenante à un bord. Un bord est rectiligne et épais avec une légère convexité centrale, l'autre est très fin et sinueux. Une extrémité présente plusieurs faces indiquant deux angles de découpes.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	4,5	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	0	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,06		Structures de Widmanstätten	Non
	Ecart type	0		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	204	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	35			

Observations microscopiques : L'ensemble de la section observée est ferritique. Les inclusions sont présentes à hauteur de 5% et occupent de façon uniforme l'ensemble de la surface. Des mâcles, pouvant refléter un travail à froid, sont visibles dans les grains de ferrite. Des structures fantômes, témoins de la présence de phosphore, ont été observées sur toute la section.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées





1 : Grains de ferrite équiaxe de taille variable et inclusions déformées dans le sens du martelage.

2 : Macles dans grains de ferrite.

3: Variations mésoscopiques des teneurs en phosphore observées après attaque au réactif Oberhoffer – zones riches en phosphore (claires) et zones pauvres (sombres).

4: Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.

Cartographie de dureté

286 GL00-39 **Informations générales :** Site : Glinet **US**: 652 • Secteur : Haut-Fourneau Datation : Fin du XV^{ème} • GL00-39a siècle -XVI^{ème} siècle Longueur : 122 mm Largeur: 46 mm Epaisseur : 13 mm • **Masse** : 310 g • 0 1 5 cm *L'objet avait déjà fait l'objet d'une

Photographie de l'objet avant découpe* et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit se présente sous la forme d'une barre de section rectangulaire. Les deux plus grandes faces et les bords sont plans et parallèles deux à deux. La barre s'amincit dans la longueur. Une de ses extrémités présente une trace de découpe en biseau, l'autre semble s'être brisée.

première découpe en son centre

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	4,9	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	21,5	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,22		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,24		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	170	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	46			

Observations microscopiques : La section observée est hétérogène. La section est majoritairement ferritique, mais un peu plus de 20% de la surface est composée d'acier dont la teneur en carbone est supérieure à 0,3%. Quelques zones d'acier hypereutectoïdes minoritaires ont été observées. Des structures fantômes, témoins de la présence de phosphore, ont été observées sur toute la section.



Mosaïque après attaque au réactif Nital



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées





1 : Grains de ferrite de taille très variables.

2: Acier à 0,7% de carbone au centre et acier à 0,3% de carbone en périphérie.

3 : Gradation d'un acier à 0,8% de carbone vers la ferrite, de la périphérie au cœur de l'objet

4: Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.

GL00-50



Informations générales :

- Site : Glinet
- **US** : 638
- Secteur : Haut-Fourneau
- Datation : Fin du XV^{ème} siècle -XVI^{ème} siècle
- Longueur : 110 mm
- Largeur : 59 mm
- Epaisseur : 14 mm
- Masse : 339 g

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit est une chute de barre de section rectangulaire s'amincissant de manière régulière dans l'épaisseur. Ses faces sont grossièrement planes et parallèles deux à deux. Il est légèrement recourbé sur la longueur vers l'extrémité la plus mince.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	3,9	Caractéristiques	Forme de la perlite	Absente
Carburation	%C > 0,3	0	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,06		Structures de Widmanstätten	Non
	Ecart type	0		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	110	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	15			

<u>**Observations microscopiques</u></u> : Les sections longitudinale et transversale de ce demi-produit sont toutes deux entièrement ferritiques. Après attaque au réactif Oberhoffer, les structures fantômes sont peu présentes. Quelques structures de ce type ont été observées au sein de la section longitudinale. Il est possible que la teneur en phosphore soit inférieure à 0,1% de carbone ou supérieure à 0,6% de carbone, où que la forge ait eu lieu à des températures ne permettant pas l'apparition de structures fantômes (<900°C ou > 1300°C).</u>**


Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Micrographies



1: Petites inclusions sphéroïdales.



3 : Grains de ferrite équiaxes et inclusions.



289

2 : Grains de ferrite équiaxes et inclusions.



4 : Structures fantômes observées après attaque. au réactif Oberhoffer.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



1: Inclusions



3 : Grains de ferrite équiaxes et inclusions



2 : Grains de ferrite équiaxes et inclusions



4 : Grains de ferrite équiaxes et inclusions

GLO4-42

0 1 5 cm Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit est une barre de section rectangulaire. Ses faces et ses bords sont plans. Elle présente un léger amincissement dans l'épaisseur. L'extrémité la plus épaisse présente une trace de tranchage à chaud. Cette barre avait été préalablement découpée et fait l'objet d'études antérieures. L'échantillon GL04-42b a été repris pour analyse.

Observations microscopiques : *Nature et caractéristiques du métal*

Inclusions	%Inc	4,4	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	1,83	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,07	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,06		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	181	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	39			

<u>**Observations microscopiques</u>**: Les deux sections prélevées sont toutes deux composées de ferrite majoritairement. Une bande d'acier peu carburé (%C < 0,3), traverse les deux sections. Les inclusions sont réparties sur l'ensemble de la surface pour les deux échantillons et s'allongent dans le sens du martelage.</u>

Informations générales :

- Site : Glinet
- US : 939
- Secteur : Chaufferie
- Datation : XVI^{ème} siècle
- Longueur : 195 mm
- Largeur : 40 mm
- Epaisseur : 19 mm
- Masse : 380 g

*L'objet avait déjà fait l'objet d'une première découpe à ses extrémités







Microdureté				
Moyenne /				
Ecart type	/			

Micrographies



1 : Grains de ferrite de taille très variables.

2 : Acier à 0,7% de carbone au centre et acier à 0,3% de carbone en périphérie.

3 : Structures de Widmanstätten

4: Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.





Cartographie de dureté



1 : Ferrite équiaxe



3 : Bande d'acier au cœur de la ferrite



2 : Mâcles dans grains de ferrite



4 : Acier à 0,2-0,3% de carbone environ

GL05-32



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Informations générales :

- Site : Glinet
- **US** : 902
- Secteur : Chaufferie
- Datation : Fin du XV^{ème} siècle -XVI^{ème} siècle
- Longueur : 160 mm
- Largeur : 50 mm
- Epaisseur : 10 mm
- Masse : 372 g

*L'objet avait déjà fait l'objet d'une première découpe

Ce demi-produit est une barre de section rectangulaire. Les faces sont grossièrement parallèles et martelées. Les bords sont grossièrement parallèles, l'épaisseur est constante. Une fissure est visible à la surface. Cette barre avait été préalablement découpée et fait l'objet d'études antérieures.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	2,2	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	% Surface carburée	38,4	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,26		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,26		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	185	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	40			

<u>Observations microscopiques</u> : La section longitudinale de cette barre est majoritairement ferritique. La partie inférieure (schéma ci-dessous) est plus carburée. De l'acier eutectoïde est parfois observée. De rares structures d'acier hypereutectoïde sont également visibles. L'attaque au réactif Oberhoffer a révélé, sous forme de structures fantômes, la présence de phosphore.



1 cm

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



1 cm

Cartographie de dureté



1: Ferrite

2 : Acier à 0,1-0,2% de carbone.

3: Partie supérieure ferritique et partie inférieure aciérée à 0,6-0,7% de carbone.

4: Acier hypereutectoïde.

$\begin{array}{c} & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & & \\ & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & & \\ & & & & \\ & & & & \\ & & & & & \\ & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & &$

Informations générales :

- Site : Glinet
- **US** : 1027
- Secteur : Haut-Fourneau
- **Datation** : Fin du XV^{ème} siècle -XVI^{ème} siècle
- Longueur : 47 mm
- Largeur : 45 mm
- Epaisseur : 10 mm
- **Masse** : 80 g

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit est une barre de section rectangulaire. Une face est plane, l'autre est légèrement bombée. Un bord présente une découpe, les autres bords et extrémités sont bruts. Il semble s'agir d'une chute de demi-produit en bout.

La barre avait été préalablement découpée et avait fait l'objet d'une étude antérieure.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	4,5	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	5,6	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,11	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,09		Ecrouissage	Léger
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	131	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	66			

<u>Observations microscopiques</u> : Cette barre est majoritairement composée de ferrite ou d'acier dont la teneur est inférieure à 0,3% de carbone. L'attaque au réactif Oberhoffer a révélé la présence de phosphore dans la matrice métallique : des structures fantômes ont été observées sur l'ensemble de la section.





4 : Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.

GL05-38



Informations générales :

- Site : Glinet
- **US** : 1201
- Secteur : Chaufferie
- Datation : Fin du XV^{ème} siècle -XVI^{ème} siècle
- Longueur : 80 mm
- Largeur : 43 mm
- Epaisseur : 10 mm
- Masse : 140 g

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit est une probable barre de section rectangulaire. Son état de conservation est mauvais. Ses faces sont planes et parallèles et ses bords sont rectilignes. Une des extrémités présente une trace de découpe en biseau tandis que l'autre est arrondie.

Une tentative de découpe avait préalablement été réalisée dans le cadre d'études antérieures, ce qui explique l'entaille visible sur une des faces.

Observations microscopiques : *Nature et caractéristiques du métal*

Inclusions	%Inc	7,3	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	0,48	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,07	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,03	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	218	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	30			

<u>Observations microscopiques</u> : La section longitudinale et la section transversale de ce demi-produit sont majoritairement ferritique. Les inclusions sont distribuées sur l'ensemble des deux sections. L'attaque au réactif Oberhoffer montre la présence de phosphore dans la matrice métallique. Des fissures intergranulaires sont visibles sur la section transversale.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



1 : Inclusions et fissures intergranulaires dans matrice métallique



3 : Zone aciérée autour de 0,2-0,3% de carbone



4 : Structures fantômes visibles après attaque au réactif Oberhoffer.





Micrographies









1: Grains de ferrite équiaxes de taille variable.

2 : Grains de ferrite équiaxes de taille variable.

3: Fissures intergranulaires.

4 : Mâcles dans grains de ferrite.

Informations générales :

- **Site** : Glinet
- **US** : 1126
- Secteur : Affinerie
- Datation : XVI^{ème} siècle
- **Longueur** : 160 mm
- Largeur : 24 mm
- **Epaisseur** : 24 mm
- Masse : >100 g

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit est une barre de section ronde. Une extrémité est cassée, l'autre est aplatie. La section est régulière. Il peut s'agir d'un demi-produit ou d'un morceau d'objet comme un fragment de barre à mine.

GL05-40

*L'échantillon GL05-40a avait été prélevé dans le cadre d'études antérieures.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	7,3	Caractéristiques	Forme de la perlite	Absente
Carburation	%C > 0,3	0	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,06	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	167	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	29			

<u>Observations microscopiques</u>: Cette barre se compose de façon majoritaire de ferrite. Elle est phosphoreuse comme l'atteste la présence de structures fantômes révélées suite à l'attaque au réactif Oberhoffer.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Microdu	Microdureté					
Moyenne	152					
Ecart type	25					

Cartographie de dureté

and a



5 mm



100 µm

1,2:Ferrite

200 µm

3, 4 : Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées





Cartographie de dureté

Inclusions					
% Inc	7,8				
Carburat	Carburation				
%C*	0,06				
%C > 0,3	0				
Ecart type	0				

Microdureté				
Moyenne	176			
Ecart type	27			



1, 2, 3, 4 : Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.

GL06-15



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Informations générales :

- Site : Glinet
- **US** : 1113
- Secteur : Affinerie
- Datation : Fin du XV^{ème} siècle -XVI^{ème} siècle
- Longueur : 85 mm
- Largeur : 45 mm
- Epaisseur : 15 mm
- Masse : 167 g

Ce demi-produit est une barre de section rectangulaire qui se délite en feuillets sur une face et un bord. Les faces sont martelées et parallèles. Une extrémité est cassée tandis que l'autre est coupée.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	3,9	Caractéristiques	Forme de la perlite	Globulaire
Carburation	%C > 0,3	9,9	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,11		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,12		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	145	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	31			

Observations microscopiques : Les sections longitudinale et transversale sont majoritairement ferritiques. Des bandes d'acier, dont la teneur en carbone dépasse rarement 0,4% de carbone sont visibles. Au sein de ces bandes, la perlite est globulaire, témoignant d'un maintien à haute température avant un refroidissement à vitesse modérée. Des structures fantômes ont été observées après attaque au réactif Oberhoffer, pour les deux sections, attestant de la présence de phosphore dans la matrice métallique.





80-102 124-146

168<u>-1</u>90 212-234 256-278

>300

Cartographie de dureté



1: Inclusions allongées dans le sens du martelage.

2 : Acier à 0,3% de carbone – Structures de Widmanstätten.

3 : De l'acier à 0,3% de carbone (haut) vers l'acier à 0,8% de carbone (bas).

4: Acier à 0,3% de carbone – Structures de Widmanstätten.





Cartographie de dureté



1: Inclusions déformées par le martelage dans une matrice ferritique.

157

36

2 : Acier à 0,2% de carbone.

3: Alternance de bande riches (claires) et pauvres (sombres) en phosphore.

4: Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.

GL06-37



Informations générales :

- Site : Glinet
- **US** : 1102
- Secteur : Affinerie
- Datation : Fin du XV^{ème} siècle -XVI^{ème} siècle
- Longueur : 75 mm
- Largeur : 53 mm
- Epaisseur : 20 mm
- Masse : 218 g

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute se présente sous la forme d'un éclat relativement circulaire. Les deux faces les plus larges semblent avoir été martelées. Les extrémités et les bords sont relativement informes. Une des extrémités se termine en biseau, elle pourrait avoir été tranchée à chaud.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	13,3	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	2	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,08	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Non
	Ecart type	0,08	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	/	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	/			

<u>Observations microscopiques</u> : Cette chute présente de nombreuses inclusions et porosités réparties sur l'ensemble des sections longitudinale et transversale à hauteur de 4%. En ce sens, cette chute s'apparente davantage à un éclat de compactage qu'à une chute de demi-produit. La matrice métallique est majoritairement ferritique mais quelques régions plus aciérées sont également observées. L'attaque au réactif Oberhoffer a révélé la présence de phosphore, sous forme de structures fantômes.



Cartographie de dureté

200 µm

100 µm

1 : Inclusions de scorie dans la matrice métallique

Micrographies

3 : Nodule de métal dans matrice scoritique



Microdureté (HV)

Moyenne Ecart type

2: Acier à 0,1% de carbone environ



4 :Zone d'acier à 0,5% de carbone environ dans une zone d'acier à 0,1% de carbone environ



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Cartographie correspondante indiquant la répartition



3:Séparation entre une zone ferritique et une zone aciérée dont la teneur en carbone est inférieure à 0,1%.

4 :De l'acier à 0,5% de carbone environ vers la ferrite

GL06-131



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Informations générales :

- **Site** : Glinet
- **US** : 1143
- Secteur : Bief
- Datation : Fin du XV^{ème} siècle -XVI^{ème} siècle
- Longueur : 48 mm
- Largeur : 44 mm
- Epaisseur : 11 mm
- Masse : 140 g

Observations macroscopiques :

Cet artefact possède deux faces planes parallèles, deux bords perpendiculaires rectilignes et deux autres bords irréguliers probablement cassés. Il pourrait s'agir d'un fragment de barre ou de plaque mais aussi d'une chute de compactage.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	18,4	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	5	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,09	thermiques et mécaniques de travail	Structures de Widmanstätten	Non
	Ecart type	0,1		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	166	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	35			

<u>Observations microscopiques</u> : Les sections longitudinale et transversale présentent toutes deux un fort pourcentage inclusionnaire. La matière est mal épurée. Ceci renforce l'idée que ce produit serait en réalité une chute de compactage. Les sections sont majoritairement ferritiques, mais des îlots d'acier eutectoïde sont visibles par endroit, répartis aléatoirement au sein de la section. La présence de phosphore est vérifiée suite à l'attaque au réactif Oberhoffer laissant entrevoir des structures fantômes sur l'ensemble des deux sections.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté



1: Zone ferritique et (haut) zones aciérées (bas).

166 34

2 : Ferrite équiaxe.

3 : Acier à 0,2% de carbone et plages perlitiques.

4: Structures fantômes observées après attaque Oberhoffer.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées 80-102 124-146 168-190 212-234 256-278

HV 🗾



Microdurete	é (HV)
Moyenne	166
Ecart type	36

>300

5 mm

Cartographie de dureté



1: Acier eutectoïde en haut et acier à 0,2% de carbone environ en bas.

2: Acier à 0,2% de carbone, grains légèrement écrouis.

3: Ferrite, inclusions et corrosion

4: Structures fantômes observées après attaque Oberhoffer.

GL07-89 • • GL07-89a • • GL07-89b

5 cm

Informations générales :

- Site : Glinet
- **US** : Hors contexte
- Secteur : /
- Datation : Fin du XV^{ème} siècle -XVI^{ème} siècle
- Longueur : 70 mm
- Largeur : 57 mm
- Epaisseur : 8 mm
- **Masse** : 156 g

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

0

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit est une chute de barre de section rectangulaire. Les faces sont planes et les bords sont parallèles. L'épaisseur s'amincie régulièrement et une extrémité est légèrement courbée dans la longueur. Une extrémité mince irrégulière est cassée tandis que l'autre extrémité est large à angles droits par rapport aux faces et semble avoir été écrasée par martelage.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	8,7	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	0	resultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,06		Structures de Widmanstätten	Non
	Ecart type	0,01		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	167	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	51			

Observations microscopiques : Ce demi-produit est entièrement composé de fer phosphoreux. Il se compose uniquement de ferrite. Les inclusions, nombreuses, se répartissent sur l'ensemble des deux sections.



5 mm

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Micrographies



1 : Inclusions allongées dans le sens du martelage



3 : Grain de ferrite de taille diverse



2 : Grain de ferrite avec macles



4 : Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer







1: Inclusions



3 : Grain de ferrite avec macles



315

2: Grain de ferrite avec macles



4 : Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer

GL08-30



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Informations générales :

- Site : Glinet
- **US** : 1310
- Secteur : Chaufferie (marteau)
- Datation : Fin du XV^{ème} siècle -XVI^{ème} siècle
- Longueur : 210 mm
- Largeur : 50 mm
- Epaisseur : 19 mm
- Masse : 858 g

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit est une barre de section rectangulaire coudée. Sa surface originelle est conservée. La face interne est plane tandis que la face externe présente un creux médian de part et d'autre du coude et deux bords d'épaisseur inégale. Le bord le plus épais est découpé à angle droit. Une extrémité est cassée, l'autre a probablement deux traces de découpe. Il pourrait s'agir d'une barre ayant servi sur le site.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	5,1	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	6,95	résultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,12		Structures de Widmanstätten	Non
	Ecart type	0,10		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	/	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	/			

Observations microscopiques : La section longitudinale de cette barre coudée est majoritairement ferritique. L'acier est observé, principalement en périphérie de la barre, ce qui laisse penser à une cémentation. Les inclusions sont fines et orientées dans le sens du martelage.









1: Possible soudure entre une zone ferritique à gros grains et acier à 0,2 - 0,3% de carbone.

2 : Grains de ferrite équiaxes, inclusions déformées, allongées dans le sens du martelage.

3 : Acier à 0,3% de carbone sur la partie supérieure, et acier à 0,5% de carbone sur la partie inférieure.

4 : Acier à 0,3% sur la partie supérieure, et acier à 0,5% de carbone sur la partie inférieure, le bord de l'objet est ferritique.

GL08-112



Informations générales :

- Site : Glinet
- **US** : 1310
- Secteur : Chaufferie (marteau)
- Datation : Fin du XV^{ème} siècle -XVI^{ème} siècle
- Longueur : 155 mm
- Largeur : 46 mm
- Epaisseur : 20 mm
- Masse : 598 g

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit se présente sous la forme d'une barre de section rectangulaire. Les faces sont planes, les bords sont parallèles. Le demi-produit s'amincit en épaisseur dans la longueur. L'extrémité la plus épaisse est écrasée par martelage tandis que l'extrémité la plus fine est cassée.

Observations microscopiques : *Nature et caractéristiques du métal*

Inclusions	%Inc	5,3	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	5,55	resultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,10		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,11		Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	160	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	39			

<u>Observations microscopiques</u> : Ce demi-produit est majoritairement ferritique. Des zones d'acier dont la teneur en carbone peut atteindre l'eutectoïde sont visibles sur les deux sections. Elles se distribuent de façon arbitraire sur les sections, elles sont donc inhérentes à l'hétérogénéité de la masse brute initiale. Des structures fantômes, témoignant de la présence de phosphore, sont visibles après attaque Oberhoffer sur les deux sections.





Cartographie de dureté

Micrographies



1 : Grains de ferrite écrouis.

2 : Grains de ferrite équiaxe, de taille variable.

3: Ferrite et zone d'acier eutectoïde.

4 : Structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.











1: Ferrite équiaxe et inclusions.

2 : Acier à 0,1-0,2% de carbone et ferrite

3 : Acier à 0,6-0,7% de carbone encerclée de ferrite

4: Variations mésoscopiques et structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.

GL10-74



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Informations générales :

- Site : Glinet
- **US** : 814
- Secteur : Haut-Fourneau
- Datation : Fin du XV^{ème} siècle -XVI^{ème} siècle
- Longueur : 104 mm
- Largeur : 37 mm
- Epaisseur : 7 mm
- **Masse** : 164 g

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit est une barre de section rectangulaire. Ses deux faces sont planes avec deux creux ronds sur une face. Les bords sont grossièrement parallèles avec des irrégularités. Le demi-produit s'amincit régulièrement dans sa longueur. Aucune trace évidente de découpe n'est visible.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	3,3	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	2,70	resultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,11		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,1		Ecrouissage	Léger
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	146	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	24			

Observations microscopiques : Ce demi-produit se compose majoritairement de ferrite et d'acier dont la teneur est proche de 0,1% de carbone. Au niveau du percement, une zone d'acier eutectoïde a été observée. Dans cette zone, les grains sont écrouis. Partout ailleurs sur les deux sections, ils sont équiaxes. L'attaque au réactif Oberhoffer a révélé la présence de phosphore.





Cartographie de dureté



Micrographies

1 : Ferrite et acier de teneur en carbone inférieure à 0.1%.



3 : Poche d'acier eutectoïde dans une matrice ferritique



2 : Ferrite et acier de teneur en carbone inférieure à 0.1%.



4: Poche d'acier à 0,4-0,5% de carbone environ dans une matrice ferritique





Cartographie de dureté



1: Ferrite et acier de teneur en carbone inférieure à 0.1%.



3 : Carburation périphérique de l'acier eutectoïde à la



2 : Ferrite et acier de teneur en carbone inférieure à 0,1%.



4 : Alignement des inclusions et repli consécutive au percement

GL07-132-1



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cette chute de demi-produit est issue de la découpe d'une barre de section ronde. Une extrémité est coupée en biseau, l'autre possède une section plus large car la matière est écrasée et légèrement repliée.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	3,8	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
Carburation	%C > 0,3	10,2	resultantes des conditions thermiques et mécaniques de travail	Martensite/Bainite	Non
	%C*	0,13		Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,17		Ecrouissage	Oui
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	156	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	38			

<u>Observations microscopiques</u> : Cette chute de fer rond est majoritairement ferritique. Quelques zones plus carburées sont localisées en périphérie du demi-produit pouvant laisser penser à une cémentation. Les grains sont équiaxes, sauf au niveau de la tête où ils sont écrouis suite au martelage de la matière. L'attaque au réactif Oberhoffer a révélé la présence de phosphore dans la matrice métallique.


80<u>-1</u>02

HV

<80

Mosaïque après attaque au réactif Nital



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Micrographies



1 : Carburation périphérique, acier à 0,4-0,5% de carbone.



3 : Ferrite écrouie

Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées

02 12	4-146 16	3-190 212-	234 256	-278	>300	
102-124	146-168	190-212	234-256	278-3	800	
			Inclu	usio	ns	
		0	% Inc		4,4	
			Carb	urat	ion	
			%C*		0,11	
		%	C > 0,	3	5	
		Eca	art typ	e	0,12	

Microdureté				
Moyenne	156			
Ecart type	38			



2 : Acier à 0,4% de carbone, structures de Widmanstätten.



4 : Structures fantômes observées après attaque Oberhoffer.



3 : Acier eutectoïde et acier à 0,2% de carbone environ

50 µm 4 : Structures fantômes observées après attaque Oberhoffer.



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit est une tige de section rectangulaire. Ses faces sont martelées et ses bords sont grossièrement parallèles. Il s'amincit de manière régulière dans sa longueur. Il pourrait s'agir d'une petite soie de préhension.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	3	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	0	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,07	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Non
	Ecart type	0,03	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	184	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	18			

Observations microscopiques : Ce demi-produit se compose uniquement de ferrite, de façon majoritaire, et d'acier dont la teneur en carbone est située aux alentours de 0,1%. Une ligne continue d'inclusions au centre de la pièce pourrait matérialiser une ligne de soudure. Les inclusions, réparties sur l'ensemble de la surface, sont fines et alignées perpendiculairement au sens du martelage. Des structures fantômes, témoins de la présence de phosphore, ont été observées sur toute la section.



50 µm 1 : Inclusions écrasées dans le sens du martelage



3 : Ligne de soudure matérialisée par la corrosion



2: Ferrite équiaxe



4 : Structures fantômes observées après attaque Oberhoffer



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Ce demi-produit est une tige de section rectangulaire. Ses deux faces sont martelées et parallèles. Les bords sont grossièrement parallèles. Les deux extrémités semblent être tranchées à chaud. Elles présentent des angles droits avec les faces.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	4,8	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	0	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,06	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Non
	Ecart type	0	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	148	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	29			

Observations microscopiques : Ce demi-produit se compose uniquement de ferrite. Les grains sont équiaxes et de tailles très variables comprises entre 20 et 200 μ m. Les inclusions, réparties sur l'ensemble de la surface, sont fines et alignées perpendiculairement au sens du martelage. Des structures fantômes, témoins de la présence de phosphore, ont été observées sur toute la section.









1: Fines inclusions dans matrice métallique.



3 : Grains de ferrite équiaxes de taille variable.



2 : Grains de ferrite équiaxes.



4: Structures fantômes visibles après attaque au réactif Oberhoffer. .

GLO4-1143 GLO4-114a GLO4-114a GLO4-114a GLO4-114b GLO4

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cet objet est une fiche de taille moyenne comparée aux autres fiches retrouvées sur le site. Elle est entière et bien conservée. Sa section est carrée. Son extrémité est affutée.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	4,2	Caractéristiques	Forme de la perlite	
	%C > 0,3	32,4	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,2-0,3	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,17-0,29	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	266	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	153			

<u>Observations microscopiques</u> : La section longitudinale est transversale de cette fiche sont majoritairement ferritique. Cependant, on note la présence d'acier sur les deux sections. Pour la section longitudinale, une bande d'acier trempé occupe la moitié de la section dans sa longueur. Des structures de type martensite et bainite sont visibles. Il en est de même pour la section transversale, une bande déformée, suite à la mise en forme de la fiche traverse la section en son centre. Il semblerait donc que la présence d'acier soit inhérente à l'hétérogénéité de la masse brute initiale. La fiche a ensuite été trempée entièrement. La localisation des structures de trempe ne vise pas à améliorer les propriétés de l'objet.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Microdureté (HV)				
Moyenne	269			
Ecart type	160			





1: Ferrite (partie supérieure) et structures de trempe (partie inférieure).

2 : Structures de martensite et de bainite et ferrite aciculaire.

3 : Structures de trempe : martensite, bainite et perlite nodulaire.

4: Variations mésoscopiques de la teneur en phosphore : structures fantômes observées après attaque au réactif Oberhoffer.



200 um

333

et

et

au

200 µm



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cet objet est une petite fiche entière et bien conservée. Sa section est rectangulaire. La pièce s'aplatie de la tête à l'extrémité.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	3,7	Caractéristiques	Forme de la perlite	Absente
	%C > 0,3	0	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,06	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Non
	Ecart type	0,02	travail	Ecrouissage	Non
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	159	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	23			

<u>Observations microscopiques</u> : La section longitudinale de la fiche GL08-43-1 est entièrement ferritique. Les inclusions sont fines et allongées dans le sens perpendiculaire à l'axe du martelage. L'attaque au réactif Oberhoffer a montré la présence de phosphore dans la matrice métallique, visuellement identifiable par la présence de structures fantômes.









1 : Inclusions déformées et allongées dans le sens du martelage



3 : Grains de ferrite équiaxes.



2 : Grains de ferrite équiaxes et macles.



4 : Grains de ferrite équiaxes.

GL08-77-2



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cet objet est une fiche de section carrée. Elle est incomplète.

Informations générales :

- Site : Glinet
- **US** : 1345-4
- Secteur : Bief
- Datation : Fin du XV^{ème} siècle -XVI^{ème} siècle
- Longueur : 69 mm
- Largeur : 13 mm
- Epaisseur : 14 mm
- **Masse** : 84 g

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	6,4	Caractéristiques	Forme de la perlite	
	%C > 0,3	5,9	résultantes des	Martensite/Bainite	Oui
Carburation	%C*	0,08	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Oui
	Ecart type	0,08	travail	Ecrouissage	Oui
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	164	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	40			

Observations microscopiques : La section longitudinale de la fiche GL08-77-2 est majoritairement ferritique. Seule une petite zone, localisée au niveau de la pointe, et la périphérie d'une des faces de l'objet, est composée d'un acier trempé. La localisation de l'acier pourrait être consécutive à une opération de cémentation. Les grains sont équiaxes sauf au niveau de la tête où ils sont écrouis par martelage. Une grande ligne de soudure, rendue visible par la corrosion s'y étant infiltrée, traverse l'objet dans sa longueur. L'attaque au réactif Oberhoffer a révélé la présence de phosphore sur l'ensemble de la section.



Mosaïque après attaque au réactif Nital



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté

Hicrographies

1 : Martensite en périphérie de l'objet, ferrite au cœur.



3 : Ferrite et acier trempé.



2 : Grains de ferrite équiaxes.



4 : Ecrasement par martelage d'une extrémité de l'objet, repli de la matière, grains écrouis.

GL08-80



Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cet objet est une grande fiche de section circulaire, entière avec une tête en forme de T aplatie par martelage.

Observations microscopiques : Nature et caractéristiques du métal

Inclusions	%Inc	4,4	Caractéristiques	Forme de la perlite	
	%C > 0,3	0	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,06	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Non
	Ecart type	0,02	travail	Ecrouissage	Oui
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	219	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	47			

Observations microscopiques : La fiche GL08-80 est composée de ferrite. Les grains sont équiaxes sauf au niveau de la tête où ils sont écrouis. Dans cette zone, de l'acier à 0,1% de carbone environ est observé. Les inclusions s'organisent sous forme de bande longitudinales, orientées dans le sens du martelage. L'attaque au réactif Oberhoffer a révélé la présence de phosphore sous forme de structures fantômes.

Informations générales :

- Site : Glinet
- US :
- Secteur : Bief
- Datation : Fin du XV^{ème} siècle -XVI^{ème} siècle
- **Longueur** : 178 mm
- Largeur : 59 mm
- Epaisseur : 17 mm
- Masse : 339 g



Mosaïque après attaque au réactif Nital

Cartographie correspondante indiquant la répartition

200 µm

100 µm



Micrographies



1 : Grains de ferrite, inclusions allongées dans le sens du martelage.

2 : Grains de ferrite équiaxe de taille variable.

3 : Soudure de repli au niveau de la tête.

4: Alternance de bandes riches en phosphore (claires) et pauvres en phosphore (sombres) après attaque au réactif Oberhoffer. Présence de structures fantômes.



GLO8-100 Informations générales : Site : Glinet US : 1328 Secteur : Chaufferie Datation : Fin du XV^{ème} siècle -XVI^{ème} siècle Longueur : 135 mm Largeur : 13 mm Epaisseur : 11 mm Masse : 136 g

341

Photographie de l'objet avant découpe et indications des zones prélevées

Observations macroscopiques :

Cet objet est une fiche moyenne, entière et bien conservée. La section est carrée, l'extrémité est aplatie.

Observations microscopiques : *Nature et caractéristiques du métal*

Inclusions	%Inc	5,2	Caractéristiques	Forme de la perlite	Lamellaire
	%C > 0,3	2,91	résultantes des	Martensite/Bainite	Non
Carburation	%C*	0,08	thermiques et mécaniques de	Structures de Widmanstätten	Oui
Ecart type 0,08	travail	Ecrouissage	Oui		
Microdureté	Microdureté moyenne (HV)	152	Phosphore	Structures fantômes	Oui
	Ecart type	40			

Observations microscopiques : La fiche GL08-100 se compose majoritairement de ferrite. Quelques zones aciérées se distribuent de façon aléatoire sur les sections longitudinale et transversale. Une ligne de soudure traverse la section longitudinale dans sa longueur. En revanche, pour la section transversale, elle n'est pas entièrement traversante. Elle part d'un des coins de la section pour la traverser, diagonalement, jusqu'à son centre. Cette fiche a été mise en forme par repli de la matière sur elle-même avant d'être martelée. L'attaque au réactif Oberhoffer a révélé la présence de structures fantômes, caractéristiques de la présence de phosphore.



Cartographie correspondante indiquant la répartition des différentes zones carburées



Cartographie de dureté

Micrographies



1: Inclusions au sein de la matrice ferritique



3 : Grains de ferrite équiaxe et inclusions



2: Acier à 0,4-0,5% de carbone environ



4: Acier à 0,1-0,2% de carbone environ





1 : Grains de ferrite équiaxe et inclusions



3 : Séparation franche entre un acier à 0,1% de carbone et une zone ferritique

Cari 100 µm

2 : Grains de ferrite équiaxe et inclusions



4: Acier à 0,4-0,5% de carbone environ

Annexes B :

Résultats des essais de traction

L'annexe suivante présente les résultats des essais de traction uniaxiale menés sur les barres des Saintes-Maries-de-la-Mer.

Les résultats sont présentés en regroupant les éprouvettes issues d'une même barre. Ainsi, la première partie des fiches d'analyse comporte un descriptif de la barre dont il est question. Les résultats relatifs à chacune des éprouvettes sont ensuite décrits un à un. Pour chacune, une première illustration repositionne l'éprouvette sur un schéma interprétatif de la répartition des teneurs en carbone au sein de la barre. Pour rappel, une phase d'observation à l'échelle macroscopique de la nature des barres sur toute la section longitudinale avait été menée au préalable par Gaspard Pagès au cours de ses travaux de thèse (Pagès, 2008). Lorsque plusieurs noms d'éprouvettes sont indiqués au niveau d'une même section, cela signifie que plusieurs éprouvettes ont été prélevées dans l'épaisseur pour cette section. La courbe contrainte-déformation est ensuite présentée et les valeurs des paramètres caractéristiques, à savoir le module d'Young E, la contrainte maximale σ_M , la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 (Re_{0,2}) et l'allongement à la rupture A% sont fournies. Dans la partie suivante, quelques images obtenues par l'étude des faciès de rupture par observation au microscope électronique à balayage sont présentées. Enfin, l'éprouvette *post-mortem* a été étudiée métallographiquement. La carte de distribution des teneurs en carbone dans l'éprouvette est fournie accompagnée de quelques clichés métallographiques obtenus par microscopie optique.



Cette barre appartient au type **1L** de la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer. L'analyse à l'échelle macroscopique montre qu'elle se compose majoritairement de ferrite ou d'acier dont la teneur en carbone est inférieure à 0,2%. Dans une de ses parties extrêmes, une soudure lie deux lopins ferritiques. Le métal semble davantage carburé autour de la soudure. Dans cette barre, deux sections ont été considérées. La première concerne la zone de la soudure et la seconde une partie ferritique avec inclusions. Pour chacune d'entre elles, une éprouvette a été prélevée.



Schéma interprétatif de la barre SM2.6 après observation à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement des éprouvettes (encadré rouge)



E(GPa)	235
Re _{0,2} (MPa)	175
σ _M (MPa)	202
A%	0,8

Comportement mécanique :

Courbe contrainte-déformation

Faciès de rupture :



Faciès de rupture de l'éprouvette SM2.6.1EI observée au MEB a) Porosités et grandes fissures au centre de la zone de rupture pouvant correspondre à la soudure b) Cupules typiques d'une rupture ductile

Etude métallographique :



a) Carte de distribution des teneurs en carbone dans l'éprouvette SM2.6.1EI b) Grains de ferrite de taille variable c) De l'acier à 0,3% de carbone vers un acier à 0,7% de carbone environ d) Acier eutectoïde

L'éprouvette SM2.6.1EI se compose de ferrite et d'acier dont la teneur en carbone peut atteindre celle de l'eutectoïde. L'analyse de l'éprouvette montre que la rupture a eu lieu au niveau de la soudure dans une zone aciérée. Le faciès de rupture présente de nombreux cupules, typique d'une rupture ductile.



Schéma interprétatif de la barre SM2.6 après observation à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement des éprouvettes (encadré rouge)

Comportement mécanique :



E(GPa)	190
Re _{0,2} (MPa)	170
σ _M (MPa)	211
A%	3,4

Courbe contrainte-déformation

Faciès de rupture : non étudié



Cette barre appartient au type **1L** de la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer. L'analyse à l'échelle macroscopique montre qu'elle se compose d'un lopin majoritairement ferritique soudée à un lopin majoritairement aciéré. La ligne de soudure relie deux parties aciérées. Dans cette barre, trois sections ont été considérées. Pour chacune d'entre elles, deux éprouvettes ont été prélevées.



Schéma interprétatif de la barre SM2.7 après observation à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement des éprouvettes (encadré rouge)



E(GPa)	190
Re _{0,2} (MPa)	165
σ _M (MPa)	232
A%	7,2

Courbe contrainte-déformation

Comportement mécanique :

Faciès de rupture :



Faciès de rupture de l'éprouvette SM2.7.1EI observée au MEB a) Striction observée sur l'éprouvette b) Cupules typiques d'une rupture ductile c) Grosses inclusions présentes dans la zone de rupture d) Détails des inclusions

Etude métallographique :



a) Carte de distribution des teneurs en carbone dans l'éprouvette SM2.7.1EI b) Inclusion observée dans la zone de rupture

L'éprouvette SM2.7.1EI présente un comportement ductile comme l'atteste la présence de nombreux cupules visibles par l'observation du faciès de rupture au MEB. Elle est composée de façon quasi exclusive de ferrite aux grains équiaxes, quelques zones d'acier de teneur en carbone inférieur à 0,3% ont été observées en périphérie de l'éprouvette. De nombreuses inclusions ont été observées sur l'ensemble de la surface de l'éprouvette et au niveau de la zone de rupture. L'analyse du faciès de rupture au MEB montre de nombreuses grosses inclusions dans la zone de rupture. Elle montre également une striction de l'éprouvette.



Schéma interprétatif de la barre SM2.7 après attaque à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement des éprouvettes (encadré rouge)

Comportement mécanique :



E(GPa)	238
Re _{0,2} (MPa)	168
σ _M (MPa)	256
A%	13,2

Courbe contrainte-déformation

Faciès de rupture : non étudié



Schéma interprétatif de la barre SM2.7 après observation à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement des éprouvettes (encadré rouge)

Comportement mécanique :



E(GPa)	194
Re _{0,2} (MPa)	129
$\sigma_{M}(MPa)$	214
A%	6

Courbe contrainte-déformation

Faciès de rupture : non étudié

Etude métallographique :



Carte de distribution des teneurs en carbone dans l'éprouvette SM2.7.2EI

L'éprouvette SM2.7.2EI est hétérogène. Elle comporte à la fois des zones ferritiques et des zones aciérées. La rupture a eu lieu dans une zone elle-même hétérogène.

Eprouvette SM2.7.2EII



Schéma interprétatif de la barre SM2.7 après observation à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement des éprouvettes (encadré rouge)

Comportement mécanique :



E(GPa)	258
Re _{0,2} (MPa)	157
σ _M (MPa)	237
A%	3,5

Courbe contrainte-déformation

Faciès de rupture : non étudié



Schéma interprétatif de la barre SM2.7 après observation à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement des éprouvettes (encadré rouge)



E(GPa)	201
Re _{0,2} (MPa)	/
σ _M (MPa)	141
A%	0,2

Courbe contrainte-déformation

Faciès de rupture : non étudié



Schéma interprétatif de la barre SM2.7 après observation à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement des éprouvettes (encadré rouge)

Comportement mécanique :



E(GPa)	212
Re _{0,2} (MPa)	158
σ _M (MPa)	190
A%	2.4

Courbe contrainte-déformation

Faciès de rupture : non étudié



Cette barre appartient au type **1L** de la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer. L'analyse à l'échelle macroscopique montre qu'elle se compose d'un lopin ferritique soudé à un lopin majoritairement aciéré. Dans cette barre, une section a été considérée dans la zone aciérée, et une éprouvette a été extraite de cette section.



Schéma interprétatif de la barre SM2.8 après observation à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement des éprouvettes (encadré rouge)



E(GPa)	219
Re _{0,2} (MPa)	170
σ _M (MPa)	246
A%	15.3

Comportement mécanique :

Courbe contrainte-déformation

Faciès de rupture :



Faciès de rupture de l'éprouvette SM2.8.1EI observée au MEB a) Grosses inclusions présentes dans la zone de rupture sur l'éprouvette b) Cupules typiques d'une rupture ductile

Etude métallographique :



a) Carte de distribution des teneurs en carbone dans l'éprouvette SM2.8.1EI b)c) d) Grains de ferrite de taille variable

L'éprouvette SM2.8.1EI présente un comportement ductile comme l'atteste la présence de nombreux cupules visibles par l'observation du faciès de rupture au MEB. Elle est composée uniquement de ferrite et très peu d'inclusions ont été observées sur l'ensemble de la surface de l'éprouvette. La zone de rupture n'a pu être observée de façon convaincante en microscopie optique car elle était endommagée. L'analyse du faciès de rupture au MEB montre quelques inclusions dans une partie de la zone tandis que le reste en est exempte.

Barre SM6.9



Cette barre appartient au type 6C de la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer. L'analyse à l'échelle macroscopique montre qu'elle est hétérogène en termes de nature de métal. Une section, reflétant cette hétérogénéité a été considérée, et une éprouvette a été extraite de cette section.



Schéma interprétatif de la barre SM6.9 après attaque à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement de l'éprouvette (encadré rouge)

Comportement mécanique :



E(GPa)	178
Re _{0,2} (MPa)	122
σ _M (MPa)	205
A%	5,5

Courbe contrainte-déformation

Faciès de rupture : non étudié



a) Carte de distribution des teneurs en carbone dans l'éprouvette SM6.9.1EI b) Acier à 0,2% de carbone environ et inclusions c) Zone d'amorce de rupture d) Zone majoritairement ferritique

L'éprouvette SM6.9.1EI se compose de ferrite et d'acier. De nombreuses inclusions ont été observées sur l'ensemble de la surface de l'éprouvette. Il est intéressant de noter que deux zones de rupture ont été en compétition au moment de la mise sous tension de l'éprouvette, toutes deux très proches dans une zone d'acier à 0,2%C.



Cette barre appartient au type **1M** de la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer. L'analyse à l'échelle macroscopique montre qu'elle se compose majoritairement de ferrite ou d'acier dont la teneur en carbone est inférieure à 0,2%. Dans une de ses parties extrêmes, l'acier à plus forte teneur en carbone est présent. Dans cette barre, une section a été considérée dans une zone ferritique ou peu carburée, et une éprouvette a été extraite de cette section.



Schéma interprétatif de la barre SM2.7 après observation à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement des éprouvettes (encadré rouge)



Comportement mécanique :

E(GPa)	240
Re _{0,2} (MPa)	190
σ _M (MPa)	249
A%	6,7

Courbe contrainte-déformation
Faciès de rupture :



Faciès de rupture de l'éprouvette SM9.5.1EI observée au MEB a) Cupules typiques d'une rupture ductile b) Inclusion au fond d'une cupule c) Grosses inclusions présentes dans la zone de rupture d) Vue de détail d'une inclusion

Etude métallographique :

L'éprouvette SM.9.5EI présente un comportement ductile comme l'atteste la présence de nombreux cupules visibles par l'observation du faciès de rupture au MEB. L'éprouvette n'a pu être analysée mais nous avons étudié une des faces collées à l'éprouvette. Elle est composée de façon exclusive de ferrite aux grains équiaxes. De nombreuses inclusions ont été observées sur l'ensemble de la surface de l'éprouvette. L'analyse du faciès de rupture au MEB montre de nombreuses grosses inclusions dans la zone de rupture pouvant l'avoir amorcée.



Cette barre appartient au type **1M** de la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer. L'analyse à l'échelle macroscopique permet de refléter l'hétérogénéité en termes de nature de métal de cette barre. Une section a été considérée, et une éprouvette a été extraite de cette section.



Schéma interprétatif de la barre SM9.7 après observation à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement des éprouvettes (encadré rouge)



Comportement mécanique :

E(GPa)	185
Re _{0,2} (MPa)	151
σ _M (MPa)	241
A%	11,5

Courbe contrainte-déformation

Faciès de rupture : non étudié

Etude métallographique :



a) Carte de distribution des teneurs en carbone dans l'éprouvette SM9.7.1EI b) Ecrouissage des grains de ferrite au niveau de la zone de rupture c) Variation importante de la taille des grains de ferrite d) Zone d'acier à 0,1% de carbone environ en périphérie de l'éprouvette

L'éprouvette SM9.7.1EI est entièrement ferritique. La taille des grains de ferrite est très variable, elle varie de 20 µm à 800 µm.



Cette barre appartient au type 4L de la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer. L'analyse à l'échelle macroscopique montre qu'elle se compose majoritairement de quatre lopins ferritiques ou peu carburés soudés entre eux. Une section a été considérée dans une partie ferritique n'incluant pas de soudure, et une éprouvette a été extraite de cette section.



Schéma interprétatif de la barre SM24.5 après attaque à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement de l'éprouvette (encadré rouge)



E(GPa)	148
Re _{0,2} (MPa)	/
σ _M (MPa)	178
A%	0,2

Courbe contrainte-déformation

Faciès de rupture : non étudié

Etude métallographique : non réalisée



Cette barre appartient au type **4L** de la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer. L'analyse à l'échelle macroscopique montre qu'elle se compose majoritairement de quatre lopins aciérées soudées bout à bout. Deux sections ont été considérées. L'une d'entre elles contient une soudure. Pour chacune d'entre elles, deux à trois éprouvettes ont été extraites. Au total, cinq éprouvettes sont usinées à partir de cette barre.

Eprouvette SM24.6.1EI

Comportement mécanique :



Schéma interprétatif de la barre SM24.6 après observation à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement des éprouvettes (encadré rouge)

Contrainte (MPa) **Déformation (%)**

E(GPa)	208
Re _{0,2} (MPa)	212
$\sigma_{M}(MPa)$	292
A%	3,6

Courbe contrainte-déformation

Faciès de rupture : non étudié

Etude métallographique :



a) Carte de distribution des teneurs en carbone dans l'éprouvette SM24.6.1EI b) Acier à 0,8%C et fissures intergranulaires c) Acier à 0,4%C dans la zone de la rupture d) Grains de ferrite équiaxes

L'éprouvette SM24.6.1EI se compose d'une partie aciérée et d'une partie ferritique. La rupture a eu lieu dans la partie aciérée.



Schéma interprétatif de la barre SM24.6 après observation à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement des éprouvettes (encadré rouge)

Comportement mécanique :



E(GPa)	196
Re _{0,2} (MPa)	/
σ _M (MPa)	166
A%	0,1

Courbe contrainte-déformation

Faciès de rupture : non étudié

Etude métallographique : non réalisée



Schéma interprétatif de la barre SM24.6 après observation à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement des éprouvettes (encadré rouge)

Comportement mécanique :



E(GPa)	242
Re _{0,2} (MPa)	178
σ _M (MPa)	217
A%	2,1

Courbe contrainte-déformation



Faciès de rupture de l'éprouvette SM24.6.2EI observée au MEB a) A gauche forte présence de grosses inclusions, à droite cupules typiques d'une rupture ductile b et c) Grosses inclusions présentes dans la zone de rupture d) Détails des cupules

Etude métallographique :



a) Carte de distribution des teneurs en carbone dans l'éprouvette SM24.6.2EI b) Inclusion observée dans la zone de rupture c) Inclusions dans la matrice ferritique au niveau du corps de l'éprouvette d) Grains de ferrite équiaxes

L'éprouvette SM24.6.2EI se compose uniquement de ferrite et présente de nombreuses inclusions. Certaines sont présentes au niveau de la zone de rupture comme le montre la micrographie b et l'étude du faciès de rupture. Ces dernières pourraient donc avoir joué le rôle d'amorceur de la rupture.



Schéma interprétatif de la barre SM24.6 après observation à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement des éprouvettes (encadré rouge)

Comportement mécanique :



E(GPa)	209
Re _{0,2} (MPa)	188
σ _M (MPa)	263
A%	7,3

Courbe contrainte-déformation

Faciès de rupture : non étudié

Etude métallographique : non réalisée



Schéma interprétatif de la barre SM24.6 après observation à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement des éprouvettes (encadré rouge)

Comportement mécanique :



E(GPa)	296
Re _{0,2} (MPa)	205
σ _M (MPa)	300
A%	13

Courbe contrainte-déformation

Faciès de rupture : non étudié

Etude métallographique :



a) Carte de distribution des teneurs en carbone dans l'éprouvette SM24.6.2EIII b) Grains écrouis au niveau de la zone de rupture c) Grains de ferrite équiaxes d) Inclusion observée dans un des mors de l'éprouvette

L'éprouvette SM24.6.2EIII est composée exclusivement de ferrite. Les grains sont équiaxes sauf au niveau de la zone de rupture où ils sont écrouis sous l'action de la striction de l'éprouvette. Les inclusions sont inégalement réparties. On note une forte présence d'inclusions dans la partie gauche (*cf*.carte de distribution) tandis que la partie droite en est quasiment exempte. Il est à noter que la rupture n'a pas eu lieu dans la partie riche en inclusions et que peu d'inclusions ont été observés au niveau de la zone de rupture par observations microscopiques.



Cette barre appartient au type **2M** de la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer. L'analyse à l'échelle macroscopique montre qu'elle se compose d'acier et de ferrite, elle est hétérogène. Deux sections ont été considérées. Une éprouvette a été extraite de la première section, et deux de la deuxième.



Schéma interprétatif de la barre SM25.3 après observation à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement des éprouvettes (encadré rouge)



E(GPa)	183
Re _{0,2} (MPa)	165
σ _M (MPa)	270
A%	9.5

Courbe contrainte-déformation

Comportement mécanique :

Faciès de rupture :



Faciès de rupture de l'éprouvette SM25.3.1EI observée au MEB a) Striction de l'éprouvette b) Cupules typiques d'un comportement ductile du matériau c) Grosses inclusions présentes dans la zone de rupture d) Détails d'une inclusion au fond d'une cupule



Etude métallographique :

Carte de distribution des teneurs en carbone dans l'éprouvette SM25.3.1EI

L'éprouvette SM25.3.1EI est composée majoritairement de ferrite, quelques zones aciérées ont été repérées en périphérie de l'éprouvette mais leur teneur n'excède pas 0,2%C. Les grains sont équiaxes mais présentent de grandes variations de taille. Aux abords de la zone de rupture ils sont de grandes tailles et de plus petites tailles en s'en éloignant. De nombreuses inclusions sont présentes dans la zone de rupture car l'atteste l'analyse métallographique mais aussi l'observation du faciès de rupture au MEB. Elles sont localisées au fond des cupules qui sont caractéristiques du comportement ductile du matériau.



Schéma interprétatif de la barre SM25.3 après observation à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement des éprouvettes (encadré rouge)

Contrainte (MPa) **Déformation (%)**

E(GPa)	177
Re _{0,2} (MPa)	165
σ _M (MPa)	261
A%	21

Courbe contrainte-déformation

Comportement mécanique :

Faciès de rupture :



Faciès de rupture de l'éprouvette SM25.3.2EI observée au MEB a) et b) Cupules typiques d'un comportement ductile du matériau c) Quelques inclusions rondes phosphoreuses dans les cupules d) Détails d'une inclusion au fond d'une cupule

Etude métallographique :



Carte de distribution des teneurs en carbone dans l'éprouvette SM25.3.2EI

L'éprouvette SM25.3.2EI est composée majoritairement de ferrite, quelques zones aciérées ont été repérées dans les mors de l'éprouvette. Les grains sont équiaxes et de taille identique. Les inclusions sont inégalement réparties. On note une forte présence d'inclusions dans la partie gauche (*cf*.carte de distribution) tandis que la partie droite en est quasiment exempte. Il est à noter que la rupture n'a pas eu lieu dans la partie riche en inclusions et que peu d'inclusions ont été observés au niveau de la zone de rupture par observations microscopiques.



Schéma interprétatif de la barre SM25.3 après observation à l'échelle macroscopique (d'après Pagès, 2008) et localisation de la zone sélectionnée pour prélèvement des éprouvettes (encadré rouge)

Comportement mécanique :



E(GPa)	170
Re _{0,2} (MPa)	169
σ _M (MPa)	265
A%	17,2

Courbe contrainte-déformation

Faciès de rupture :



Faciès de rupture de l'éprouvette SM25.3.2EII observée au MEB a) et b) Cupules typiques d'un comportement ductile du matériau

Etude métallographique : non réalisée

Annexe C :

Algorithme semi-automatique

Dans le cadre de ce travail, un algorithme semi-automatique visant à déterminer le pourcentage inclusionnaire (%Inc) et le taux de carbone moyen d'un échantillon (%C*), ainsi qu'à établir les cartes de distributions spatiales des différentes gammes de teneur en carbone a été proposé. Cet algorithme novateur, a déjà été présenté de façon simplifié dans le chapitre IV du volume 1 du manuscrit. Cette annexe vise à détailler plus précisément, dans une première section, le fonctionnement de l'algorithme. La section suivante vise à l'aide d'exemples choisis à illustrer le caractère répétable de l'algorithme. Pour ce faire, le processus a été répété cinq fois pour un même échantillon par un même opérateur. Les résultats similaires pour les cinq essais montrent que l'algorithme est répétable. Enfin, la dernière section compare pour quelques exemples choisis, les résultats obtenus par l'approche manuelle et par l'approche algorithmique. Les cartes de distribution des teneurs en carbone, le pourcentage inclusionnaire et le taux de carbone moyen sont similaires entre les deux approches. L'algorithme retranscrit donc fidèlement les interprétations de l'opérateur.

Glossaire : Symboles et annotations

Pour toutes les étapes de l'algorithme, nous rappelons que les images sont normalisées dans [0,1] et préalablement converties en niveaux de gris. Dans la suite du texte nous appuyons sur les définitions suivantes :

<u>Image digitale</u> : on appelle image digitale à N1 lignes et N2 colonnes, toute fonction u définie sur $\Omega = \{1, ..., N1\} \times \{1, ..., N2\}$ et à valeur dans [0,1].

$$u: \Omega \to [0,1]$$
$$p \mapsto u(p)$$

<u>Masque</u>: On appelle masque une image binaire, c'est-à-dire une image dont les pixels p sont noirs ou blancs et valent respectivement 0 ou 1 ("vrai" ou "faux" selon le contexte).

Exemple: Le "masque du métal" calculé par **Algorithme 1** est donc une image binaire qui a la même taille que l'image de l'échantillon et qui vaut 1 si et seulement si le pixel correspond à une zone métallique de l'échantillon (Figure 2).

M : sous ensemble de Ω correspondant à la partie métallique

R : sous ensemble de Ω correspondant à la résine

C : sous ensemble de Ω correspondant à la corrosion

I : sous ensemble de Ω correspondant aux inclusions

Pref : pixel correspondant à un pixel de référence sélectionné par l'opérateur

 ξ 1, ξ 2, ξ 3 : valeurs seuils

N : nombre de classes de teneurs en carbone différentes

D : pixels sombre de l'image

K : pixels correspondant à la perlite

f : noyau de convolution

 χ_i : Pixels dont la valeur est comprises dans une gamme de teneur en carbone liées aux classes de Leroy *et al.*, 2017.

Conception de l'algorithme : version détaillée

Dans cette partie, nous décrivons en détail le fonctionnement de l'algorithme permettant l'analyse des échantillons hétérogènes archéologiques. Nous rappelons que cet algorithme s'inspire de la méthode manuelle et se divise en deux sous-algorithmes (Figure 1). L'Algorithme 1 calcule une carte des inclusions et le pourcentage inclusionnaire surfacique. L'Algorithme 2 calcule la carte de distribution des différentes zones carburées au sein de l'échantillon et la teneur moyenne en carbone. Cet algorithme suppose que les images avant et après attaque au réactif Nital sont recalées, c'est-à-dire superposables. Différentes techniques peuvent être employées si le système d'acquisition ne fournit pas des images déjà recalées. Les méthodes de recalage par traitement d'images dépassent le cadre de cette thèse. Nous nous contentons d'une description sommaire ici et référons à Hartley et Zisserman (Hartley et Zisserman, 2003, part. II, chapitre 13, p.236). Parmi ces méthodes de recalage, la plus simple est utilisée pour ces travaux : la transformation affine. Pour calculer cette transformation, nous demandons à l'opérateur d'indiquer trois points de correspondance entre les deux images à recaler. L'opération de recalage est ensuite automatique. Cette opération permet de compenser toutes les différences dues à la géométrie de l'acquisition.



Figure 1 : Schéma synoptique de l'algorithme divisé en l'algorithme 1 et l'algorithme 2.

Entrée : Image métallographique de l'échantillon avant attaque

- 1) Calcul du masque de la partie métallique
- 2) Calcul du masque de la corrosion et de la résine
- 3) Calcul du masque des inclusions
- 4) Calcul du pourcentage inclusionnaire

Sorties : Masque du métal et des inclusions, masque de la partie métallique, masque des inclusions, masque de la résine, masque de la corrosion, pourcentage inclusionnaire.

L'Algorithme 1 prend en entrée l'image métallographique de l'échantillon acquise par microscopie optique avant attaque au réactif Nital. Nous considérons les quatre sous-ensembles disjoints de Ω suivants: R représente la résine, C la corrosion, M la partie métallique et I les inclusions. Ce premier algorithme vise donc à séparer ces différentes zones de l'image afin d'isoler I, tel que p \in I si et seulement si p est un pixel associé à une inclusion. En effet, on a I= Ω \{CURUM} car un pixel p appartient à un unique ensemble R, C, M ou I.

Nous commençons par expliquer le calcul de M puis donnons les éléments pour calculer CUR. La partie métallique correspond à la partie la plus claire de l'image. Elle peut donc être isolée par seuillage. Seuiller est l'opération qui consiste à détecter les pixels p de u dont les valeurs u(p) appartiennent à un intervalle donné. A priori, la valeur du seuil pourrait être fixée automatiquement par analyse de l'histogramme de l'image. Cependant, les valeurs de l'image obtenue dépendent de différents facteurs tels que l'éclairage de la pièce et les réglages internes à l'appareil (*e.g.* balance des blancs notamment). Pour nos expériences, ces facteurs ne sont pas contrôlés et influent donc implicitement sur les valeurs observées. Partant, il semble plus pertinent de définir manuellement, à l'aide de l'image, la valeur seuil P_{ref}, pour chaque nouvel échantillon. Dans l'implémentation proposée, cela est fait en sélectionnant un pixel (par un clic) dans la partie métallique. La valeur $\xi 1$ est choisie de façon empirique et a été utilisée pour chaque échantillon, et on obtient M par :

(1)
$$M := \{ p \in \Omega / | (u(p) - u(p_{ref}) | \leq \xi_1 \}$$

On remarque que $\Omega \setminus M$ contient toutes les régions plus sombres que la partie métallique. Il contient donc les inclusions mais aussi la résine et la corrosion. On remarque également que CUR est le plus grand sous-ensemble connexe de $\Omega \setminus M$. Il peut donc être obtenu par une méthode de segmentation d'image par croissance de région (« *region growing*¹ »en anglais). Cette technique

¹ Version 2 Adrian Becker 08/02/2017 available on Mathworks

compare de proche en proche la valeur d'un pixel à celui de ses voisins. Si l'écart entre deux pixels voisins est inférieur à une valeur seuil ξ_2 alors le pixel est intégré à la région. Le procédé est répété tant que de nouveaux pixels sont ajoutés à la région. Cette méthode permet donc d'extraire la plus grande région connexe à partir d'un point (appelé graine) et dont tous les pixels ont une valeur proche de celle de la graine. Pour appliquer cette méthode, il nous faut donc choisir une graine et fixer un seuil. Dans notre cas, la graine est choisie à une position qui correspond à la résine. Dans nos expériences, le pixel (2,2) est systématiquement utilisé car la préparation de l'échantillon garantit qu'il correspond toujours à une zone de résine. La valeur seuil ξ_2 est définie de façon empirique et a été employée pour tous les échantillons. Cette méthode permet donc de calculer CUR (Figure 2c), et I (Figure 2d) est immédiatement déduit en combinant M et CUR car on rappelle que I= Ω \{CURUM}. Les différents sous-résultats et résultats de cet algorithme sont présentés en Figure 2. Le pourcentage inclusionnaire de la zone métallique est ensuite calculé² :

(2)
$$100 * \frac{card(I)}{card(M \cap I)}$$

² Card représente le nombre de pixels du masque considéré





Entrée : Image métallographique de l'échantillon après attaque au réactif Nital recalée sur la l'image de l'échantillon avant attaque au réactif Nital, masque du métal et des inclusions, masque de la partie métallique M, masque des inclusions I, masque de la résine et de la corrosion $C\cup R$ obtenus par l'Algorithme 1.

Paramètres : taille du flou (en pixels), nombre N de classes de carbone.

- 1. Extraction des pixels correspondant à la perlite par seuillage
- 2. Application d'un flou sur le masque seuillé
- 3. Segmentation de l'image en N classes
- 4. Obtention des N masques correspondant aux N classes de carbone
- 5. Calcul de la teneur moyenne en carbone

Sorties : Masques des pixels correspondant à la perlite avant et après application du flou, masque de la partie métallique après application du flou, N masques correspondant aux différentes zones carburées, pourcentage surfacique occupé par chacune des classes de carbone, carte de distribution des teneurs en carbone, teneur moyenne en carbone

L'Algorithme 2 prend en entrée l'image métallographique de l'échantillon acquise par microscopie optique après attaque au réactif Nital. Pour rappel, cet algorithme estime la teneur en carbone locale de l'échantillon afin d'établir une carte de distribution des teneurs en carbone en fonction des différentes gammes (ou classes) précédemment définies (*Leroy et al. 2017*). A partir de cette carte, la teneur moyenne en carbone peut être déduite. Dans la suite, nous supposons que l'hypothèse \mathcal{H} est vérifiée. Pour rappel, cette hypothèse est la suivante : « *La teneur locale en carbone d'un échantillon est reliée, par une fonction inversible, au niveau de gris local observé après attaque au réactif Nital* ». Le protocole employé est donc similaire à celui employé pour les échantillons modernes décrits dans le chapitre IV, du volume 1.

Tous les pixels sombres D de l'image (perlite, corrosion, résine et inclusions) sont d'abord extraits par seuillage (Figure 3). La valeur du seuil, pour calculer D, est fixée à 0,7 et est conservée pour toutes les expériences. Ce choix a été justifié pour les échantillons modernes (*cf.* chapitre IV, volume 1) et se justifie ici aussi pour les échantillons archéologiques hétérogènes.



(a) Image métallographique après attaque Nital, recalée et convertie en niveaux de gris

Figure 3 : Etape 1 de l'algorithme 2 : obtention du masque D.

Cet ensemble D peut se ré-écrire D = KURUCUI, où K représente le carbone/perlite, R la résine, C la corrosion et I les inclusions. Les régions R, C, et I ont déjà été calculées par **Algorithme 1**. Le carbone/perlite K est donc simplement obtenu par différence K = D\(RUCUI).

(b)

D

Remarque: L'opération qui consiste à moyenner localement (sur un carré par exemple) les valeurs des pixels d'une image rendent cette image floue. Cette moyenne peut, comme c'est le cas plus bas, utiliser des coefficients non-constants et l'opération est appelée "convolution" (Briane et Pagès, 2012). Si l'image est 1_K ($1_K(x) = 1$ si $x \in K$ et 0 sinon), les coefficients (ou noyau) sont f et que cette opération de convolution est notée *, alors l'image obtenue est f* 1_K . L'utilisation de fonctions indicatrices est classique et 1_K permet de définir puis de calculer une notion de flou à des ensembles.

On rappelle que nous supposons que le taux de carbone est localement constant. Cette opération de convolution permet d'appliquer \mathcal{H} localement dans l'image. Les images que nous manipulons pour cette thèse sont relativement grandes³. Il faut donc veiller à utiliser des méthodes de calcul suffisamment efficaces. Cette opération de convolution se calcule rapidement (en N log N) grâce à un algorithme rapide appelé FFT (Briane et Pagès, 2012) et peut donc être utilisée. D'autres méthodes de calcul rapide existent (*e.g.* images intégrales) mais n'ont pas été considérées dans ces travaux. Cette opération de convolution rend floue l'image de l'objet et les bords de cet objet « bavent » et deviennent mal définis comme on peut le voir dans la Figure 4b. Pour solutionner

On a :

³ Les images les plus grandes peuvent atteindre 15000 x 15000 pixels.

ce problème aux bords de l'objet, la même opération de convolution est appliquée à 1_M et on considère dans la suite :

$$\widehat{M} = f * 1_M$$

(5)
$$\widehat{K} = f * 1_K$$

(6)
$$blurry_{carbon}(p) = \begin{cases} \frac{\widehat{K}(p)}{\widehat{M}(p)} & si \ \widehat{M}(p) \neq 0\\ 0 & sinon \end{cases}$$



Figure 4 : Résultats obtenus après application de la convolution.

Comme on peut le voir en comparant les Figure 4b et 4e le problème de flou aux bords de l'objet est résolu.

Dans l'image « blurry_carbon », le niveau de gris de chaque pixel est lié à la teneur locale en carbone. Pour obtenir les classes de Leroy *et al.* (Leroy *et al.*, 2017), il nous suffit donc de segmenter cette image en N classes. Segmenter une image digitale consiste à découper Ω en une collection totale de sous-ensembles disjoints. Chacune de ces N classes de teneur en carbone correspond à un masque.

Pour calculer ces classes, il est envisageable d'utiliser des algorithmes automatiques. Toutefois, le système d'acquisition que nous utilisons est non calibré. Pour cette raison, il nous semble préférable de recourir à une alternative supervisée qui repose sur un seuillage. Nous décrivons maintenant la méthodologie employée. L'utilisateur doit choisir un pixel représentant la classe la plus carburée (*e.g.* classe 5) puis un représentant de la classe inférieure (*e.g.* classe 4) et ainsi de suite jusqu'à la dernière classe. Concrètement, si la zone la plus carburée de l'image est celle correspondant à la classe $0,7 \le \%$ C < 0,9, alors l'opérateur doit cliquer dans une zone à l'eutectoïde soit 0,8% de carbone. Cette action va permettre d'extraire toutes les zones de l'image dont la teneur en carbone est proche de l'eutectoïde et donc définir le masque correspondant à cette classe de teneur en carbone. Le nombre d'interventions de l'opérateur (clics à effectuer) correspond au nombre de classes de teneur en carbone représentées sur l'image métallographique. Ces N (au plus 5) clics permettent de définir les seuils utilisés par la segmentation.

Pour calculer ces seuils, on considère la collection des N clics de l'utilisateur et les valeurs des pixels associés blurry(p₁),..., blurry(p_N). Les N intervalles sont définis de la façon suivante: le premier est $\begin{bmatrix} 0, \frac{blurry_{carbon}(p_1)+blurry_{carbon}(p_2)}{2} \end{bmatrix}$, le second est $\begin{bmatrix} \frac{blurry_{carbon}(p_1)+blurry_{carbon}(p_2)}{2} \end{bmatrix}$, $\frac{blurry_{carbon}(p_2)+blurry_{carbon}(p_3)}{2}$, le n^{ème} est $\begin{bmatrix} \frac{blurry_{carbon}(p_{N-1})+blurry_{carbon}(p_N)}{2} \end{bmatrix}$. Chaque classe χ_i correspond au seuillage de l'image sur ces intervalles de valeurs. L'ensemble des masques obtenus, assemblés, permet d'obtenir une cartographie des classes de teneur en carbone (Figure 5).



Figure 5 : Différents masques obtenus après segmentation de l'image floue et carte finale de distribution des zones carburées.

A partir de cette carte, la teneur moyenne en carbone peut être calculée. En effet, le pourcentage surfacique du masque Ci correspond à :

(7)
$$C_i = \frac{card(\chi_i)}{card(\cup\chi_i)} \ge 100$$

Et le taux de carbone moyen est :

(8)
$$\%C^* = (C_1 \times 0.06 + C_2 \times 0.2 + C_3 \times 0.4 + C_4 \times 0.6 + C_5 \times 0.8) / 100$$



13382-5b - Castel-Minier

5 mm



%Inc =1,52 %C* =0,23



%Inc = 1,52 %C*=0,25



%Inc = 1,57 %C*=0,24



%Inc = 1,49 %C*=0,23



%Inc = 1,48 %C*=0,24



13570-3b - Castel-Minier 5 mm



%Inc = 2,10 %C*= 0,24



%Inc = 2,10 %C*=0,21



%Inc = 2,10 %C* = 0,25



%Inc = 2,10 %C* = 0,21



%Inc = 2,10 %C* = 0,21



%Inc = 0,67 %C* = 0,72

%Inc=0,72 %C*=0,7



13382-1 - Castel-Minier







%Inc = 2,09 %C*= 0,22



%Inc = 2,06 %C*= 0,20



%Inc = 2,03 %C*=0,20



%Inc = 2,17 %C*= 0,21



13382-8b - Castel-Minier



%Inc = 4,12 %C*= 0,19



%Inc = 4,20 %C*=0,20



%Inc = 4,42 %C*=0,19



%Inc = 4,19 %C*=0,21



%Inc = 4,29 %C*=0,18

Comparaison entre les approches manuelle et algorithmique

• Echantillon 11887b



• Echantillon 13383-10b



Approche manuelle :

%Inc : 1,17 %C* : 0,64

Approche algorithmique:

%Inc : 1,16 %C* : 0,63

• Echantillon 12247-3a



Approche manuelle :

%Inc : 2,40 %C* : 0,38

Approche algorithmique :

%Inc : 2,57 %C* : 0,38 • Echantillon 12247-3b



• Echantillon 13570b :



• Echantillon 13381-6 :


Echantillon 12678-4-7b : •



%Inc: 1,22 %C*: 0,32

Approche algorithmique: %C* : 0,32 %Inc : 1,37

Echantillon 13383-3a : •



Echantillon 13383-3b : •



• <u>Echantillon 13383-9b :</u>



• Echantillon 13383-10a :



• <u>Echantillon 13383-8b :</u>



Echantillon 13382-17a : •



Approche manuelle : %Inc: 1,7 %C*: 0,16

Echantillon 13382-17b :



Approche algorithmique: 5 mm %Inc : 1,6 %C*:0,17



Approche manuelle :

%Inc : 1,52 %C*:0,26

Approche algorithmique :

%Inc : 0,24 %C*:0,52

Echantillon 13382-5b :





Manuel

Algorithme



Approche manuelle :

%Inc : 2,2 %C* : 0,2

Approche algorithmique :

%Inc : 2,01 %C* : 0,19

• Echantillon 12678-3-9b :



0,9-2,1 0,7-0,9 0,5-0,7 0,3-0,5 0,1-0,3 <0,1

Approche manuelle :

%Inc : 2,7 %C* : 0,45

Approche algorithmique :

%Inc : 2,9 %C* : 0,41

• Echantillon GL07-132b :

> 2,1



Approche manuelle : %Inc : 2,82 %C* : 0,18
 S mm

 Approche algorithmique:

 %Inc : 0,92
 %C* : 0,23

• Echantillon 13509 :



• Echantillon 13382-4b :



Echantillon 13382-8b : •



Approche manuelle : %Inc : 4,5 %C* : 0,17



%Inc : 4,2 %C* : 0,20

Annexes D :

<u>Tableau récapitulatif par ordre chronologique des</u> <u>différents sites issus de la bibliographie et considérés</u> <u>dans le chapitre VI</u>

Nom du site	Commune, département	Chronologie	Contexte / Type d'activités	Nature des découvertes pertinentes pour notre étude	Références bibliographiques
Krakow	Pologne	IX ^{ème} siècle avant notre ère	Dépôt	Currency bars	(Crew, 1994; Nosek et Mazur, 1995)
Durrenentzen	Durrentzen,Haut-Rhin	Premier Âge du Fer (800 - 400 avant notre ère)	Dépôt	Bipyramidés	(Bauvais et al., 2017; Berranger et al., 2017)
Marsal	Marsal, Moselle	VI ^{ème} siècle avant notre ère - V ^{ème} siècle avant notre ère		Bipyramidés	(France-Lanord, 1963; Vega et al., 2003)
Nottonville « La Pièce de la Cave »	Nottonville, Eure et Loir	VIII ^{ème} siècle avant notre ère – V ^{ème} siècle avant notre ère	Dépôt	Bipyramidés	(Berranger, 2009)
Châtillon-sur-Seine, « Vix-Le Mont Lassois »	Châtillon-sur-Seine, Côte d'Or	VI ^{ème} siècle avant notre ère - début V ^{ème} siècle avant notre ère	Habitat fortifié	Bipyramidés	(France-Lanord,1963)
Colmar, Gare de marchandise	Colmar, Haut-Rhin	/	/	Bipyramidés	(France-Lanord,1963) (Berranger, 2009)
Bragny-sur-Saône	Bragny-sur-Saône, Saône et Loire	Seconde moitié du V ^{ème} siècle avant notre ère	Centre de production, épuration et élaboration d'objet fini	Masse brute de réduction	(Orengo, 2003)
Bourges, Saint-Martin- des-Champs	Bourges, Saint-Martin- des-Champs, Cher	Troisième quart du V ^{ème} siècle avant notre ère	Agglomération, travail du fer élaboration d'objets	Masse brute de réduction	(Leroy et Merluzzo, 2007)
La Villeneuve au Châtelot « Les Grèves »	La Villeuve au Châtelot, Aube	IV ^{ème} siècle avant notre ère - I ^{er} siècle avant notre ère	Sanctuaire	Barres à extrémités roulées	(Berranger, 2009)
Bourguignon-Les- Moreys, « Le Camp Romain »	Bourguignon-Les- Moreys, « Le Camp Romain »	III ^{ème} siècle avant notre ère	Habitat fortifié	Barres à extrémités roulées	(Berranger, 2009)
Les Ferriers	Grospierres, Ardèche	II ^{ème} siècle avant notre ère	Epuration et compactage de masse brute	Gromps	(Durand et Pagès, 2015)
Bouc-Bel-Air « Le Baou Roux »	Bouc-Bel-Air « Le Baou Roux », Bouches-du- Rhône	II ^{ème} siècle avant notre ère	Activité de post-réduction	Barre quadrangulaire	(Berranger, 2009)
Saint-Maur « Les Catelets »	Saint-Maur, Oise	II ^{ème} siècle avant notre ère	Sanctuaire	Barres à extrémités roulées	(Berranger, 2009; Berranger et al., 2007)

Estrées St Denis, « Le Moulin de Haye »	Estrées St Denis, « Le Moulin de Haye », Oise	III ^{ème} siècle avant notre ère – I ^{er} siècle avant notre ère	Sanctuaire	Barres à douilles	(Bauvais, 2007; Berranger, 2009; Berranger et al., 2007)
Ribemont-sur-Ancre « Le champ Crezette »	Ribemont-sur-Ancre, Somme	III ^{ème} siècle avant notre ère – I ^{er} siècle avant notre ère	Sanctuaire	Barres à extrémités roulées	(Bauvais, 2007; Berranger, 2009; Berranger et al., 2007)
Acy Romance, La Warde	Acy-Romance, Ardennes	II ^{ème} siècle avant notre ère – milieu du I ^{er} siècle avant notre ère	Agglomération ouverte, activités de forge	Barre à soie, barre quadrangulaire	(Bauvais, 2007; Berranger, 2009)
Glux-en-Glenne, Bibracte	Nièvre, Saône-et-Loire	Fin du II ^{ème} siècle avant notre ère – I ^{er} siècle après	Oppidum, divisé en plusieurs ateliers,	Barre quadrangulaire, fragments de masses brutes, déchets métalliques	(Berranger, 2009)
Beauvais, Les Aulnes du Canada	Beauvais, Les Aulnes du Canada, Oise	Milieu du II ^{ème} siècle – Milieu du I ^{er} siècle avant notre ère	/	Barre à extrémités roulées	(Bauvais, 2007; Berranger, 2009; Berranger et al., 2007)
Chalon-sur-Saône « Gué des Piles »	Chalon-sur-Saône « Gué des Piles », Côte d'Or	/	/	Barres à extrémités roulées	(Berranger, 2009)
Condé-sur-Suippe, « La sucrerie »	Condé-sur-Suippe, Aisne	Début du I ^{er} siècle avant notre ère	Oppidum	Barres à extrémités roulées	(Bauvais, 2007; Berranger, 2009; Berranger et al., 2007)
Coulmier-Le-Sec « La Fosse »	Coulmier-le-Sec, Côte d'Or	/	/	Bipyramidé	(Mangin et al., 2000)
Camps romains de Strebersdorf	Autriche, Burgenland	I ^{er} siècle avant notre ère	Circulation (pour les artefacts considérés)	Fragments de masses brutes – Gromps- Demi- produits	(Pagès et al., 2020)
Camp gallo-romain de la Bure	Saint-Dié, Vosges	70 avant notre ère – 352 de notre ère			(Tronquart, 1986)
Mimet – La tête d'Ost	Mimet, Bouches-du- Rhône	I ^{er} siècle avant notre ère	Oppidum	Masse brute	(Berranger et Fluzin, 2007)
Entremont	Aix-en-Provence, Bouches-du-Rhône	I ^{er} siècle avant notre ère	Oppidum	Masse brute, gromps, demi-produits	(Berranger et Fluzin, 2007)
Piani d'Erna	Italie	210 avant notre ère – 60 de notre ère	Activité de réduction du minerai de fer	Masses brutes	(Fluzin, 2006)
Semlach/Eisner	Autriche	I ^{er} siècle avant notre ère – IV ^{ème} siècle de notre ère	Activités de réduction du minerai de fer et de forge	Fragments de masses brutes - Gromps	(Birch, 2017)
Magdalensberg	Autriche	I ^{er} siècle avant notre ère – IV ^{ème} siècle de notre ère	Activités de réduction du minerai de fer et de forge	Fragments de masses brutes - Gromps	(Straube, 1996)
Epave de Bagaud 2	Bagaud, Hyères, Var	II ^{ème} - I ^{er} siècle avant notre ère	Circulation	Barres de fer	(Pagès, 2008)

Levroux, « Les Arènes »	Levroux, Indre	II ^{ème} – début I ^{er} siècle avant notre ère	Agglomération ouverte, découpée en plusieurs secteurs, forge d'élaboration, épuration de masses brutes	Barres à extrémités roulées	(Berranger, 2009)
Alésia	Alise-Sainte-Reine, Haut- Auxois, Côte-d'Or	I ^{er} siècle avant notre ère	Activité de forge, de stockage	Deux blocs de fer partiellements compactés, des barres effilées	(Fluzin, 2000a; Mangin et al., 2000; Merluzzo et al., 2014; Pleiner et al., 2003)
Blessey-Salmaise	Haut-Auxois, Côte-d'Or	I ^{er} siècle avant notre ère	Activité de forge, de stockage	Chute de forge, proche pour certaines du demi- produit	(Mangin et al., 2000)
Villa de Touffréville	Touffréville, Calvados	I ^{er} siècle de notre ère	Forge d'élaboration	Demi-produit parallélépipédique, déchets d'épuration de masses brutes	(Berranger et al., 2014)
Ambrussum	Villetelle, Hérault	I ^{er} siècle de notre ère	Forge	Demi-produit en cours d'épuration, et débité	(Pagès, 2008)
Lunel-Viel	Lunel-Viel, Hérault	II ^{ème} siècle	Forge de campagne	Demi-produit	(Pagès, 2008)
Auribelle-Basse	Auribelle-Basse, Hérault	II ^{ème} siècle	Atelier de transformations des demi-produits	Demi-produit	(Pagès, 2008)
Vichy	Vichy, Allier	III ^{ème} siècle	Cave d'habitat urbain	Demi-produit	(Pagès, 2010)
Madeleine II	Clermont l'Hérault, Hérault	IV ^{ème} – V ^{ème} siècle de notre ère	Epuration de masses brutes, Forge	Fragments de masses brutes	(Pagès, 2008)
Etablissement perché du Roc de Pampelune	Argelliers, Hérault	VI ^{ème} siècle de notre ère	Activité d'épuration de masses brutes, de mise en forme de demi-produits et d'élaboration d'objet fini	Demi-produits,fragments de masses brutes	(Pagès, 2008; Pagès et al., 2005)
Develier-Courtételle	Suisse, canton du Jura	VI ^{ème} siècle de notre ère - VII ^{ème} siècle de notre ère	Habitat rural mérovingien, forge	Chute de travail pouvant pour certaines s'apparenter à des demi- produits	(Eschenlohr et al., 2007)
Hameau des Noires Terres	Messein, Meurthe-et- Moselle	VI ^{ème} siècle de notre ère - VIII ^{ème} siècle de notre ère	Chaîne opératoire complète : de la réduction à l'élaboration d'objet	Chute de type chute de barre	(Leroy et al., 2019)
Ludres	Ludres, Meurthe-et- Moselle	VIII ^{ème} siècle de notre ère – IX ^{ème} siècle de notre ère	Activité de réduction	Scories	(Leroy, 1993)
Site de la côte du Carmel, Epave a	Côte du Carmel, Israël	XII ^{ème} siècle	Circulation (contexte maritime)	Demi-produits (barres) et masses brutes en cours de compactage	(Galili et al., 2015)

Kakü	Estonie	XIV ^{ème} siècle – XVII ^{ème} siècle	Epuration de masses brutes, mise en forme de demi-produits et élaboration d'objets finis	Barres et fragments de masses brutes en cours de compactage	(Saage et Peetsalu, 2018)
Saint-Dizier	Saint-Dizier, Haute- Marne		Ateliers sidérurgiques médiévaux	Bloc ovale proche du stade de la masse brute de réduction	(Leroy et Merluzzo, 1998)
Cathédrales de Rouen	Rouen	XIII ^{ème} siècle –début XVI ^{ème} siècle	Contexte d'utilisation	Renforts en fer de monuments historiques	(L'Héritier, 2007)
Cathédrale de Chartres	Chartres	Début XIIIème siècle	Contexte d'utilisation	Renforts en fer de monuments historiques	(L'Héritier et al., 2014; Lefebvre et Maxime, 2014)
Eglise Saint-Ouen de Rouen	Rouen	XIV ^{ème} siècle –milieu XVI ^{ème} siècle	Contexte d'utilisation	Renforts en fer de monuments historiques	(L'Héritier, 2007; L'Héritier et al., 2005)
Palais des Papes	Avignon	XIII ^{ème} siècle –XIV ^{ème} siècle	Contexte d'utilisation	Renforts en fer de monuments historiques	(Bernardi et Dillmann, 2002; Dillmann et al., 2003; Dillmann et Bernardi, 2003)
Cathédrale de Metz	Metz	XIII ^{ème} siècle -XV ^{ème} siècle	Contexte d'utilisation	Renforts en fer de monuments historiques	(Disser et al., 2014)
Château de Vincennes	Vincennes	XIV ^{ème} siècle	Contexte d'utilisation	Renforts en fer de monuments historiques	(Juhin, 2005)
Cathédrale Saint- Etienne d'Auxerre	Auxerre	XIV ^{ème} siècle	Contexte d'utilisation	Renforts en fer de monuments historiques	(Aumard et al., 2011)
Hôtel de ville de Bruxelles	Bruxelles	XV ^{ème} siècle	Contexte d'utilisation	Renforts en fer de monuments historiques	(L'Héritier et al., 2018)
Cathédrale de Troyes	Troyes	XVI ^{ème} siècle	Contexte d'utilisation	Renforts en fer de monuments historiques	(L'Héritier, 2007)
Saint-Gervais	Paris	XVII ^{ème} siècle	Contexte d'utilisation	Renforts en fer de monuments historiques	Communication personnelle
Forge de Montagney	Montagney-Servigney, Doubs	Fin XVII ^{ème} siècle – XIX ^{ème} siècle	Activité de réduction et mise en forme de demi- produits	Barre de métal sous forme de tige	(Fluzin, 2000b)