

Philippe Dillmann,
Liliane Pérez & Catherine Verna

L'acier en Europe avant Bessemer



CNRS / Université de Toulouse-Le Mirail
MÉRIENNES

Histoire & Techniques

L'acier en Europe avant Bessemer

Illustration de couverture :

Wallace collection (Londres), pièce 143 « Spanish Morion » ; casque cabasset d'origine milanaise, 1575-1590, reproduit avec l'aimable autorisation des Trustees de la Wallace collection, Londres.

By kind permission of the Trustees of the Wallace Collection, London

Le colloque « L'acier en Europe avant Bessemer » a profité du soutien du programme ANR ACEUR « L'acier dans le sud de l'Europe : production, diffusion, emploi, altération. Approche interdisciplinaire et diachronique », de l'ACI-CNRS « Savoirs du fer », de l'Université Paris 8, de la Délégation générale pour l'Armement, du Leverhulme Trust Foundation, du Laboratoire Métallurgies et Cultures IRAMAT/UMR5060, du Centre d'Histoire des Techniques et de l'Environnement (CDHTE) du Cnam et du Musée des Arts et Métiers.

Maquette et mise en pages :

Micro Édition 31, 5 impasse G. Apollinaire, 31240 Saint-Jean

Luis González Fernández

Responsable scientifique de la Collection Méridiennes

© Collection « Méridiennes », 2011

Série « Histoire et Techniques »

ISBN : 978-2-912025-70-8

ISSN : 1774-3168

Adresse à laquelle ce volume peut-être commandé :

FRAMESPA (UMR 5136)

Maison de la Recherche

Université Toulouse II-Le Mirail

5, allées Antonio Machado

F-31058 Toulouse Cedex 9

Tél. : 05 61 50 44 17

Fax. : 05 61 50 49 64 E-mail : framespa@univ-tlse2.fr

L'acier en Europe avant Bessemer

Sous la direction de
Philippe Dillmann
Liliane Pérez
Catherine Verna

Actes du colloque international,
Conservatoire national des Arts et Métiers, Paris,
les 8, 9, 10 décembre 2005

CNRS - Université Toulouse-Le Mirail
Collection « Méridiennes »
Série « Histoire et Techniques »

Série « Histoire et Techniques »

Publiée sous l'égide
du laboratoire FraMEspa - CNRS/ Université Toulouse II-Le Mirail,
du Centre d'histoire des techniques et de l'environnement du Cnam
et de l'Université Paris 8

La série « Histoire et Techniques » est conçue comme un lieu d'accueil et de diffusion des travaux récents en histoire des techniques. Le cadre chronologique est large : il court de l'Antiquité à la période contemporaine. Les perspectives épistémologiques sont plurielles : la collection est le reflet de la diversité des démarches des historiens des techniques. Elle répond aussi à la curiosité de tous ceux pour qui une réflexion sur les techniques et leur place dans le monde actuel doit s'enrichir d'une analyse historique.

Responsables de la série :

Jean-Michel Minovez (UTM/FraMEspa)

Liliane Pérez (Université Paris 7)

Catherine Verna (Université Paris 8)

Conseil scientifique :

Jean-François Belhoste (EPHE) ; Philippe Braunstein (EHESS) ; Dominique Cardon (CNRS) ; Serge Chassagne (Université Lyon II) ; Gérard Chastagnaret (Casa de Velázquez) ; Yves Cohen (EHESS) ; André Guillaume (CDHTE-Cnam) ; Mireille Mousnier (UTM/FraMEspa) ; Denis Woronoff (Université Paris I-Panthéon Sorbonne)

Table des matières

Les aciers avant Bessemer <i>Philippe Dillmann, Liliane Pérez, Catherine Verna</i>	7
IDENTIFIER ET DÉFINIR L'ACIER	
À propos de la qualité des fers produits par la méthode directe de réduction <i>Vincent Serneels</i>	73
Les propriétés physiques des métaux et des alliages	73
Le fer et le carbone	74
<i>Le vocabulaire et les acquis de la métallurgie moderne</i>	74
<i>La perspective de la méthode directe de réduction</i>	77
<i>Effet du travail du métal dans le foyer de forge sur la teneur en carbone</i>	79
Le fer et les autres éléments d'alliage de « bonne réputation »	80
<i>Le vocabulaire et les acquis de la métallurgie moderne</i>	80
<i>La perspective de la méthode directe de réduction</i>	81
<i>La forge et les éléments d'alliage</i>	85
Le fer et les éléments ayant « mauvaise réputation »	86
<i>Le vocabulaire et les acquis de la métallurgie moderne</i>	86
<i>La perspective de la méthode directe de réduction</i>	88
Les défauts dans le métal	90
Conclusion	92
L'acier dans la minéralogie et l'alchimie médiévales <i>Jean-Marc Mandosio</i>	95
Minéralogies aristotéliennes	97
La théorie alchimique et son influence	102

An Edge of Steel

<i>M. Joan Unwin, Marion E. Unwin</i>	111
Cutlery manufacturing industry in Sheffield	111
The Storehouse of the Cutlers' Company, 1680s.....	113
Advanced non-destructive evaluation techniques	117
Background theory	118
Experimental techniques and samples.....	120
Results.....	123
<i>The three-layer plane iron</i>	123
<i>16th-century scissors</i>	124
<i>Summary</i>	125
Conclusions.....	126

**La question de l'acier en France au XVIII^e siècle :
l'histoire d'un rendez-vous manqué entre science et industrie**

<i>Jean-François Bellhoste</i>	129
L'acier en France au XVII ^e siècle et au début du XVIII ^e siècle	130
L'œuvre de Réaumur	131
L'après Réaumur	133
Les voyages de Jars et Duhamel	135
Expertise et théorie	136
Le grand <i>Mémoire sur le fer</i> de 1786	139
Les suites du <i>Mémoire</i>	141

ACIERS MÉDIÉVAUX : TIRER PARTI DE L'HÉTÉROGÈNE

L'acier, une variété de fer parmi d'autres ?

**Approches méthodologiques des demi-produits des épaves romaines
des Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône, France)**

<i>Gaspard Pagès, Philippe Fluzin, Luc Long</i>	147
L'approche archéométrique du demi-produit.....	149
<i>Les critères spécifiques des fers issus de la filière directe</i>	149
<i>Une observation nécessairement exhaustive</i>	150
Des épaves romaines chargées de fer au large des Saintes-Maries-de-la-Mer	154
<i>Des navires entre la Méditerranée et le Rhône</i>	154
<i>Des demi-produits standardisés</i>	156
<i>De l'archéologie à l'archéométrie : l'échantillonnage</i>	158

Bilan métallographique répertorié des demi-produits des Saintes-Maries-de-la-Mer	160
<i>Les matériaux mis en œuvre</i>	160
<i>Le travail de mise en forme</i>	163
Des qualités de demi-produits aux destinations fonctionnelles	167
<i>Pour une typo-métallographie</i>	167
<i>Des fers ordinaires et des fers spécifiques</i>	170
Conclusion	173
 L'acier dans les limes de l'Antiquité au Moyen Âge.	
Persistance des techniques	
<i>Nadine Dieudonné-Glad</i>	175
Étude métallographique de quatre limes antiques	178
<i>Corpus</i>	178
<i>Technique d'étude</i>	179
<i>Résultats</i>	180
<i>Conclusion des observations métallographiques</i>	187
La fabrication des limes au Moyen Âge d'après les recettes du moine Théophile	187
<i>Traduction</i>	189
Confrontation des données archéométriques et textuelles.....	192
Conclusion	192
 Le damas d'assemblage du haut Moyen Âge en Occident :	
étude historiographique et critique des analyses métallographiques	
<i>Aurélie Rogalla von Bieberstein, Philippe Dillmann</i>	195
Méthodologie : corpus et limites	199
<i>Représentativité des études physico-chimiques et informations apportées</i>	199
<i>Représentativité des armes analysées</i>	200
<i>Perte d'information</i>	201
L'épée damassée, la chaîne opératoire	202
<i>Niveaux d'hétérogénéité du damas</i>	202
<i>Les étapes de la chaîne opératoire : du minerai à la forge</i>	207
État des connaissances et apports des méthodes d'analyse physico- chimique	209
<i>Influence des analyses d'objets isolés sur la représentation de la technique dans les publications archéologiques</i>	210
<i>Les alliages constitutifs du damas d'assemblage et les étapes de fabrication jusque-là proposées</i>	212

<i>Questions touchant à l'aspect esthétique du damas et à sa révélation sur la surface de la lame</i>	214
Conclusion	215
Bibliographie.....	216
The first stage of metallographic examinations of the 10th to 12th centuries knives from the Premyslid stronghold at Stará Boleslav (Bohemia)	
<i>Jiří Hošek</i>	223
Method of investigation.....	223
The investigated tools	224
Quality of iron and steel artefacts.....	228
Pattern-welded knives	230
Nickel enriched zones	231
Knife 7771	231
Conclusion	231
De l'acier pour les moulins (Bourgogne et Champagne, XIV^e-XV^e siècle)	
<i>Joséphine Rouillard</i>	237
Introduction : sources et champ d'étude	237
La part du métal dans les moulins	239
L'acier.....	240
Conclusion	250
L'acier dans les outils médiévaux	
<i>Paul Benoit</i>	251
Les données comptables.....	252
<i>L'abbaye cistercienne de Beaulieu</i>	252
<i>La mine de Pampailly</i>	255
Les données analytiques.....	257
<i>Pampailly</i>	257
<i>Les mines vosgiennes</i>	258
<i>Charavines</i>	259
Conclusion	260

Fer ou acier ? Caractérisation des alliages ferreux utilisés dans la construction des églises gothiques au Moyen Âge et à la période moderne. L'exemple de Troyes et de Rouen	
<i>Maxime L'Héritier, Philippe Dillmann</i>	263
La réhabilitation par l'interdisciplinarité.....	264
L'acier dans les comptes de fabriques.....	267
Corpus d'étude.....	269
Protocole opératoire	270
Résultats des analyses.....	271
<i>Teneur en carbone</i>	271
<i>Teneur en phosphore</i>	273
<i>Propreté inclusionnaire</i>	274
<i>Discrimination des procédés de réduction</i>	274
Caractérisation des alliages ferreux employés dans la construction des églises rouennaises et troyennes.....	277
<i>Fer ou acier ?</i>	277
<i>Un matériau ordinaire</i>	278
<i>Des propriétés mécaniques limitées</i>	279
Conclusion	281
 L'ACIER DANS L'EUROPE MODERNE, MODÈLE ET DIVERSITÉ 	
Steel in Britain before and after Benjamin Huntsman: manufacture and consumption in the eighteenth century	
<i>Chris Evans</i>	285
Cementation steel in Britain.....	287
Steel trade.....	290
Qualities.....	293
Huntsman's steel.....	296
Conclusion	298
 Steel production and water power in eighteenth-century Sheffield	
<i>David Crossley</i>	299
Sheffield steel.....	300
<i>Cementation steel</i>	300
<i>Crucible steel</i>	302
The growth of the steel-using industries in Sheffield in the 18th century	303
<i>The increasing use of water power</i>	303
<i>The change to factory operation c. 1800</i>	312

L'acier dans le Nivernais et l'expérimentation à Cosne	
<i>Alain Bouthier</i>	315
La fabrication traditionnelle de l'acier par décarburation en Nivernais	316
La manufacture d'acier établie à Cosne.....	318
La Société pour la conversion des fers en aciers à Cosne-sur-Loire ...	320
La manufacture royale d'Orléans	323
L'intermède Rigault-Prémery	332
Le déclin (les sociétés autour de Leclerc et Pattée) et la fin de la Manufacture.....	335
Annexe biographique	339
Annexe technique	340
Production et usage de l'acier en France au XVIII^e siècle.	
Tentative de bilan	
<i>Georges Rosenberger</i>	341
L'acier naturel en Dauphiné	343
<i>Le Seuil de Rives</i>	344
<i>Comparaison entre l'acier naturel du bas Dauphiné et celui de quelques sites européens</i>	347
L'acier de cémentation	347
<i>Néronville-Souppes</i>	349
<i>Les sources d'approvisionnement</i>	353
<i>La manufacture d'Amboise</i>	354
Conclusion	359
La réduction directe et l'acier : le cas à la catalane (XVII^e-XIX^e siècle)	
<i>Jean Cantelaube, Olivier Codina</i>	361
Les sources écrites, le procédé à la catalane et l'acier.....	363
<i>Le vocabulaire technique des forgers :</i>	
<i>fer doux ou moll, fer fort et fer cédat</i>	363
<i>Les traités métallurgiques des XVIII^e et XIX^e siècles : l'acier naturel ...</i>	365
<i>Fer fort et fer cédat : des usages exclusivement réservés à l'acier</i>	367
<i>Distinguer le fer fort et le fer cédat</i>	368
<i>Fer fort et fer cédat : des qualités recherchées</i>	368
<i>Que représente la production de fer fort et de fer cédat ?</i>	369
<i>Serruriers, couteliers, martinéteurs, taillandiers</i>	371
La demande des marchés confirme la présence de l'acier.....	374
<i>Les demandes des marchés et les espaces de commercialisation</i>	375

<i>Des prix hiérarchisés selon la qualité du fer</i>	376
<i>Le paradoxe du marché andorran à partir de 1760-1770</i>	377
<i>La naissance d'un marché des fers à cémenter en France vers 1814</i>	379
Conclusion	382

**La production d'acier à Brescia : entre procédés traditionnels
et tentatives d'innovation (fin XVIII^e- début XIX^e siècle)**

<i>Sergio Onger</i>	387
La production d'acier à Brescia à l'époque moderne	387
Le métallurgiste Michele Scala et l'acier de cémentation	394
La persistance de la tradition métallurgique	399

DES PRODUITS, DES ENTREPRISES, DES MARCHÉS

**The production and trade of steel and steel tools in the early
modern semi-periphery. A commodity chain approach
to the Innerberg district (Austria) in the 16th and 17th centuries**

<i>Philippe Braunstein, Erich Landsteiner</i>	405
Time and place: The Innerberg district in the 16th century	407
A commodity chain approach	410
The production of steel and steel tools in the Innerberg district.....	411
<i>Mining and smelting the ore at Innerberg</i>	411
<i>Processing the raw iron in the forges</i>	416
<i>The merchants of Steyr and the organisation of steel production</i>	419
<i>Knives, sickles, and scythes: the metal wares industry in the region of Steyr</i>	424
<i>The steel merchants of Nuremberg and the armament industry</i>	427
The export trade in steel, knives and scythes	430
<i>The steel trade</i>	431
<i>The knife trade</i>	434
<i>The scythe trade</i>	437
Conclusion	441
Appendix: Commodity chain of iron and steel produced in the Innerberg district at the end of the 16th century	443

**The best iron in the world. Öregrund Iron and British Steel making
in the eighteenth century**

<i>Göran Rydén</i>	447
Swedish iron	452

Öregrund iron and Britain	454
Managing qualities	457
Conclusion	461
Strategies for success or failure. An interpretation of the cutlery industry during industrialization	
<i>Lars Magnusson</i>	463
Sheffield.....	464
Solingen and Remscheid	471
Conclusion	479
English ingenuity, French imitation and Spanish desire. The intriguing case of cut steel jewellery from Woodstock, Birmingham and Wolverhampton c.1700-c.1800	
<i>Helen Clifford</i>	481
The metal.....	482
The making	482
The market.....	485
Where did customers buy their cut steel jewellery?	486
How much did it cost?	487
Résumés.....	495
Présentation des auteurs	511

L'acier, une variété de fer parmi d'autres ? Approches méthodologiques des demi-produits des épaves romaines des Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône, France)

Gaspard Pagès, Philippe Fluzin, Luc Long

Les études sur la circulation des matières premières ou des produits semi-finis portent la plupart du temps sur la forme du contenant qui les transporte, le contenu ayant été utilisé ou décomposé. Pour ne retenir que l'exemple le plus célèbre, les amphores sont précisément étudiées pour analyser le commerce du vin, de l'huile ou de différentes saumures. De nombreuses typologies ont ainsi été établies sans que l'on sache parfois pour autant ce que ces récipients contenaient réellement lors des transports. Pour l'essentiel, le regard porté sur les demi-produits ferreux n'a pas dérogé à cette approche. Ils possèdent, pourtant, un atout important, comme d'ailleurs d'autres matériaux, notamment de construction : ils sont un contenu ayant la forme d'un contenant. Dans la mesure du possible, il apparaît alors judicieux de pousser les études au-delà de l'analyse morphologique pour connaître les qualités du contenu, en l'occurrence ici celles des fers constituant les demi-produits.

Ce type de recherche trouve ses fondements après la Seconde Guerre mondiale, à partir du moment où la microscopie optique se popularise et où la métallurgie physique s'impose comme une discipline institutionnalisée¹. Dans leur sillage naîtra rapidement une matière à la jonction entre les sciences dites dures et l'archéologie : l'archéométrie, dont la métallographie est une composante. Les premières analyses sur les demi-produits ferreux sont alors menées dans le nord de la France avec un handicap important : la méconnaissance

Gaspard Pagès, Philippe Fluzin, Luc Long, Laboratoire Archéologie des sociétés méditerranéennes, CNRS-UMR 5140, Lattes ; Laboratoire Métallurgies et Cultures, CNRS-UMR 5060/IRAMAT, Belfort-Sévenans ; Département des Recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines, ministère de la Culture, Marseille.

1 N. Chezeau, *De la forge au laboratoire : naissance de la métallurgie physique (1860-1914)*, Rennes, 2004.

sance des faciès métallographiques associés au procédé direct de réduction². Dans une moindre mesure, le sud de la France a également participé à ce mouvement³.

Si pour les lingots bipyramidés, les enseignements ont été limités notamment à cause de la disparité des études menées ici et là en Europe sans concordance⁴, il en a été autrement à propos des *currency bars*. Les conclusions tirées ont très tôt témoigné du fort potentiel de ce type de démarche, en établissant une corrélation entre des sous-types morphologiques de *currency bars* et trois familles d'alliage ferreux, déterminées en fonction de la proportion des zones à forte teneur en phosphore⁵.

Conscient des avantages procurés par cette approche métallographique du demi-produit, nous proposons d'investir à nouveau cette démarche en nous attachant particulièrement sur le protocole à suivre pour définir précisément et exhaustivement les qualités du fer constituant les demi-produits. Ce protocole est ensuite confronté à un lot exceptionnel de demi-produits antiques découverts dans des navires romains échoués au large des Saintes-Maries-de-la-Mer, dans les Bouches-du-Rhône, en France. Ainsi, les perspectives enrichissantes de ce type d'enquête sont mises en évidence. Elles aboutissent, notamment, à situer l'acier dans la variété des fers employés, mais aussi, et de manière plus générale, à préciser les schémas de commercialisation et d'échanges à travers les normes en vigueur et les destinations fonctionnelles attachées à chaque demi-produit⁶.

-
- 2 H. Hanemann, « Untersuchung eines eisernen Spitzbarrens aus der vorrömischen », *Prähistorische Zeitschrift*, vol. 21, 1930, p. 271 ; A. France-Lanord, « Les lingots de fer protohistoriques », *Revue d'histoire de la sidérurgie*, vol. 4, 1963, p. 167-178 ; U. Zwicker, « Untersuchungen an einem Eisenbarren aus dem Depotfund von Renningen (Kr. Leonberg) », *Fundberichte aus Schwaben*, vol. 18, 1967, p. 281-283 ; W. Kimmig, E. Gersbach, « Die Gradungen auf der Heuneburg 1966-1969 », *Germania*, vol. 49, 1971 ; F. Delamare, G. Nicolas, E. Mencarelli, « Étude du forgeage d'un lingot de fer protohistorique », *Mémoires et études scientifiques. Revue de métallurgie*, vol. 79, 1982, p. 97-104 ; A. Thouvenin, « Lingots de fer gaulois et techniques de forge », *Revue archéologique de l'Est et du Centre-Est*, vol. 35, 1984, p. 368-372.
 - 3 L. Monguilan, « Une épave romaine chargée de fer et de plomb dans le golfe de Fos : Saint-Gervais I », dans *Les mines et la métallurgie en Gaule et dans les provinces voisines*, Paris, 1987, p. 171-179.
 - 4 C. Doswald, « Les lingots de fer protohistoriques en Europe occidentale : problématique générale », dans *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen. Archéologie et archéométrie, colloque de Besançon, Besançon, novembre 1993*, M. Mangin éd., Paris, 1994, p. 333-343.
 - 5 R. Ehrenreich, *Trade, Technology and the Ironworking Community in the Iron Age of Southern Britain*, Oxford, 1985 ; P. Crew, « Currency bars in Great-Britain ; Typologie and function », *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen*, op. cit., p. 346-350.
 - 6 Cette étude a été conduite dans le cadre d'une thèse de doctorat menée par Gaspard Pagès au sein de l'Université Montpellier III-Paul Valéry (34), de l'UMR 5140 « Archéologie des sociétés méditerranéennes » (Lattes, 34) et de l'UMR 5060 - IRAMAT « Laboratoire de métallurgies et cultures » (Belfort, 90). G. Pagès, *La métallurgie du fer en France méditerranéenne de*

L'APPROCHE ARCHÉOMÉTRIQUE DU DEMI-PRODUIT

Les critères spécifiques des fers issus de la filière directe

La(es) masse(s) métallique(s) de référence

Caractériser la(es) masse(s) métallique(s) à partir de la(des)quelle(s) le demi-produit est fabriqué est fondamental pour déterminer, non seulement la structuration des observations métallographiques, mais aussi la place du demi-produit dans l'arborescence du schéma de production.

Le fer antique et médiéval provient toujours d'une masse brute issue de la réduction directe en bas fourneau du minerai de fer qui a dû subir différentes transformations mécaniques et chimiques pour devenir un demi-produit. Ce dernier peut aussi bien être une loupe à peine compactée et épurée, qu'une accumulation de feuilles – plus ou moins épaisses – repliées et soudées les unes sur les autres. Dans ce dernier cas de figure, il peut s'agir, soit du recyclage de chutes de forgeage, soit du corroyage intense et renouvelé d'une masse de métal, d'un demi-produit ou d'une partie de l'un d'eux. Quelle que soit cette constitution corroyée, elle sous-tend des phases de travail supplémentaires qui peuvent intervenir dans un ou plusieurs ateliers établis le long de la chaîne de distribution du demi-produit. Ainsi, le demi-produit n'est pas un objet dont la forme et la constitution sont figées. Son façonnage n'intervient pas uniquement après la phase de réduction du minerai. Il peut être répété et multiplié tout au long des différentes étapes qui ponctuent la distribution de toutes matières, qu'elles soient brutes ou semi-finies. Aussi, la loupe d'un demi-produit peut successivement donner naissance à des demi-produits à base de fragment(s) de loupe et ensuite de masses corroyées. Au cours de chacune de ces étapes, le demi-produit est segmenté et mis en forme sous un modèle moins grossier et plus adapté au forgeage traditionnel d'objets. C'est pour cette raison que l'on trouve, au début de la chaîne, des demi-produits pesant plusieurs kilogrammes – parfois des dizaines – et, à l'autre extrémité, d'autres qui n'excèdent pas quelques centaines de grammes.

Les alliages ferreux

Le type d'alliage ferreux est un critère capital définissant la structure du demi-produit. Pour en revenir à l'analogie faite avec les amphores, le fer n'est pas un métal unique ; parler de tel ou tel alliage ferreux équivaut à discuter de tel ou tel vin.

Traditionnellement, les alliages les plus connus ont trait à la combinaison du fer et du carbone. On y distingue les aciers, mais aussi la ferrite. Celle-ci est un alliage à base de fer contenant très peu de carbone, au maximum 0,02 %

L'Antiquité au début du Moyen Âge : jalons d'une approche interdisciplinaire, Montpellier, 2008, 3 vol., 302, 249, et 264 p. (<http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00357391/fr/>).

du poids. L'acier est un alliage à base de fer contenant un poids important de carbone, entre 0,02 % et 1,8 %. La fonte, quant à elle, contient de 1,8 à 6,7 % de carbone, mais dans le cadre de la réduction directe, sa production est marginale.

D'autres éléments chimiques – soufre, manganèse, phosphore – peuvent se combiner avec le fer. Ils constituent d'autres alliages ferreux (voir l'article de Vincent Serneels dans ce volume). Leur présence est souvent anecdotique dans le cadre de la réduction directe. Cependant, il est apparu, il y a une dizaine d'années, que l'un d'eux, le phosphore, était couramment utilisé et mis en œuvre depuis la Protohistoire⁷. Par conséquent, on distingue aussi le fer phosphoreux, un alliage à base de fer contenant un poids non négligeable de phosphore, entre 0,1 % et 0,6 %.

Le taux de compactage et d'épuration

Dans le cadre de la réduction directe, la transformation du métal se fait à l'état pâteux. Le métal ainsi produit est souvent très hétérogène. Il peut contenir de nombreux vides, mais aussi de nombreuses inclusions de scories et de charbons de bois. La mise en forme du demi-produit consiste alors, pour partie, à compacter et à épurer cette masse de métal brut. Quand le demi-produit est fabriqué à partir de l'assemblage de feuilles de métal, le problème persiste car le fer constituant chaque feuille n'est pas nécessairement « propre ». De plus, la réalisation de soudures est souvent accompagnée d'ajouts – barbotine d'argile, sable, grès pilé ou mélanges plus complexes – destinés à limiter la formation d'oxydes sur les surfaces à assembler et/ou à abaisser le palier de soudabilité. Ces ajouts peuvent polluer le métal au même titre qu'un mauvais assemblage qui laisse apparaître des vides. Dans toutes ces situations, le soin accordé au compactage et à l'épuration détermine la propreté de l'alliage. Le taux de compactage et d'épuration constitue alors le critère de qualité subsidiaire à celui du type d'alliage ferreux. Pour faciliter la lecture, on préférera utiliser le terme de propreté inclusionnaire qui regroupe les caractéristiques du taux de compactage et celles du taux d'épuration.

Une observation nécessairement exhaustive

Le protocole

Les demi-produits peuvent être des pièces volumineuses, pouvant par exemple mesurer 2 m de long. Or, le matériau est souvent hétérogène, contrairement aux productions industrielles contemporaines issues d'une élaboration en phase liquide. De plus, le demi-produit n'est pas nécessairement constitué d'une unique masse ; plusieurs loupes ou de multiples feuilles

⁷ *Op. cit.*, n. 5, p. 84.

peuvent être assemblées pour former le spécimen. Dans le cadre d'études archéométriques, l'essentiel des observations est effectué à l'échelle micrographique. Toute la difficulté est alors de pouvoir réaliser un va-et-vient constant entre la micrographie et la macrographie afin de connaître précisément la représentativité de la zone observée par rapport à l'ensemble du demi-produit ; une petite zone, qui plus est, prélevée à l'aveugle, restant anecdotique et, par conséquent, insignifiante par rapport à l'intégralité du demi-produit. Un protocole spécifique doit donc être respecté pour supporter les études archéométriques (fig. 1).

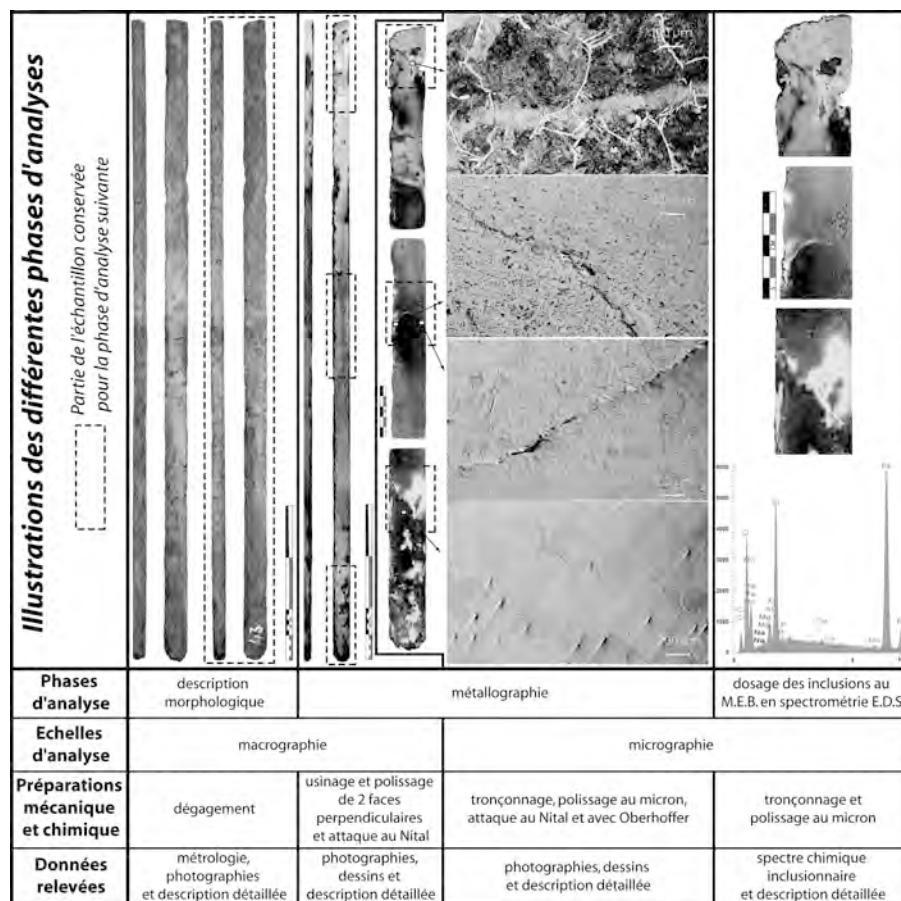


Fig. 1. Organigramme du protocole d'analyses archéométriques d'un demi-produit

Au préalable, la première étape renseigne la provenance archéologique, la morphologie, la métrologie et les autres caractères distinctifs (fig. 1). À cela

s'ajoute l'élaboration de représentations graphiques de l'échantillon – photographies, dessins. Ensuite, le second stade du protocole consiste à usiner et à polir intégralement (grade maximal 180) une face principale et une face latérale, dont la jonction forme un angle sensiblement perpendiculaire. De cette manière, il est possible d'observer, à l'échelle macroscopique, la totalité du métal constituant le demi-produit en trois dimensions. Cette observation est couplée, dans un second temps, à une attaque au réactif Nital 4 % qui révèle la variation de la teneur en carbone. Ainsi, par l'observation macrographique, on peut successivement définir la propreté inclusionnaire, la proportion des zones aciérées – dont la teneur en carbone est supérieure à environ 0,2 % –, l'hétérogénéité structurale, mais également la présence de certaines soudures et, par conséquent, l'éventuel assemblage de plusieurs loupes ou de plusieurs feuilles métalliques. Le type d'alliage fer-carbone est ensuite contrôlé et déterminé plus précisément au niveau microscopique en métallographie traditionnelle (*infra*). À partir de ces différents examens, des sections métalliques, de maximum 20 cm de long⁸, sont prélevées dans des zones caractéristiques et significatives de l'ensemble du demi-produit pour procéder à une analyse métallographique à l'échelle micrographique, laquelle permet l'étude plus fine de la structure de l'alliage ferreux. Un nouveau polissage est alors effectué jusqu'à une granulométrie de l'abrasif de un micromètre, avec une pâte diamantée et un lubrifiant à base d'éthanol. Ensuite, deux attaques – Nital à 4 % et Oberhoffer – séparées par un nouveau polissage fin – à l'abrasif de un micromètre – sont réalisées pour révéler la structure et qualifier respectivement les aciers et les zones phosphoreuses. À cette échelle d'analyse, la propreté inclusionnaire est également évaluée.

Qualifier et quantifier

Le dernier volet de cette procédure concerne la transcription des observations réalisées aux différentes échelles d'analyse pour présenter, comparer et conserver les données et les résultats. À cette fin, des procédés de mesure et de présentation les plus communément exploités ont été choisis pour quantifier et qualifier les examens.

En premier lieu, on spécifie en chiffre le nombre de loupes ou de feuilles qui constitue le demi-produit. Dans le cas où les masses métalliques isolées sont sensiblement identiques, la suite des qualifications et des quantifications ne tiendra pas compte du caractère intrinsèque de chacune des différentes masses assemblées. En revanche, si une disparité significative est remarquée entre les loupes ou les feuilles, la suite des qualifications et des quantifications tiendra compte de cette structuration en loupe ou en feuilles.

⁸ Cette dimension est définie par le diamètre des disques de polissage généralement utilisés dans les laboratoires.

Pour ce qui est de la propreté inclusionnaire, elle est calculée en pourcentage par rapport aux surfaces analysées – les deux grandes faces principales et les sections polies – à l'aide d'un logiciel de traitement d'image⁹. Le résultat issu des deux grandes faces est pondéré en prenant en compte la représentativité de chacune des faces par rapport à l'ensemble du demi-produit. Au sujet des sections polies, la propreté inclusionnaire est également chiffrée selon la norme AFNOR NF A04-106, corrigée d'un facteur 10 et, par conséquent, suivie d'un astérisque¹⁰. À l'aide de toutes ces données, l'objectif est de hiérarchiser les différentes propretés inclusionnaires pour qualifier, selon ce critère, les échantillons. Le problème n'est pas tant d'établir des classes adaptées à notre corpus, mais de créer des classes comparables et donc utilisables par tous ceux qui pratiquent des études métallographiques de demi-produits. En s'appuyant sur les travaux précédents¹¹ et sur nos mesures, nous proposons les catégories résumées dans le tableau 1. Elles sont fondées uniquement sur l'échelle de la norme AFNOR NF 04-106* et sur le pourcentage de porosités et d'inclusions des sections polies. Le pourcentage calculé à partir de la totalité du demi-produit n'est pas pris en compte, il est simplement mentionné à titre indicatif. En effet, de cette dernière manière, la perception de la propreté inclusionnaire diffère très nettement suivant la grosseur du demi-produit, dont la longueur peut être comprise entre quelques centimètres et plus d'un mètre. De fait, toutes comparaisons et donc toutes utilisations systématiques sont proscrites.

Propreté inclusionnaire	Échelle AFNOR NF A 04-106*	% d'inclusions et de porosités des sections polies	% d'inclusions et de porosités des grandes faces usinées et polies
très élevée	1*	inférieur à 1 %	à titre indicatif
élevée	entre 1* et 2*	entre 1 % et 2 %	
moyenne	entre 2* et 3*	entre 2 % et 3 %	
basse	entre 3* et 4*	entre 3 % et 4 %	
très basse	supérieure à 4*	supérieur à 4 %	

Tab. 1. Hiérarchisation des différentes qualités de propreté inclusionnaire

En ce qui concerne la qualité de l'alliage, les paramètres à prendre en compte sont multiples, parce qu'ils doivent intégrer la notion d'hétérogénéité attachée à tous les produits issus de la filière directe. Dans ces conditions, la

⁹ Ici, en l'occurrence, le logiciel utilisé est Adobe PhotoshopTM.

¹⁰ M. L'Heritier, A. Juhin, Ph. Dillmann, R. Aranda, P. Benoît, « Utilisation des alliages ferreux dans la construction monumentale du Moyen Âge. État des lieux de l'avancée des études métallographiques et archéométriques », *ArcheoSciences, Revue d'archéométrie*, vol. 29, 2005, p. 117-132.

¹¹ *Ibid.*

seule teneur absolue en carbone ne permet pas de caractériser la qualité de l'alliage ferreux. Pour cela, il est nécessaire de prendre en compte deux paramètres : la proportion des zones aciérées et la teneur en carbone pondérée. La proportion est estimée en pourcentage à partir de l'observation macrographique des surfaces occupées par les zones carburées sur les deux grandes faces principales attaquées au Nital. Le calcul, obtenu avec un logiciel de traitement d'image, est pondéré en prenant en compte la représentativité de chacune des faces par rapport à l'ensemble du demi-produit. Quant au taux de carbone pondéré, il est chiffré au moyen d'un logiciel de traitement d'image à partir des surfaces occupées par les différents types d'alliage fer-carbone¹² sur les sections polies, préalablement observées en métallographie traditionnelle. La proportion des zones phosphoreuses – 0,1 % < P < 0,6 % – est, quant à elle, évaluée grâce à l'observation micrographique des sections après l'attaque Oberhoffer par l'intermédiaire, là aussi, d'un logiciel de traitement d'image.

DES ÉPAVES ROMAINES CHARGÉES DE FER AU LARGE DES SAINTES-MARIES-DE-LA-MER

Pour exposer les enseignements enrichissants engendrés par une telle démarche, nous proposons d'appliquer l'ensemble de la procédure à un corpus remarquable de demi-produits : les chargements ferreux des navires romains échoués au large des Saintes-Maries-de-la-Mer, dans les Bouches-du-Rhône, en France.

Des navires entre la Méditerranée et le Rhône

Tout a commencé au début des années 1990, lorsque Luc Long (DRASSM) découvrait les premières concrétions ferreuses au large des Saintes-Maries-de-la-Mer¹³. Aujourd'hui, plus d'une quinzaine d'années après, ce corpus a été largement enrichi par la poursuite des enquêtes de terrain (fig. 2). Il compte désormais onze navires : SM2, SM3, SM6, SM8, SM9, SM10, SM11, SM23, SM24, SM25 et SM27. Pour les plus importants, leur chargement varie, selon les estimations, entre 100 et 150 tonnes de demi-produits et, pour quelques-uns plus petits, autour de 20 tonnes. Au total, c'est donc environ 500

12 Les classes des types d'alliage fer-carbone sont : C < 0,02 % ; 0,02 % < C < 0,2 % ; 0,2 < C < 0,4 % ; 0,4 % < C < 0,6 % ; 0,6 % < C < 0,8 %, etc. Le calcul du taux de carbone pondéré est, avec « n % » le nombre de pourcent de tel alliage : (n % x 0,02 + n % x 0,1 + n % x 0,3 + n % x 0,5 + n % x 0,7 + etc.)/100.

13 L. Long, « Gard. Au large d'Aigues-Mortes, de l'Espiguette au Petit-Rhône », *Bilan scientifique du département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines 1992*, DRASSM éd., Paris, 1993, p. 39 ; « De l'Espiguette au Petit-Rhône, épave 12 (Saintes-Maries-de-la-Mer 2) », *Bilan scientifique du département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines 1993*, DRASSM éd., Paris, 1994, p. 29-30.

tonnes de fer qui sont conservées. Plus remarquable encore, est l'étroitesse de l'assiette et de la fourchette dans lesquelles se situent les navires naufragés. Tous sont échoués dans un rayon de 5 km, une étendue minimale à l'échelle de la Camargue (fig. 2), et tous sont datés entre l'époque augustéenne et la fin de celle des Flaviens, de 27 avant notre ère à 96 de notre ère. Si les conditions sous-marines n'ont pas toujours facilité les opérations archéologiques, menées le plus souvent avec le soutien du navire l'Archéonaute, elles ont en revanche favorisé la bonne conservation de ces vestiges en limitant les risques de récupération et d'oxydation, les chargements étant recouverts d'une épaisse concrétion et, par intermittence, de sable.

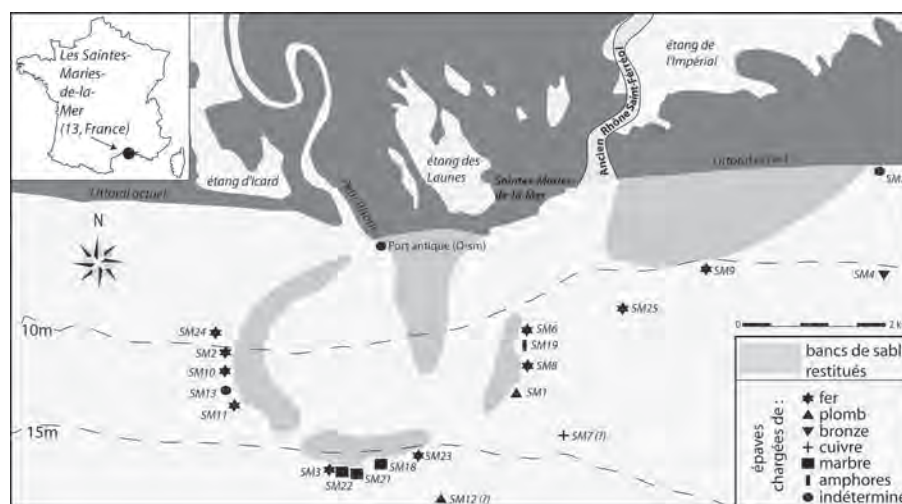


Fig. 2. Localisation des épaves des Saintes-Maries-de-la-Mer, Bouches-du-Rhône, France (DAO Gaspard Pagès, relevé Luc long)

Ces navires, que le recul régulier du rivage depuis l'Antiquité place aujourd'hui à près de 3 km en mer et à une profondeur comprise entre 12 et 14 m, se sont en réalité échoués par 1 ou 2 m d'eau sur des barres d'avant côte ayant la forme d'un vaste lobe. Leur proximité et leur positionnement indiquent qu'ils venaient de Méditerranée et cherchaient volontairement à se positionner devant l'entrée d'un des anciens bras du Rhône : le Rhône Saint-Ferréol (fig. 2). Au I^{er} siècle de notre ère, ce dernier correspond, selon la description que donne Pline l'Ancien des trois bras du Rhône, à la branche du milieu, appelée Métapine (HN, III, 5). Son paléotracé, depuis le sud d'Arles, par le nord-ouest de l'étang du Vaccarès, est connu des sédimentologues. Bordé d'installations romaines, il se confond dans le système lagunaire actuel.

Durant l'Antiquité, le fer n'est pas le seul matériau à suivre ce mode et cette voie de transport. Au large des Saintes-Maries-de-la-Mer, d'autres navires sont attestés par leur cargaison d'amphores, d'objets en bronze ou de blocs de marbre. Par exemple, on mentionnera l'épave SM1 et ses cents lingots de plomb fabriqués par L. F. Verucla et qui sont la propriété de l'Empire romain, selon les contre-marques¹⁴. D'autres chargements de matières premières ont été démantelés par les chalutiers, mais restent assez mal localisés. C'est le cas de l'épave SM7, avec ses galettes de cuivre et de l'épave SM12 qui a livré des lingots de plomb sphériques, dont les incisions mentionnent le poids en livres romaines¹⁵. Légèrement plus au large, trois épaves chargées chacune de cinq à sept blocs de marbre ont également été repérées (SM18, SM21 et SM22). Rassemblées, toutes ces découvertes confirment l'importance et la vitalité de la voie rhodanienne dans la diffusion en Gaule des matériaux, notamment pondéreux, tel que le fer.

Le corpus d'épaves des Saintes-Maries-de-la-Mer, exceptionnel par sa conservation, sa richesse et sa lisibilité, reflète un instantané de la circulation maritime des demi-produits ferreux au début de l'Empire romain. Depuis leur découverte, de nombreuses questions portent sur la(es) provenance(s) et la(es) destination(s) de leur chargement. Elles ont fait l'objet de multiples discussions et nécessitent, de fait, un développement à part entière, notamment synthétisé dans une récente publication¹⁶.

Des demi-produits standardisés

Les estimations quantitatives qui, au total, évaluent la présence d'environ 500 tonnes de fer au large des Saintes-Maries-de-la-Mer sont fondées sur le volume des concrétions métalliques conservées et sur la superficie restituée des navires. Cette fourchette approximative est probablement en deçà de la réalité. Il est fort possible, en effet, qu'une partie de ce fer ait été récupérée après l'échouage, dans les jours qui ont suivi la tempête, avant que les navires ne soient complètement recouverts par le sable et l'eau. Elle donne toutefois un bon ordre de grandeur, d'autant que ces estimations ne prennent pas en

14 L. Long, C. Domergue, « "Le véritable plomb de L. Flavius Verucla" et autres lingots : l'épave 1 des Saintes-Maries-de-la-Mer », *Mélanges de l'École française de Rome*, vol. 107, 1995, p. 801-867.

15 J.-F. Maréchal, « Note à propos d'un lingot de plomb repêché à l'embouchure du Petit Rhône », *Bulletin de la société nationale des Antiquaires de France*, 1985, p. 241-249 ; « À propos de nouveaux lingots de fer d'époque romaine découverts sur la côte de Narbonnaise », *Bulletin de la société nationale des Antiquaires de France*, 1998, p. 239-254.

16 G. Pagès, L. Long, F. Fluzin, Ph. Dillmann, « Réseaux de production et standards de commercialisation du fer antique en Méditerranée : les demi-produits des épaves romaines des Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône, France) », *Revue archéologique de Narbonnaise*, vol. 41, 2008, p. 261-283 (<http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00420965/fr/>).

compte deux autres épaves visiblement chargées de fer qui se sont échouées au large de Palavas, sur une des routes qui menait au Rhône de Saint-Ferréol¹⁷.

Dès la fin des années 1990, la remontée à la surface d'une partie des chargements métalliques a révélé la récurrence morphologique des demi-produits enfouis (fig. 3). Dans ces conditions, une typologie reposant sur les dimensions des sections a été rapidement échafaudée, individualisant ainsi,





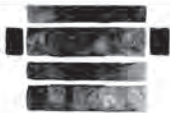



Illustrations	Sections l x e (cm)	Longueur (cm)	Masses (kg)	Estimations quantitatives	Codes
	4 (+/- 1,1)	54 à 61	2,5 à 4	+	1M
	x 2 (+/- 0,5)	75 à 140	8 à 11	++	1L
	3,5 (+/- 0,5)	40 à 71	1,5 à 5	+++	2M
	4 (+/- 0,5)	30 à 38	1,5 à 4,5	+	3C
	6 (+/- 1,5)	20 à 30	2 à 7	+++	4C
	x 5 (+/- 1,5)	76 à 191	22 à 33	+	4L
	5 (+/- 0,5)	26 à 31	3	+	5C
	10 (+/- 0,5)	27 à 33	4 à 8	+	6C
	x 3,7 (+/- 0,7)				

Fig. 3. Typologie des demi-produits des épaves des Saintes-Maries-de-la-Mer (Gaspard Pagès d'après Luc Long *et al.* 2005)

17 *Op. cit.*, *supra* n. 15.

d'abord, six formes par des numéros¹⁸. Plus récemment, la découverte de nouvelles épaves a permis de compléter et d'aménager cette typologie. Dans un souci de continuité scientifique, le premier critère distinctif – la section – a été conservé, mais enrichi d'un sous-type intégrant systématiquement les caractéristiques de la longueur¹⁹ avec C pour courte, M pour moyenne et L pour longue (fig. 3)²⁰. Plus globalement, ce corpus comporte des demi-produits qui vont du simple petit barreau à la barre très massive. Ainsi, les longueurs sont comprises entre 20 et 200 cm, et les masses entre 1,5 et 33 kg.

Tous ces navires ne possèdent pas un chargement identique que ce soit en masse totale ou en fréquence de types (fig. 4). Certains livrent un seul type de demi-produit, tandis que d'autres renferment dans leur cale au moins quatre types différents. Il n'y a aucune relation entre le fait que le chargement soit multi-types et l'importance de ce dernier, ou inversement. De manière générale, les types 4C, 2M et 1L sont les plus fréquents et les plus nombreux, tandis que les types 1M, 4L, 3C, 5C et 6C proviennent d'une unique épave et sont les plus rares.

Enfin, la remarquable conservation des barres de fer des Saintes-Maries-de-la-Mer a également permis de préserver les estampilles qui étaient apposées sur un grand nombre d'entre-elles. Aussi, un autre volet de recherche a été ouvert dans cette direction²¹. Nous n'y reviendrons pas dans cette publication.

De l'archéologie à l'archéométrie : l'échantillonnage

Les études archéométriques sont nécessairement appliquées sur un nombre limité de spécimens, le temps et le coût de chaque opération étant

18 L. Long, « Inventaire des épaves de Camargue, de l'Espiguette au grand Rhône. Des cargaisons de fer de l'Antiquité aux gisements du XIX^e siècle. Leur contribution à l'étude du paléorivage », dans *Crau, Alpilles, Camargue. Histoire et archéologie. Actes du colloque de Novembre 1995*, M. Baudat éd., Arles, 1997, p. 59-113 ; « Carte archéologique au marge de la Camargue, les épaves SM2 et SM10, réflexion typologique », *Bilan scientifique du département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines 1996*, DRASSM éd., Paris, 1997, p. 73-81.

19 Pour ces raisons, les codes des formes sont composés d'un numéro et d'une lettre qui représentent respectivement le type général, issu de la dimension de la section, et le sous-type, dérivé de la longueur. Pour faciliter la lecture, dans notre propos, nous mentionnerons sous le terme type, ce qui apparaît strictement d'un point de vue typologique comme l'association d'un type et d'un sous-type, à savoir le chiffre suivi de la lettre.

20 L. Long, D. Djaoui, C. Rico, « Lingots et barres de fer : vers une typologie plus complète », *Bilan scientifique du département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines 2003*, DRASSM éd., Paris, 2005, p. 66-68 ; M.-P. Coustures, C. Rico, D. Béziat, D. Djaoui, L. Long, C. Domergue, F. Tollon, « La provenance des barres de fer romaines des Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône) », *Gallia*, vol. 63, 2006, p. 243-261.

21 *Ibid.*, op. cit., supra n. 16. L. Long, C. Rico, C. Domergue, « Les épaves antiques de Camargue et le commerce maritime du fer en Méditerranée nord-occidentale (I^{er} siècle avant J.-C. - I^{er} siècle après J.-C.) », *L'africa romana*, vol. 14, 2002, p. 161-188 ; D. Djaoui, *Le commerce du fer d'après les épaves des Saintes-Maries-de-la-Mer (50 av. 90 ap. J.-C.)*, Aix-en-Provence, 2003.

élevés. Pour remédier à ce rétrécissement du corpus étudié, il faut donc prendre en compte des individus représentatifs et caractéristiques en fonction des différentes variables de l'assemblage archéologique. Ce procédé d'échantillonnage exige d'être prudent pour éviter les risques de distorsion. Dans cette optique, notre démarche a été menée de manière à croiser le maximum de critères pour mesurer et apprécier plus réellement les récurrences et les variations. Or, dans notre cas, l'épave et le type forment les deux paramètres principaux à prendre en compte, puisque le premier conditionne l'ensemble des propriétés du site archéologique, et le second le seul caractère systématiquement connu du matériau d'étude. Nous avons donc tenté de prélever un nombre important de demi-produits appartenant à chaque type et provenant de plusieurs épaves différentes.

Dans la réalité, cette démarche ne peut pas s'appliquer aussi méthodiquement que le préconise la théorie ; certaines épaves sont moins bien conservées, d'autres n'ont été que sondées sans bénéficier de prélèvements systématiques et quelques types ne sont associés qu'à un seul chargement (fig. 4). Toutes ces conditions, dictées par les spécificités des recherches archéologiques et sous-marines, déterminent la disponibilité documentaire des demi-produits et par conséquent l'échantillonnage.

Epaves / Types	1M	1L	2M	3C	4C	4L	5C	6C	Total
SM2	5 2 4				3 1 0				8 3 5
SM3									
SM6			1 0 0	1 0 0	3 0 0		1 1 1	4 1 1	10 2 2
SM8									
SM9		6 4 4	3 2 3		4 3 5				13 0 12
SM10	4 2 6								4 2 6
SM11			indéterminé						
SM23									
SM24					2 0 0	6 2 7			8 2 7
SM25			6 2 2						6 2 2
SM27			indéterminé						
Total	9 7 10	6 4 4	10 4 5	1 0 0	12 4 6	6 2 7	1 1 1	4 1 1	49 20 34
Légende		Type non transporté							
		Type transporté, mais non disponible							
	n°	Nombre de demi-produits étudiés à l'échelle macroscopique à partir des deux grandes faces usinées							
	n°	Nombre de demi-produits étudiés à l'échelle microscopique à partir des sections polies							
	n°	Nombre de sections polies analysées							

Fig. 4. Tableau croisé synthétisant l'échantillonnage des demi-produits des épaves des Saintes-Maries-de-la-Mer

Ainsi, quarante-neuf demi-produits ont été prélevés (fig. 4). Ils se rapportent aux huit types morphologiques. En revanche, ils ne proviennent que de six

des onze épaves reconnues. Cet échantillonnage est satisfaisant et permet d'afficher une vision d'ensemble avec des recoupements, sauf en ce qui concerne les types 3C et 5C pour lesquels un unique exemplaire a pu être étudié.

BILAN MÉTALLOGRAPHIQUE RÉPERTORIÉ DES DEMI-PRODUITS DES SAINTES-MARIES-DE-LA-MER

Les matériaux mis en œuvre

Types mono-loupes, types multi-loupes

Tous les demi-produits des Saintes-Maries-de-la-Mer sont formés à partir de masses brutes de fer. Aucun d'entre eux n'est constitué d'un assemblage de feuilles. En revanche, certains sont composés de plusieurs loupes soudées les unes aux autres. Deux catégories se distinguent alors dans notre corpus : les demi-produits mono-loupes et ceux multi-loupes. Cette distinction paraît inhérente aux types, puisque tous les spécimens de chaque catégorie se trouvent explicitement dans des types définis au niveau morphologique (fig. 5).

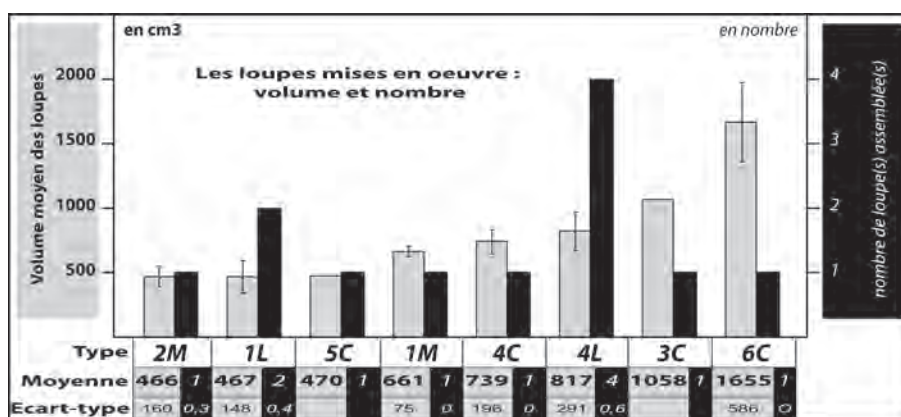


Fig. 5. Volume et nombre de loupe(s) mise(s) en œuvre dans chaque type morphologique de demi-produit des Saintes-Maries-de-la-Mer

Aussi, les types 1M, 2M, 3C, 4C, 5C et 6C sont toujours issus de la mise en forme d'une unique loupe (fig. 5). Les types 1L et 4L sont, eux, multi-loupes. L'assemblage de plusieurs loupes concerne donc uniquement les deux seuls types longs. Plus précisément, le type 1L est le plus fréquemment constitué de deux loupes. Plus rarement, quand les loupes assemblées sont trop petites, trois masses de fer sont utilisées. D'ailleurs, on retrouve une pratique identique dans un spécimen du type 2M qui met en œuvre deux petites loupes

alors que tous les autres échantillons ne sont issus que d'une seule. Le type 4L est, quant à lui, couramment fabriqué à partir de quatre loupes. Cependant, selon leur volume, ce nombre peut varier plus rarement de trois à cinq. Ici, le nombre élevé de masses de fer assemblées n'est pas déterminé par leur petit volume, mais par la volonté de produire un demi-produit allongé – environ 1,5 m – avec une section importante – environ 6 x 5 cm (fig. 3 et 5). En conséquence, un rapport direct apparaît clairement entre le type et le nombre de loupes assemblées, mais cette relation n'est cependant pas une interdépendance, puisque le nombre de masses de fer dépend avant tout de la morphologie du type de demi-produit, laquelle est standardisée et, par conséquent, prédéfinie par avance, avec une petite variabilité inhérente aux productions ante-industrielles.

De manière générale, le volume des loupes mises en œuvre fluctue entre 95 et 2500 cm³. Dans chacun des types, un grand écart est visible entre la plus petite et la plus grosse loupe. Ces grandes amplitudes masquent toutefois des récurrences et des hétérogénéités. En effet, la très grande majorité des loupes se place entre 450 et 850 cm³ (fig. 5). Seul le type 6C ne se plie pas à cette règle. Celui-ci se différencie même très nettement de tous les autres, puisqu'il regroupe uniquement des masses de fer oscillant entre 1200 et 2500 cm³. Dans le reste des types, on peut également retrancher les types 2M et 1L dans lesquels sont employées des loupes dont le volume est sensiblement identique : environ 470 cm³. Suivant ce raisonnement, les types 1M, 4C et 4L peuvent, dans une moindre mesure, être rapprochés avec l'utilisation de loupes d'environ 700-800 cm³.

Qualités des alliages et types morphologiques : des tendances significatives

Une grande variété d'alliages ferreux a été caractérisée dans l'ensemble des demi-produits analysés, de la ferrite à l'acier hypereutectoïde, en passant par le fer phosphoreux. À première vue, cette grande hétérogénéité ressort. Par exemple, dans la plupart des demi-produits, les zones aciérées côtoient des parties ferritiques. Néanmoins, si chaque demi-produit est pris dans son intégralité et si l'on considère la proportion des différents types d'alliages par rapport au volume total, des tendances se dégagent (fig. 6). Chose plus remarquable encore, ces tendances sont en adéquation avec les types, comme dans l'analyse précédente concernant le nombre et le volume des loupes employées : à quelques exceptions près, chaque type utilise une qualité d'alliage proportionnellement majoritaire.

Pour ce qui est de la ferrite, elle se trouve dans tous les demi-produits analysés. En proportion majoritaire, elle se rencontre cependant uniquement dans trois types : 2M, 3C et 6C (fig. 6). Le type 2M est en moyenne composé de 85 % de ferrite. Seul un demi-produit sur dix déroge à cette prédisposition. Cette tendance ferritique est accentuée par le fait que les parties aciérées

restantes possèdent une faible teneur en carbone, généralement inférieure à 0,3 %. Le type 6C reprend d'une manière sensiblement équivalente le même penchant : en moyenne, 80 % de son volume est ferritique, sans qu'aucun échantillon ne s'écarte significativement de cette proportion. Ici, en revanche, les zones aciérées sont plus carburées, puisqu'elles peuvent atteindre l'eutectoïde (fig. 6). Le type 3C semble suivre une même tendance, mais cette similitude devra être vérifiée par la conduite d'analyses sur d'autres échantillons, un seul spécimen ayant été étudié (fig. 4).

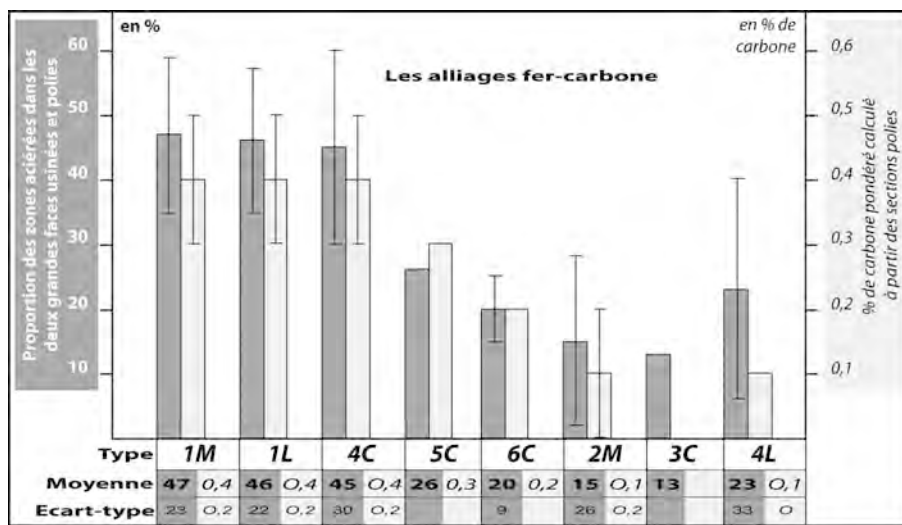


Fig. 6. La qualité des alliages fer-carbone de chaque type morphologique de demi-produit des Saintes-Maries-de-la-Mer : proportion des zones aciérées et teneur en carbone pondérée

Si, comme pour la ferrite, l'acier se retrouve dans pratiquement tous les demi-produits en termes de proportion significative par rapport au volume total, quatre types se détachent du lot : 1M, 1L, 4C et 5C (fig. 6). Pour ce dernier type, l'analyse d'autres échantillons doit être pratiquée, un unique demi-produit étant étudié (fig. 4). De plus, il concentre 30 % de parties aciérées, soit 70 % de ferrite, ce qui le rend plutôt proche de la famille des types à tendance ferritique (fig. 6). Les trois autres types – 1M, 1L et 4C – exposent une situation beaucoup plus franche et se démarquent nettement de la famille des types à tendance ferritique. En moyenne, leur volume est composé entre 45 et 47 % d'acier. Cette moyenne dissimule de grandes variations, quelques demi-produits de chaque type étant aciérés, soit à hauteur de 20 %, soit à hauteur de 90 %. Cependant, selon une lecture globale, cette dispersion est moins accentuée, attendu que la majorité des demi-produits concentre entre 30 et 50 % d'acier. Si l'on exclut les zones de transition entre l'acier et la

ferrite, les parties carburées renferment toujours plus de 0,3 % de carbone, et une majorité entre 0,6 et 0,8 %, même si la teneur pondérée en carbone approche 0,4 % puisqu'elle prend également en compte les zones ferritiques. Dans cette famille à tendance aciérée, un seul type multi-loupes existe : le 1L (fig. 5 et 6). Sur neuf des barres de ce type, quatre présentent un assemblage de deux loupes qui ne sont pas de la même sorte : l'une est entièrement aciérée, tandis que l'autre a tendance à être essentiellement ferritique. Enfin, dans tous les demi-produits analysés, précisons que, vu le volume des zones aciérées et leur répartition spatiale dans chaque loupe, la teneur en carbone n'est pas consécutive à une cémentation, mais principalement déterminée par le processus de réduction directe du minerai.

Le fer phosphoreux est uniquement utilisé dans un type de demi-produit : le 4L, un type multi-loupes généralement formé de quatre loupes (fig. 5 et 6). Seules deux loupes composant ces barres ne sont pas constituées de fer phosphoreux, ou du moins d'une teneur en phosphore comprise entre 0,1 % et 0,6 %. Rappelons, en effet, que le phosphore n'est détectable qu'après l'attaque Oberhoffer des sections polies, à l'échelle micrographique, si son taux est inférieur à 0,6 %. Mentionnons également que cette observation a été réalisée sur deux demi-produits, les quatre autres étant pour l'instant uniquement examinés en macrographie à partir des deux grandes faces usinées et polies (fig. 4). Parallèlement, en termes d'alliage fer-carbone, ce type de demi-produit est, en très grande partie, constitué de ferrite, en moyenne 77 %. Cette moyenne n'est cependant pas représentative, parce qu'elle est ramenée à un degré inférieur par deux échantillons sur six qui concentrent beaucoup de zones aciérées.

Le travail de mise en forme

L'épuration et le compactage

Pour mettre en forme un demi-produit à partir d'une masse brute de fer, le compactage et l'épuration constituent les principales opérations réalisées. Elles visent à évacuer les inclusions de scories et de charbons de bois, et à éliminer les porosités tout en donnant un aspect au produit. La mise en forme est même inhérente à ce travail, étant donné que le compactage et l'épuration exigent le façonnage de faces. Toutefois, de multiples propriétés inclusionnaires ainsi que diverses formes peuvent être obtenues par cette manipulation thermomécanique. Étant donné que, jusqu'à présent, une relation étroite a été notée entre les caractéristiques métallographiques et les types, et qu'ici notre propos s'interroge particulièrement sur les correspondances qui peuvent exister entre la forme et la propriété inclusionnaire, les données sont présentées en moyenne en fonction des types morphologiques. Pour rappel, ce classement tient uniquement compte de l'échelle AFNOR NF A 04-106* et

du pourcentage de porosités et d'inclusions calculé à partir des sections polies (*supra*, tab. 1).

Dans le corpus des demi-produits des Saintes-Maries-de-la-Mer, la propreté inclusionnaire du matériau est d'une manière générale moyenne à très bonne (tab. 1 et fig. 7). Seuls deux types présentent un taux bas à très bas – 3C et 5C. Dans l'avenir, cette information sera vérifiée par l'analyse métallographique d'autres échantillons, vu que chacun des deux types n'est ici représenté que par un seul individu (fig. 4). Trois types, 2M, 4C et 4L, possèdent un taux moyen. Quant au type 1L, il comprend une propreté inclusionnaire élevée. Les types 1M et 6C en détiennent une très élevée.

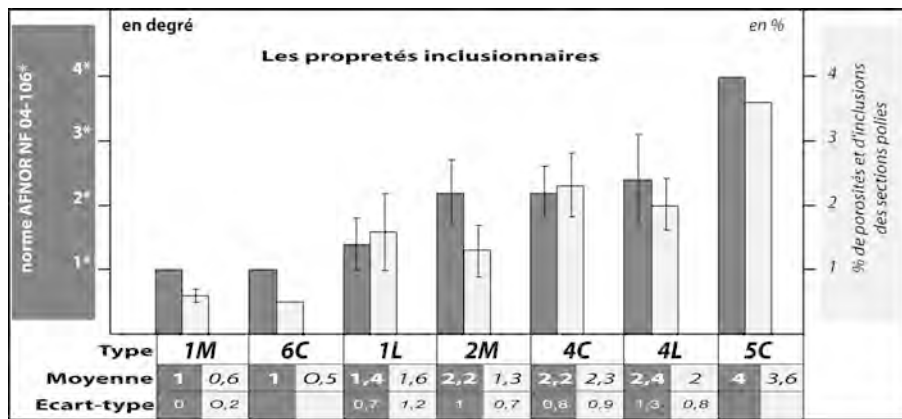


Fig. 7. La propreté inclusionnaire de chaque type morphologique de demi-produit des Saintes-Maries-de-la-Mer

Vu l'homogénéité des propretés inclusionnaires des échantillons de chaque type morphologique, la relation entre la forme et la propreté est vérifiée (fig. 7). Suivant cette piste, entre la section et la longueur, quel paramètre influence directement la propreté inclusionnaire ? La section apparaît être le caractère déterminant. Plus elle est aplatie, plus l'épuration du demi-produit est poussée. Ce n'est donc pas tant la petitesse de la section qui conditionne, au moins dans le corpus qui nous intéresse, la qualité de l'épuration et du compactage, mais son laminage, c'est-à-dire son aplatissement. À cet étirement sur la largeur est forcément combiné un autre étirement sur la longueur. Cependant, sous cet angle, ce dernier critère – la longueur – paraît dérivé du travail réalisé sur la section et non décisif de la propreté inclusionnaire, même s'il est peut être, pris sous un autre angle, fonctionnel et prédéterminé. La longueur paraît en effet d'abord conditionnée par le nombre de loupes assemblées (fig. 5). En deuxième lieu, elle est influencée par la qualité de l'épuration, mais, en aucun cas, elle ne la détermine.

Attendu qu'une petite masse brute de fer est plus facile à compacter et à épurer qu'une grosse, existe-t-il une incidence du volume de métal travaillé sur la propriété inclusionnaire ? Si pratiquement ce principe n'est pas à remettre en question, il ne doit pas être considéré de manière systématique et encore moins comme une règle. En effet, autant des petites loupes moyennement compactées et agglomérées peuvent rentrer dans la composition d'un type, comme le 2M, autant des grosses loupes ont vu leur épuration soignée pour former un type particulier, c'est le cas du 6C (fig. 5 et 7).

En se fondant sur les rares découvertes de la période romaine effectuées dans les Alpes comme dans le haut Languedoc, on sait qu'une masse brute de fer issue de la filière directe varie entre une dizaine et une trentaine de kilogrammes²². Ici, la masse est prise en compte au détriment du volume puisque le fer est encore souvent peu aggloméré. Or, chacune des loupes composant les demi-produits pèse au maximum 8 kg, et plus généralement 4 à 5 kg (fig. 5). Deux schémas de production peuvent donc être envisagés : soit, à l'origine, les masses brutes issues du bas fourneau sont petites – une dizaine de kilogrammes – et la perte en masse est consécutive à l'épuration, soit les productions sont plus volumineuses, et alors les masses brutes de fer sont débitées pour faciliter l'épuration et la mise en forme²³. S'il est très probable qu'un atelier de réduction utilise des techniques sensiblement identiques, étant donné que toutes les barres des Saintes-Maries-de-la-Mer ne proviennent certainement pas du même lieu, les pratiques de production et de fabrication peuvent être multiples²⁴.

Les soudures

Au même titre que le comptage et l'épuration, les soudures forment un critère de mise en forme. Elles interviennent particulièrement dans la fabrication des demi-produits constitués de feuilles ou corroyés, mais elles se retrouvent également dans ceux issus de loupes et particulièrement quand ces derniers sont multi-loupes. En effet, de multiples soudures sont réalisées lors de l'agglomération des porosités et des inclusions présentes dans la masse brute de fer et, moins fréquemment, lors du repli de partie(s) périphérique(s) de la loupe. Inhérentes à la phase d'épuration, elles sont subsidiaires, souvent peu visibles et donc peu appropriées pour renseigner le travail de mise en forme. Il en est tout autrement des soudures inter-loupes, particulièrement observées sur les types 1L et 4L (fig. 5).

22 C. Domergue éd., *Un centre sidérurgique romain de la Montagne Noire : Le Domaine des Forges (Les Martyrs, Aube)*, Paris, 1993. Ph. Fluzin, « Premiers résultats des études métallographiques concernant les masses de métal brutes », dans *Alle origini della siderurgia lecchese, Ricerche archeometallurgiche ai Piani d'Erna*, M. Tizzoni, C. Cucini, M. Ruffa éd., Lecco, 2006, p. 129-146.

23 *Ibid.*

24 *Op. cit.*, n. 16.

Dans les types 1L et 4L, d'une façon générale, toutes les soudures inter-loupes sont régulières et organisées de la même sorte. Les masses de fer sont, en effet, toujours mises en œuvre bout à bout, de manière à augmenter la longueur. Les assemblages sont donc perpendiculaires à la longueur. En revanche, ils s'étendent constamment en biais dans la tranche de la longueur. Or, durant l'Antiquité et le Moyen Âge, les soudures se font au blanc soudant²⁵ par le martelage de deux surfaces de fer mises en contact et préalablement amenées par chauffage à l'état pâteux et/ou liquide. Cette « organisation spatiale » des soudures indique que le martelage a donc été préférentiellement pratiqué à partir des deux faces opposées les plus larges et les plus volumineuses. L'assemblage, ainsi plus efficace et plus aisé à conduire, semble par conséquent toujours faire partie intégrante du processus de mise en forme et d'épuration. Il a donc été envisagé dans une même phase de travail, tout à fait volontairement pour augmenter la longueur du demi-produit, comme le laissait présager le nombre récurrent de loupes par type (*supra*).

L'essentiel des soudures observées est de grande qualité. Aucune porosité ni inclusion ne se trouvent sur leur tracé. Bien souvent, avant l'attaque au Nital, aux échelles micrographiques et macrographiques, elles ne sont d'ailleurs pas visibles, tant leur facture est élevée. Dans certaines barres moyennement épurées, comme celles du type 4L, il est cependant parfois possible de les repérer grossièrement dans les parties les mieux compactées et épurées, conséquence indirecte du martelage soutenu des parties assemblées.

La qualité des soudures est aussi reconnue par la variété des assemblages réalisés. Autant la ferrite que les aciers et les fers phosphoreux sont soudés, soit individuellement, soit conjointement, sans qu'aucun problème technique ne transparaisse dans les spécimens examinés.

Aucun ajout ne semble accompagner les soudures. Seul un assemblage présente une légère carburation qui paraît cependant anecdotique. La très grande majorité des soudures est plus ou moins localement décarburée. De fait, les soudures s'avèrent menées sans artifice ce qui souligne à nouveau, vu le volume des masses de fer à marteler et à chauffer, la grande habileté et la haute maîtrise technique associées à cette phase de travail.

Aussi, les demi-produits multi-loupes apparaissent, au moins dans le corpus des Saintes-Maries-de-la-Mer, comme des matières semi-finies singulières dont une de leur principale caractéristique est leur grande longueur que leur confère l'assemblage de plusieurs masses de métal. Le soin accordé aux soudures et le nombre récurrent de loupes mises en œuvre par type (*supra*) témoignent certainement de l'intérêt et de l'importance de cette pratique, dont les fondements sont peut-être à chercher dans les destinations fonctionnelles de ces demi-produits. Les soudures inter-loupes ne doivent donc pas être

25 Les soudures au blanc soudant sont également nommées « au feu de forge ».

envisagées comme un caractère négligeable, mais bien comme une spécificité décisive, prévue dès la fabrication du demi-produit, dans le dessein précis de lui attribuer une grande longueur.

DES QUALITÉS DE DEMI-PRODUITS AUX DESTINATIONS FONCTIONNELLES

Ainsi, les demi-produits sont formés de masses de fer parfois différentes, lesquelles sont composées d'alliages plus ou moins spécifiques avec des propriétés inclusionnaires variables. Dans le cadre d'une étude globale qui vise à comparer les découvertes, il est donc nécessaire de classer et de hiérarchiser les enseignements métallographiques par rapport à la qualité des matériaux et à leur valeur ajoutée. En conséquence, la mise en place d'une typo-métallographie paraît judicieuse. En aucun cas, elle n'est figée. Elle vise simplement à poser les soubassements, à dresser les grandes lignes directrices et enfin à mettre en exergue les perspectives enrichissantes d'une telle démarche, notamment quant à l'attribution des domaines de destinations fonctionnelles des demi-produits par rapport à leurs comportements mécaniques et à leurs spécificités morfo-fonctionnelles.

Pour une typo-métallographie

Des familles de demi-produits

Les demi-produits sont des produits semi-finis qui servent de matière première. Aussi, pour les fédérer et les classer en familles, le type d'alliage ferreux est le premier caractère à prendre en compte, parce qu'il détermine, avant toutes autres choses, la qualité du fer et donc celle du demi-produit. On distingue alors :

- entre 0 et 20 % d'acier²⁶ (ou de 80 à 100 % de ferrite²⁷), des demi-produits qualifiés de « ferritiques ». Ici, la teneur en carbone pondérée dépasse rarement 0,3 % ;
- entre 20 et 40 % d'acier (ou de 60 à 80 % de ferrite), des demi-produits qualifiés d'« hétérogènes ». La teneur pondérée en carbone peut atteindre 0,6 % ;
- entre 40 et 70 % d'acier (ou de 30 à 60 % de ferrite), les demi-produits seront qualifiés d'« aciérés composites ». La teneur pondérée en carbone peut atteindre 0,8 % ;
- entre 70 et 100 % d'acier (ou de 0 à 30 % de ferrite), les demi-produits seront qualifiés d'« aciérés ». La teneur pondérée en carbone peut atteindre 0,8 % ;

26 Pour rappel, l'acier est un alliage à base de fer contenant un poids important de carbone, entre 0,02 % et 1,8 %.

27 Pour rappel, la ferrite est un alliage à base de fer contenant très peu de carbone, au maximum 0,02 % du poids.

– entre 50 et 100 % d'un alliage avec une forte proportion de phosphore, les demi-produits seront qualifiés de « phosphoreux ».

Dans l'alliage du fer et du carbone, étant donné que deux qualités de métal – ferrite et acier – se distinguent, la mise en place des fourchettes de proportion pour qualifier les demi-produits est relativisée et calibrée par rapport aux techniques de production et d'élaboration. Or, dans le cadre de la réduction directe, l'obtention d'une loupe homogène en acier s'avère relativement difficile. Les demi-produits aciérés possèdent donc une fourchette avec un minimum bas. De ce fait, ils se placent dans un grand intervalle qu'il est nécessaire de diviser en deux groupes. Enfin, pour rendre compte de l'hétérogénéité des produits issus de la métallurgie directe et de l'existence de demi-produits mixtes, une zone tampon qualifiée d'hétérogène a été créée entre la famille des demi-produits aciérés et celle des ferritiques. Au sujet de l'alliage fer-phosphore, le problème ne se pose pas dans ces termes puisque l'on ne distingue qu'une seule qualité. La fourchette de proportion est donc établie de manière arithmétique à partir de la majorité absolue.

Leurs valeurs ajoutées

Chacune des familles, établie à partir du type d'alliage ferreux, peut être subdivisée par différents critères ayant trait à la valeur ajoutée du demi-produit, à savoir la différence entre la valeur finale du produit au prix du marché et la valeur initiale des matériaux et des services utilisés pour sa production.

Du point de vue du demi-produit, si l'on considère que toutes les réductions de minerai sont sensiblement identiques, le principal paramètre conditionnant la valeur ajoutée est le taux de compactage et d'épuration de(s) masse(s) de fer employée(s). Il traduit directement le degré de travail fourni pour fabriquer le demi-produit. Toujours apprécié à travers le prisme du demi-produit, si l'on envisage que les techniques de la réduction du minerai divergent, puisque vraisemblablement plusieurs ateliers alimentent la production de fer destinée à leur fabrication²⁸, le taux de compactage et d'épuration demeure un paramètre remarquable pour mesurer la valeur ajoutée, même s'il est la conséquence de phases de travail très différentes. En effet, dans cette configuration, la conduite habituelle de réductions dissemblables engendre la production de fers distincts, autant dans les alliages que dans les propriétés inclusionnaires. Or, aujourd'hui, juger de la valeur, selon laquelle tel ou tel alliage était apprécié, paraît dans bien des cas présomptueux, d'autant que chacun d'entre eux a des qualités mécaniques davantage complémentaires et différentes qu'opposées (*infra*). C'est pour cette raison que nous avons préféré les classer en familles, sans pour autant les hiérarchiser (*supra*). Quant aux propriétés inclusionnaires, il est certain que des masses brutes de fer ont

28 *Op. cit., supra* n. 16.

pu être produites dans des bas fourneaux, soit avec très peu de porosités et d'inclusions, soit en étant surchargées. Dans le premier cas, la phase d'épuration et de compactage est donc limitée, ce qui pourrait sous-tendre un biais dans notre raisonnement. La valeur ajoutée ne s'apprécie cependant pas qu'en termes de masse de travail, mais aussi en qualité technique. Aussi, dans les deux éventualités, l'appréciation de la propreté inclusionnaire est un bon jalon pour mesurer la valeur ajoutée, même si elle est consécutive à des phases de travail différentes.

La fabrication des demi-produits ne s'évalue pas qu'au niveau inclusionnaire. Les assemblages et les soudures forment également un paramètre déterminant. Une loupe fortement corroyée aura donc une valeur supérieure à une loupe uniquement épurée et mise en forme. Dans le même sens, l'assemblage de plusieurs loupes confère au demi-produit une importante valeur ajoutée, même si sa propreté inclusionnaire est basse.

Le classement des demi-produits des Saintes-Maries-de-la-Mer

Selon notre classement par famille et notre hiérarchisation par valeur ajoutée, les demi-produits des Saintes-Maries-de-la-Mer peuvent être ordonnés de la façon suivante (fig. 8) :

- dans la famille des demi-produits « ferritiques », trois types coexistent : 2M, 3C et 6C. Tous n'ont pas la même valeur, même s'ils sont tous formés d'une unique loupe. Le type 6C possède une haute valeur ajoutée en raison de sa propreté inclusionnaire très élevée. Vient ensuite le type 2M et enfin le type 3C avec une propreté inclusionnaire respectivement moyenne et basse ;
- la famille des demi-produits « hétérogènes » est uniquement représentée par le type 5C. Vu sa faible propreté inclusionnaire, il possède une valeur ajoutée basse ;
- la famille des demi-produits « aciérés composites » comporte trois types : 1M, 1L et 4C. Le type 4C possède une valeur ajoutée moyenne, tandis qu'en ce qui concerne les deux autres, elle est très haute. En effet, le type 1M renferme une propreté inclusionnaire très élevée et le type 1L, dont la propreté inclusionnaire est du reste élevée, est fabriqué à partir de l'assemblage de deux loupes ;
- dans le corpus des Saintes-Maries-de-la-Mer, la famille des demi-produits « aciérés » n'est pas matérialisée par un type en particulier, même si ponctuellement quelques individus associés aux types aciérés composites se rapprochent de cette famille ;
- dans la famille des demi-produits « phosphoreux », un seul type est présent : 4L. S'il est moyennement compacté et épuré, étant donné qu'il est construit autour de l'assemblage de quatre loupes, sa valeur ajoutée est élevée.

Types morphologiques	Synthèse des analyses métallographiques			Classement typo-métallographique		Domaines de destination fonctionnelle
	Matériaux mis en œuvre	Travail de mise en forme et d'épuration		Familles	Valeurs ajoutées	
	types d'alliage	nombre de loupes mises en œuvre	propretés inclusionnaires			
3C	87 % de ferrite (0,02 % de C)	1	basse	ferritique	basse	demi-produit ferritique "de base"
2M	85 % de ferrite (0,02 % de C)	1	moyenne		moyenne	
6C	80 % de ferrite (0,02 % de C)	1	très élevée		élevée	
5C	30 % d'acier à 0,3% de C pondéré	1	très basse	hétérogène	basse	tout venant hétérogène
4C	45 % d'acier à 0,4 % de C pondéré	1	moyenne	aciérée composite	moyenne	demi-produit aciéré "de base"
1L	46 % d'acier à 0,4 % de C pondéré	2	élevée		très élevée	destiné aux pièces très longues (plus d'1 m) et résistantes, ex : essieux, bandages de roues, ...
1M	47 % d'acier à 0,4-0,5 % de C pondéré	1	très élevée		très élevée	tout ou partie d'objets résistants et durs
4L	83% en alliage phosphoreux (0,1% < P < 0,6%)	4	moyenne	phosphoreux	élevée	éléments métalliques de gros œuvre

Fig. 8. Les demi-produits des Saintes-Maries-de-la-Mer : synthèse métallographique, classement typo-métallographique et destinations fonctionnelles

Des fers ordinaires et des fers spécifiques

La variété qualitative des demi-produits rencontrés, particulièrement dans le lot des Saintes-Maries-de-la-Mer, incite à pousser le raisonnement plus avant pour comprendre les domaines de destinations fonctionnelles de chaque demi-produit au travers de leurs comportements mécaniques et de leurs spécificités morfo-fonctionnelles.

Comportements mécaniques et spécificités morfo-fonctionnelles

L'acier a comme principale caractéristique d'être dur. Cette dureté peut être augmentée par un refroidissement brusque : la trempe. En contrepartie, il est cassant. Pour ces raisons, l'acier est particulièrement adapté aux tranchants et aux pointes des outils ou des armes, mais aussi aux surfaces de frottement comme les bandages de roue. Notons que, plus le taux de carbone est élevé, plus chacune de ces caractéristiques est exacerbée. Du point de vue du comportement mécanique, nous considérons comme étant de l'acier les

alliages contenant plus 0,2 % de carbone parce que, d'une part, entre 0,02 % et 0,2 % le comportement mécanique est proche de celui de la ferrite et, d'autre part, dans cette même fourchette, le métal ne prend pas la trempe, une des qualités primordiales des aciers.

À l'inverse, la ferrite possède une grande souplesse, mais en échange une assez mauvaise résistance mécanique. En résumé, elle est un métal particulièrement ductile, c'est-à-dire qu'elle peut se déformer très facilement – notamment à froid – sans se rompre. Grossièrement, la ferrite propose des qualités complémentaires à l'acier. Elle est par exemple mise en œuvre dans les âmes d'objets utilisés en percussion pour éviter tout risque de casse, mais elle peut également être utilisée dans une grande variété d'objets, du clou à la crémaillère en passant par la vaisselle métallique. Les aciers contenant moins de 0,2 % de carbone sont également incorporés à cette catégorie (*supra*).

Le phosphore est un élément qui fait perdre à l'acier ou à la ferrite sa ductilité. Plus largement, il rend le fer cassant et fragile. Son forgeage s'avère délicat, puisque l'alliage phosphoreux doit préférentiellement être travaillé entre 700 et 900°C, aux risques de se rompre à cause de décohésions intergranulaires²⁹. En résumé, ces multiples contraintes semblent prédestiner le fer phosphoreux à une mise œuvre grossière, dans le sens où les objets ne nécessitent pas de traitements mécaniques complexes. Ceci ne veut pas pour autant insinuer que ce métal a une faible valeur puisqu'il peut être privilégié pour fabriquer des objets massifs et robustes, comme les barres ou les crampons métalliques utilisés dans les constructions.

Le comportement mécanique du métal dépend également de la qualité du compactage et de l'épuration. La propreté du métal est le critère subsidiaire au type d'alliages ferreux utilisé. La persistance de vides ou d'inclusions peut en effet fragiliser une partie de l'objet au cours de son utilisation, mais également troubler le bon déroulement du forgeage notamment au niveau des parties fines. Au premier abord, les demi-produits plus correctement épurés et compactés semblent être voués aux objets complexes et/ou fins. Cependant, en pratique, une épuration et un compactage peuvent être réalisés avant le forgeage, quel que soit le demi-produit. Ils sont même inhérents à la phase de façonnage. Le taux de compactage et d'épuration ne permet donc pas de préciser strictement les types d'objets auxquels le demi-produit donnera naissance, mais il permet d'envisager le nombre d'étapes de travail

29 J. W. Stewart, J. A. Charles, E. R. Wallach, « Iron-phosphorus-carbon system. Part I to III », *Materials Science and Technology*, vol. 16, 2000, p. 275-303 ; A. Thouvenin, « Lingots de fer gaulois et techniques de forge », *Revue archéologique de l'Est et du Centre-Est*, vol. 35, 1984, p. 368-372 ; E. Vega, Ph. Dillmann, Ph. Fluzin, « Contribution à l'étude de fers phosphoreux en sidérurgie ancienne », *Archéométrie*, vol. 26, 2002, p. 197-208. E. Vega, Ph. Dillmann, M. L'Heritier, Ph. Fluzin, P. Crew, P. Benoît, « Forging of phosphoric iron. An analytical and experimental approach », dans *Archaeometallurgy in Europe. Proceedings of the International Conference, Milan, 2003*, Milan, 2003, p. 337-346.

supplémentaires qu'il faut pratiquer sur la matière pour arriver à forger tel ou tel objet. Par conséquent, la propreté du métal détermine la valeur ajoutée du demi-produit (*supra*).

La réduction directe du minerai de fer et l'épuration des masses brutes de fer sont deux phases de travail qui exercent de fortes contraintes sur la fabrication des demi-produits. Celle-ci est, en effet, fortement dépendante du volume maximum de fer monobloc pouvant être mis en forme : la loupe et/ou le fragment de loupe. Aussi, l'assemblage de plusieurs loupes constitue une pratique volontaire et prédéfinie qui doit être conçue comme une spécificité morpho-fonctionnelle visant à rendre au moins le demi-produit plus volumineux, sinon à l'allonger, comme les types 1L et 4L. Cette pratique doit donc davantage être rattachée aux domaines de destinations fonctionnelles du demi-produit qu'à un acte superflu.

L'utilisation variée des demi-produits des Saintes-Maries-de-la-Mer

En fonction des comportements mécaniques des différents alliages ferreux et des spécificités morpho-fonctionnelles, quelles sont les destinations des demi-produits des Saintes-Maries-de-la-Mer, à quoi servent-ils et dans quels objets ou partie(s) d'objets sont-ils utilisés ? La complexité des schémas de production incite à la méfiance quant aux interprétations trop rapides. Il faut surtout appréhender le problème dans sa globalité et éviter de restreindre les éventualités. Il est clair que la Gaule, dès la fin du I^{er} siècle avant notre ère, connaît un fantastique essor économique – campagnes de construction monumentale, remembrements fonciers, exploitations agricoles intensives... – même si elle est, notamment dans le Nord, encore sujette à une véritable politique de conquête³⁰. Toutes ces situations nécessitent clairement un formidable apport en matières premières sidérurgiques. En témoigne l'essor exceptionnel de la production primaire de fer, reconnu dans toute la Gaule³¹. Il ne faut donc pas cantonner les débouchés à une seule destination. Dans cette perspective résolument globalisante, il est seulement possible de constater que chaque demi-produit possède des domaines de destinations fonctionnelles de prédilection. Ceux-ci sont fonction de la qualité du métal qui, en termes pratiques, peut être envisagée sous l'angle double des comportements mécaniques et des spécificités morpho-fonctionnelles (*supra*).

Ainsi, les types ferritiques – 2M, 3C et 6C – sont préférentiellement utilisés dans des objets ou des parties d'objets qui sollicitent une flexibilité et/ou une malléabilité (fig. 8). Le type 6C semble davantage consacré aux éléments

30 C. Delaplace, J. France, *Histoire des Gaules : VI^e s. av. J.-C.-VI^e s. ap. J.-C.*, Paris, 2005.

31 C. Domergue, V. Serneels, B. Cauuet, J.-M. Pailler, S. Orzechowski, « Mines et métallurgies en Gaule à la fin de l'Âge du Fer et à l'époque romaine », dans *Celtes et Gaulois, l'archéologie face à l'histoire*, 5 : la romanisation et la question de l'héritage celtique. Actes de la table ronde de Lausanne, juin 2005, D. Paunier éd., Glux-en-Glenne-Bibracte, 2006, p. 131-162.

fins, tandis que les types 2M et 3C sont plus frustes et apparaissent comme des sortes de tout venant ferritiques. Les demi-produits aciérés composites et mono-loupes – 1M et 4C – sont vraisemblablement privilégiés dans le façonnage de tout ou partie de pièces qui réclament de la rigidité et de la résistance. Cependant, aucun d'entre eux ne paraît prédestiné à des ustensiles très « techniques », nécessitant l'emploi d'une masse uniquement aciérée, même s'ils peuvent y participer. Plus précisément, on peut envisager que le type 4C forme une sorte de demi-produit aciéré de base, comme le type 2M pour la famille ferritique. On peut rapprocher le type 5C de ce domaine de destination fonctionnelle, même s'il se place encore à un niveau inférieur, étant donné son hétérogénéité accrue. Le type 1M s'avère, quant à lui, probablement réservé à des pièces beaucoup moins grossières. Toujours dans cette famille aciérée composite, le type 1L constitue un cas particulier parce qu'il est fabriqué à partir de deux loupes qui lui confèrent une grande longueur – environ 1,1 m. De fait, il paraît conçu pour servir dans des éléments particulièrement longs et soumis à de fortes contraintes mécaniques, par exemple les essieux de charrettes ou les bandages de roues. Le type phosphoreux – 4L –, plus difficile à forger, mais surtout très long et très massif, grâce à l'assemblage récurrent de quatre loupes, semble être réservé aux éléments métalliques volumineux de très gros œuvre, comme les barres employées dans les constructions. Il ne faut cependant pas oublier que tous ces demi-produits sont susceptibles d'être débités et, par conséquent, de concerner des usages encore plus diversifiés.

CONCLUSION

L'étude de la qualité des demi-produits passe nécessairement par une analyse exhaustive de leur structure interne, laquelle doit impérativement être menée suivant un protocole rigoureux, pour rendre véritablement compte de la complexité, mais surtout des récurrences qualitatives des fers mis en œuvre. En effet, malgré l'hétérogénéité des productions issues de la filière directe, un regard global permet de déterminer que le fer antique ne peut pas être abaissé à une unique qualité, mais qu'il doit déjà être perçu comme un alliage qui se décline en une grande variété de matériaux, dont l'acier, mais aussi la ferrite et les fers phosphoreux. Suivant cet enseignement, les demi-produits peuvent être classés en familles d'alliages. Dans chacune d'elles, ils peuvent ensuite être hiérarchisés selon leur valeur ajoutée qui est déterminée par les différentes phases de travail auxquelles ils ont été soumis. En considérant de près le comportement mécanique et les spécificités morpho-fonctionnelles, il est alors possible d'envisager leurs domaines d'utilisations ; questionnement récurrent, au même titre que la provenance ; le demi-produit étant par essence une matière semi-finie réservée aux commerces et aux échanges.

Appliquée au lot exceptionnel des demi-produits provenant des épaves romaines des Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône, France), on mesure les perspectives enrichissantes d'une telle démarche. De nombreuses études ont déjà démontré l'essor important de la production et de la circulation de tous les métaux en Gaule au cours de l'Empire romain. Elles ont aussi souligné la standardisation des productions que l'on retrouve d'ailleurs aussi dans celles des vaisselles, des amphores, etc. Pour le fer, les travaux sur les normes ont souvent porté sur la masse ou le volume des matières afin de tenter de confondre les règles fiscales contrôlant le commerce. Des pistes ont également été ouvertes autour de la notion de provenance, sans jamais que des correspondances réellement satisfaisantes soient dégagées, peut-être parce que le fer a, jusqu'à présent, été considéré comme un matériau unique. Or, si l'acier est le métal ferreux emblématique, au moins des sociétés modernes et contemporaines d'Occident, il n'occupe pas de manière exclusive toute la panoplie des fers utilisés dès l'époque romaine et, très probablement antérieurement, dès la Protohistoire. D'autres alliages ferreux comme la ferrite et le fer phosphoreux composent la gamme des métaux ferreux disponibles. C'est d'ailleurs sur cette diversité des fers que s'articule la signification des différentes standardisations de demi-produits. La norme est fonction du contenu : à chaque type morphologique de barre correspond un alliage ferreux particulier, avec une propriété inclusionnaire distincte et, le cas échéant, des caractéristiques morpho-fonctionnelles évidentes. Il existe donc une correspondance entre la forme du demi-produit et le métal qu'il recèle. En éclairant d'un jour nouveau les recherches sur le standard, cette précision permet, non seulement, de clarifier les règles qui régissent le commerce du fer antique, mais aussi de révéler toute la complexité de ce trafic. En effet, elle illustre à la fois la grande variété des métaux dont disposaient les forgerons, mais aussi les conventions morphologiques établies entre les producteurs/négociants et les utilisateurs/négociants pour reconnaître les qualités du fer contenu dans le demi-produit.