

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)

Gaspard PAGÈS, Luc LONG, Philippe FLUZIN, Philippe DILLMANN

Résumé : Au large des Saintes-Maries-de-la-Mer, au débouché d'un des anciens bras du Rhône, onze épaves transportant principalement du fer ont été découvertes. Datée de la transition de notre ère (fin du I^{er} s. av. J.-C. - I^{er} s. ap. J.-C.), chacune livre entre 20 et 150 t de fer qui se déclinent sous la forme de huit demi-produits standardisés (types et sous-types compris) parfois estampillés. Nous proposons de préciser ces particularités typologiques et épigraphiques à travers des études archéométriques menées sur une cinquantaine de ces barres. Des caractéristiques métallographiques et chimiques sont alors dégagées dans chaque ensemble. Elles permettent de comprendre la réalité technique d'une typologie complexe et d'affiner les connaissances sur les circuits de production ferreux dans le monde méditerranéen antique.

Mots clefs : Antiquité romaine, métallurgie du fer directe, demi-produits, standard, destinations fonctionnelles, provenance, schéma de production et de commercialisation, métallographie, analyses chimiques inclusionnaires.

Abstract : Off the coast of Saintes-Marie-de-la-Mer, in the confluence of one of the ancient branches of the Rhone, eleven wrecks transporting mainly iron have been discovered. Dated from the turn of our era (the end of the first century BC - first century AD), each one delivers between 20 and 150 tons of iron which break down into eight standardized semi-finished products (types and subtypes included), sometimes stamped. We propose to specify these typological and epigraphic characteristics through archeometric studies undertaken on around fifty of these bars. Metallographic and chemical characteristics are then established in each unit. They make it possible to understand the technical reality of a complex typology and to refine our knowledge of the ferrous production networks in the Roman Mediterranean world.

Key words : Roman Antiquity, direct process of iron, semi-finished products, standard, functional destinations, source, diagram of production and marketing, metallography, chemical analyses of slag inclusions.

INTRODUCTION

Dans la majorité des métallurgies, le lieu de réduction du minerai est dissocié des endroits où le métal est transformé en objet. Il existe donc une circulation du métal du site de réduction aux ateliers de fabrication. Pour les métaux coulés, ce transport est réalisé sous la forme d'un lingot : une masse métallique fondue dans un moule. En Europe, jusqu'à la fin du Moyen Âge, le fer et l'acier ne sont pas des métaux coulés. La transformation du minerai se fait à l'état pâteux. Pour cette raison, dans le cadre de la sidérurgie antique et médiévale, plutôt que de parler de lingot qui implique la notion de fusion, on utilise le terme « demi-produit ».

Le demi-produit est le plus souvent élaboré à partir de la loupe, la masse de métal brute issue de la réduction directe du minerai en bas fourneau. À la sortie de cette opération, la loupe est généralement très hétérogène. Elle conserve en effet plusieurs zones non agglomérées et de nombreuses inclusions de charbons de bois et de scories de réduction. Cette hétérogénéité se traduit également

dans le matériau, dans la distribution du carbone dont la teneur peut varier de manière significative d'une zone à l'autre. La fabrication d'un demi-produit consiste à mettre en forme cette loupe en privilégiant l'épuration et l'agglomération de la matière, c'est-à-dire en tentant de compacter le métal et d'éliminer les impuretés. De ce travail thermomécanique découle une grande diversité de demi-produits, plus ou moins standardisés. Si la signification de ces morphologies est discutée plus avant dans notre propos, on peut d'ores et déjà mentionner deux des principaux avantages qu'offre le demi-produit : d'un côté, il est plus facile de le transporter parce qu'il est aisément arrangeable dans la cale d'un bateau ou sur une charrette, de l'autre, il constitue une masse de fer pratiquement prête à être utilisée par le forgeron.

En 2003, un large programme, développé au sein du Laboratoire « Archéologie des sociétés méditerranéennes » (UMR 5140, Lattes) et du « Laboratoire de Métallurgies et Cultures » (UMR 5160 - IRAMAT, Belfort) dans le cadre d'une thèse de doctorat en Archéologie ¹, a été entrepris sur les demi-produits ferreux de la

Protohistoire au Moyen Âge dans le midi méditerranéen. Il vise notamment deux objectifs. Corriger le déséquilibre documentaire concernant cet objet d'étude qui est traité du point de vue morphologique depuis le début du XX^e s. dans le nord de la Gaule, dans les îles britanniques et en Europe centrale, principalement à partir des nombreuses découvertes protohistoriques de *currency bars*² et de lingots bipyramidés (Crew 1994 ; Doswald 1994). Envisager une approche archéométallurgique du demi-produit qui prône une relation étroite entre le contenant et le contenu - pour reprendre un vocabulaire traditionnel en archéologie - ou, dans notre cas entre la forme et la qualité du métal dont dépend le comportement mécanique (Pagès *et al.* sous presse). En corollaire, cette démarche cherche également à alimenter et à exploiter des méthodes d'études archéométriques qui ont pour but de déterminer la provenance³ du métal. Plus globalement, cette recherche ambitionne de connaître précisément les différentes modalités techniques et économiques qui régissent, durant chaque époque, la circulation du matériau fer du lieu de production au lieu de consommation.

Pour ce faire, les études sont menées de manière à allier les sources archéologiques et archéométriques dans le cadre d'une approche archéométallurgique fondée sur des analyses adaptées, à savoir la métallographie et le dosage des éléments chimiques constituant les inclusions de scories primaires piégées dans le métal (Fluzin *et al.*

2000 ; Fluzin 2002 ; Fluzin *et al.* 2004 ; Dillmann *et al.* 2005 ; Dillmann, L'Héritier 2007).

Les mises au jour de demi-produits sont rares. Elles concernent essentiellement les contextes artisanaux comme les ateliers de forges et, pour la Protohistoire, les sanctuaires et les dépôts métalliques. D'autres découvertes moins traditionnelles se rapportent aux sites archéologiques liés à la circulation. En contexte terrestre, de tels lieux d'enfouissement sont exceptionnels, mais en revanche, en milieu aquatique, de nombreuses épaves fournissent un corpus de sites et un lot de demi-produits d'importance. Autour du pourtour méditerranéen, ces sites archéologiques sont restés pendant longtemps anecdotiques et, de fait, leur étude a été par la suite délaissée (Tchernia 1969 ; Fiori 1973 ; Solier 1981). Il a fallu attendre le début des années 1990, avec le développement de la Carte archéologique du littoral de Camargue (Bouches-du-Rhône) et l'exploration des premières épaves chargées de fer par Luc Long (DRASSM), pour voir le sujet se renouveler et surtout se développer à partir d'une documentation de référence, propre au midi de la France (Long 1993 ; Long 1994 ; Long *et al.* 2002). Aussi, notre propos se concentre sur ce corpus de demi-produits particulièrement homogène qui provient des épaves romaines chargées de fer découvertes au large des Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône) (fig. 1 et 2). Cette fenêtre ouverte sur le programme permet notamment

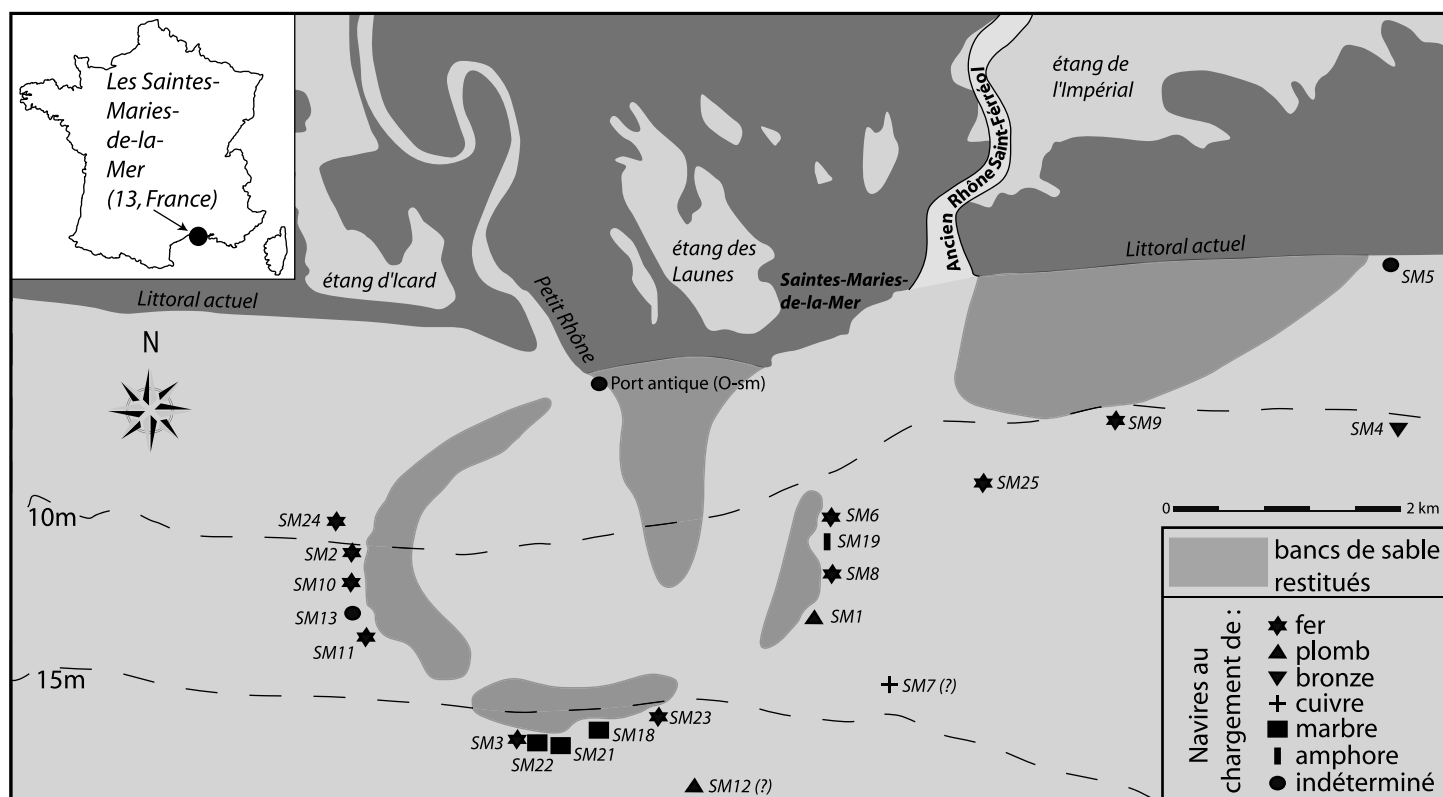


Fig. 1 : Localisation des épaves des Saintes-Maries-de-la-Mer, Bouches-du-Rhône, France (DAO G. Pagès, relevé Luc Long).

d'insister sur le protocole mis en place pour étudier ce type d'objets volumineux, pour lequel est favorisé un va-et-vient constant entre sources archéologiques et archéométriques, et échelles macroscopiques et microscopiques. Ensuite, une première série de conclusions est dressée pour illustrer la portée historique de telles études archéométallurgiques en termes de techniques, d'économies et de réseaux ⁴.

1. NAVIRES ET CHARGEMENTS

1.1. Les épaves

Au début des années 1990, Luc Long (DRASSM) commençait à explorer les premières épaves romaines chargées de fer au large des Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône) (fig. 1) (Long 1993 ; Long 1994). Aujourd'hui, plus d'une quinzaine d'années après, ce corpus compte 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 t de demi-produits et, pour quelques-uns plus petits, autour de 20 t. Au total, c'est donc environ 500 t de métal ferreux qui sont conservées (fig. 2). Plus remarquable encore est l'étroitesse de la fourchette chronologique et géographique dans laquelle se situent les navires naufragés. Tous sont échoués par 12-14 m de fond dans un rayon de 5 km, une étendue minime à l'échelle de la Camargue, et tous sont datés entre l'époque augustéenne et le 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.

Un fret complémentaire d'amphores de Bétique et de Tarraconaise est présent de manière récurrente sur les navires (fig. 2). Ces types de productions massives dans le monde romain n'autorisent pas une filiation stricte entre la provenance du navire et leur lieu de production. En revanche, elles ont permis de préciser la chronologie des échouements par ailleurs étayée par une datation ¹⁴C (*SM24*).

Au reste, des particularités de construction navale pourraient ranger certains de ces navires, notamment les épaves *SM2* et *SM24* qui présentent des membrures ligaturées, dans une famille spécifique d'allèges à fond plat (Long *et al.* à paraître). On pense par exemple aux navires utilisés par la corporation de naviculaires arlésiens – connue par plusieurs inscriptions (Rougé 1966 : 245-255 ; Christol 1971 ; Christol 1999) – dont la forme devait nécessairement se jouer du piège des embouchures et

notamment de la barre transversale du fleuve dont la hauteur d'eau, lors de certains étiages, ne dépassait pas 1,30 m. D'autres, comme l'épave *SM9*, si l'on en juge par la forme de sa membrure de type classique, appartenaient à la catégorie des bateaux de mer et ne pouvaient sans doute pas franchir la barre, vu leur tonnage. Le navire devait alors mouiller face au fleuve, dans une zone portuaire structurée et aménagée semblable à un véritable avant-port maritime d'Arles, afin que son chargement soit transféré sur des allèges, comme semblent le confirmer, en 2006, les dernières découvertes. Ultime particularité, un certain nombre de ces épaves chargées de fer présente des éléments de bois intercalaires, ainsi qu'un matelassage de paille et de sarments de vigne destinés à protéger les structures du plancher de cale et du fond de carène (fig. 2).

D'autres épaves antiques se distinguent dans ces parages par leur cargaison variée d'amphores, d'objets de bronze, de blocs de marbre ou de matières premières (fig. 1). C'est le cas par exemple des saumons de plomb de l'épave *SM1*, qui inaugura dès 1989, par 14 m de fond, une longue liste de découvertes. Au vu des contre-marques, ces cent lingots produits par *L. Flavius Verucla* étaient propriété impériale et voyageaient avec un fret complémentaire d'amphores à huile Dressel 20 d'époque flavienne (Long, Domergue 1995). 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, par 12 m de fond, au large des Saintes-Maries-de-la-Mer (Maréchal 1984). A l'ouest du Petit Rhône, par 16 m de fond, l'épave *SM12* a livré des lingots de plomb sphériques dont les incisions mentionnent le poids en livres romaines (Maréchal 1985). Enfin, légèrement plus au large, trois épaves chargées chacune de cinq à sept blocs de marbre ont été repérées face aux Saintes-Maries-de-la-Mer, par 16 à 18 m de fond (*SM18*, *SM21* et *SM22*). Ces découvertes confirment l'importance de la voie rhodanienne dans la diffusion en Gaule des matériaux pondéreux, en particulier les marbres méditerranéens, même si le fer n'est pas en reste.

La situation géographique de toutes ces épaves, dans un mouchoir de poche à l'échelle de la Camargue, indique que les navires ont cherché à se positionner volontairement devant l'entrée du Rhône Saint-Ferréol (fig. 1). 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. Ces navires, que le recul régulier du rivage depuis l'Antiquité place aujourd'hui à près de 3 km en mer, 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. On attribue, en effet, leur perte à la présence de trois bancs de sable parallèles à la côte, y compris aux embouchures qui revêtent la forme d'un vaste lobe (fig. 1). Les dangers de ce phénomène naturel et séculaire sont responsables de nombreux échouages depuis l'Antiquité jusqu'à nos jours, dont les plus récents sont confirmés dans les archives modernes.

Compte tenu de l'expérience des navigateurs et capitaines, il eût été possible, à la seule inspection des eaux salées par le fleuve, de prendre conscience du danger. Il existait, par ailleurs, d'autres routes qui évitaient les atterrissements du Rhône et les pièges d'une côte basse et peu discernable. On connaît, par exemple, un axe maritime plus au large, qui relie Narbonne à Rome et sillonne des fosses profondes. L'existence d'un chargement de fer semblable, échoué devant le port de Fos-sur-Mer, l'épave *Saint-Gervais I*, atteste sans doute par ailleurs que d'autres navires tentaient de rallier le Rhône par une autre de ses branches (Monguilan 1987). Mais les récentes découvertes de demi-produits de fer semblables aux nôtres, dans le lit du Rhône à Arles, ainsi qu'à Montbellet (Saône-et-Loire) et à Ouroux (Saône) (Bonnamour 2000b : 144), renforcent l'hypothèse d'un métal destiné par voie fluviale à une diffusion en Gaule, ou du moins, si l'origine de ces derniers était différente, d'une généralisation du standard de ces demi-produits et, par conséquent, de leur distribution à moyenne et grande distances (*cf. infra*).

En résumé, le corpus d'épaves des Saintes-Maries-de-la-Mer, exceptionnel par sa conservation, sa richesse, sa contemporanéité et sa lisibilité, reflète un instantané de la circulation maritime des demi-produits ferreux au début de l'Empire.

1.2. Les demi-produits

Les estimations quantitatives qui, au total, évaluent la présence d'environ 500 t 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 (fig. 2). 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 compte deux autres épaves visiblement chargées de fer qui se sont échouées au large de Palavas, sur une route qui menait au Rhône de Saint-Ferréol (Maréchal 1998 ; Maréchal 2003 ; Rauzier 2007).

Dès la fin des années 1990, la remontée à la surface dans de très mauvaises conditions de travail d'une partie des chargements métalliques a révélé la récurrence morphologique des demi-produits enfouis. Dans ces

conditions, une typologie reposant sur les dimensions des sections a été rapidement ébauchée, individualisant ainsi d'abord six formes caractéristiques par des numéros (Long 1997a : 84-86 ; Long 1997b : 76-77). Plus récemment, la découverte de nouvelles épaves a permis de compléter et d'aménager cette typologie (fig. 3). Dans un souci de continuité scientifique, le premier critère distinctif – la section – a été conservé, mais enrichi d'un sous-type qui intègre les caractéristiques de la longueur plus systématiquement ; avec C pour courte, M pour moyenne et L pour longue (Long *et al.* 2005 ; Coustures *et al.* 2006 : 247-249). 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. Plus globalement, ce corpus comporte des demi-produits qui vont du simple petit barreau à la barre très massive. Ainsi les longueurs sont-elles comprises entre 20 et 200 cm, et les masses entre 1,5 et 33 kg (fig. 3).

Tous ces navires ne possèdent pas un chargement identique que ce soit en masse totale ou en fréquence de types (fig. 2). 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.

La remarquable conservation des barres de fer des Saintes-Maries-de-la-Mer a également permis de préserver la lisibilité des estampilles apposées sur un grand nombre d'entre-elles. Aussi, un autre volet de recherche a été ouvert dans cette direction. Ce dernier étant détaillé dans de nombreuses publications, nous n'y reviendrons pas ici d'un point de vue descriptif (Long *et al.* 2002 : 179-182 ; Djaoui 2003 ; Coustures *et al.* 2006 : 249-252 ; Djaoui, Long 2007 ; Long, Djaoui 2007).

2. DES BARRES DE FER AUX MATÉRIAUX

2.1 Mode opératoire

2.1.1. Échantillonnage

Les études archéométriques sont nécessairement employées sur un nombre limité de spécimens ; le temps et le coût de chaque opération étant élevés. Pour remédier à ce rétrécissement du corpus étudié, il faut donc prendre

Navires			Caractéristiques du chargement de demi-produits											
nom	datation	dimen- sions (m)	agencement	préparation du fond de la cale	matériels connexes et/ou de datation	types de demi-produits transportés								estimation en tonnes
						1M	1L	2M	3C	4C	4L	5C	6C	
SM2	1-25	16 x 5		listons de 6cm d'épaisseur + tapis de sarments de vigne	Dressel 2-4 (x20) Dressel 20 (x1) Dressel 7-11 (x1) Halterne 70 (x6)									100 / 150
SM3	1-60				Dragendorff 15a1(x1)									20 / 50
SM6	50av.-1				Morel 2270, meta de meule romaine de 65 cm de diamètre									20 ?
SM8	1-50		en faisceaux croisés		fragments d'amphores hispaniques à saumure									20 ?
SM9	25-50	16 x 5	rangement en paquets	lit de paille et lit de sarments de vigne	gladius à pointe longue de type Mayence									100 / 150
SM10	1-100	10 x 3	rangement longitudinal surmonté de demi- produits en travers		amphores hispaniques ?									20
SM11					tessons d'amphores									
SM23	50av.- 100ap.	16 x 5												20 ?
SM24	120av- 75ap	20 x 6			datation ¹⁴ C									5 (chargement partiellement récupéré ?)
SM25	antique	16 x 5		tapis de sarments de vignes croisés										100
SM27														
										Total			405/535	

Fig. 2 : Les épaves des Saintes-Maries-de-la-Mer. Caractéristiques, chargements et datation (G. Pagès).

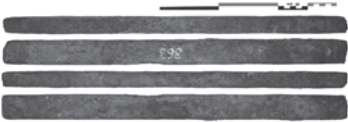
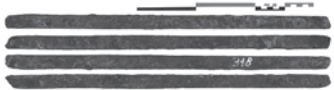
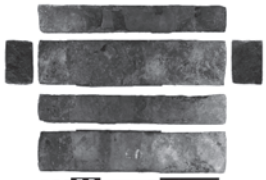
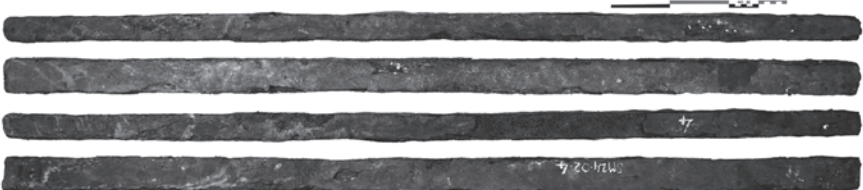
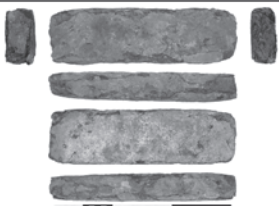
Illustrations	Sections l x e (cm)	Longueur (cm)	Masses (kg)	Estimations quantitatives	Codes
	4 (+/- 1,1) x 2 (+/- 0,5)	54 à 61	2,5 à 4	+	1M
		75 à 140	8 à 11	++	1L
	3,5 (+/- 0,5) x 2,5 (+/- 0,5)	40 à 71	1,5 à 5	+++	2M
	4 (+/- 0,5) x 3,5 (+/- 0,5)	30 à 38	1,5 à 4,5	+	3C
	6 (+/- 1,5) x 5 (+/- 1,5)	20 à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

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

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 morphologique du demi-produit 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. 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 (fig. 4).

Ainsi, quarante-neuf demi-produits ont été prélevés pour être analysés en archéométrie. Ils se rapportent aux huit types morphologiques. En revanche, ils ne proviennent que de six des onze épaves reconnues. Si, pour l’essentiel, cet échantillonnage est satisfaisant et permet d’afficher une vision d’ensemble avec des recoupements, la faible disponibilité documentaire des types 3C et 5C engendre une représentativité limitée de nos études à leur sujet (fig. 4).

2.1.2. Protocole et précautions méthodologiques

Les demi-produits sont des pièces métalliques plus ou moins volumineuses, pouvant peser plus de 30 kg et mesurer pratiquement 2 m de long. Dans le cadre d’études archéométriques, toute la difficulté est de pouvoir réaliser un va-et-vient constant entre les échelles d’analyses pour connaître précisément la représentativité de la zone observée en micrographie par rapport à l’ensemble du demi-produit. Cette procédure est totalement indispensable compte tenu de la réduction du métal en phase solide qui se traduit par une très forte hétérogénéité du matériau. Aussi, un prélèvement effectué à l’aveugle dans une petite zone aurait peu de chance d’être représentatif de l’intégralité du demi-produit. Un protocole spécifique a donc été

Epaves / Types	1M	1L	2M	3C	4C	4L	5C	6C	Total
SM2	524				311				835
SM3									
SM6			100	100	300		111	411	1022
SM8									
SM9		644	323		435				13912
SM10	426								426
SM11	indéterminé								
SM23									
SM24					200	627			827
SM25			622						622
SM27	indéterminé								
Total	9410	644	1045	1000	1246	627	111	411	492034
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 (G. Pagès).

élaboré pour supporter les études métallographiques qui visent à déterminer la qualité du métal de manière exhaustive en prenant en compte l'ensemble du demi-produit (fig. 5). Ce protocole intègre également un autre type d'examen archéométrique qui permet de discerner différents groupes de provenance du métal, sans pour autant localiser strictement leur origine : l'étude des inclusions

au Microscope Électronique à Balayage (MEB) par Spectrométrie X Dispersive en Énergie (EDS pour Energy Dispersive Spectrometry). Au final, ce protocole peut paraître fastidieux, notamment en temps et en manipulations : trois usinages, quatre polissages, trois attaques acides, deux observations macroscopiques et quatre microscopiques au minimum par demi-produit (fig. 5).

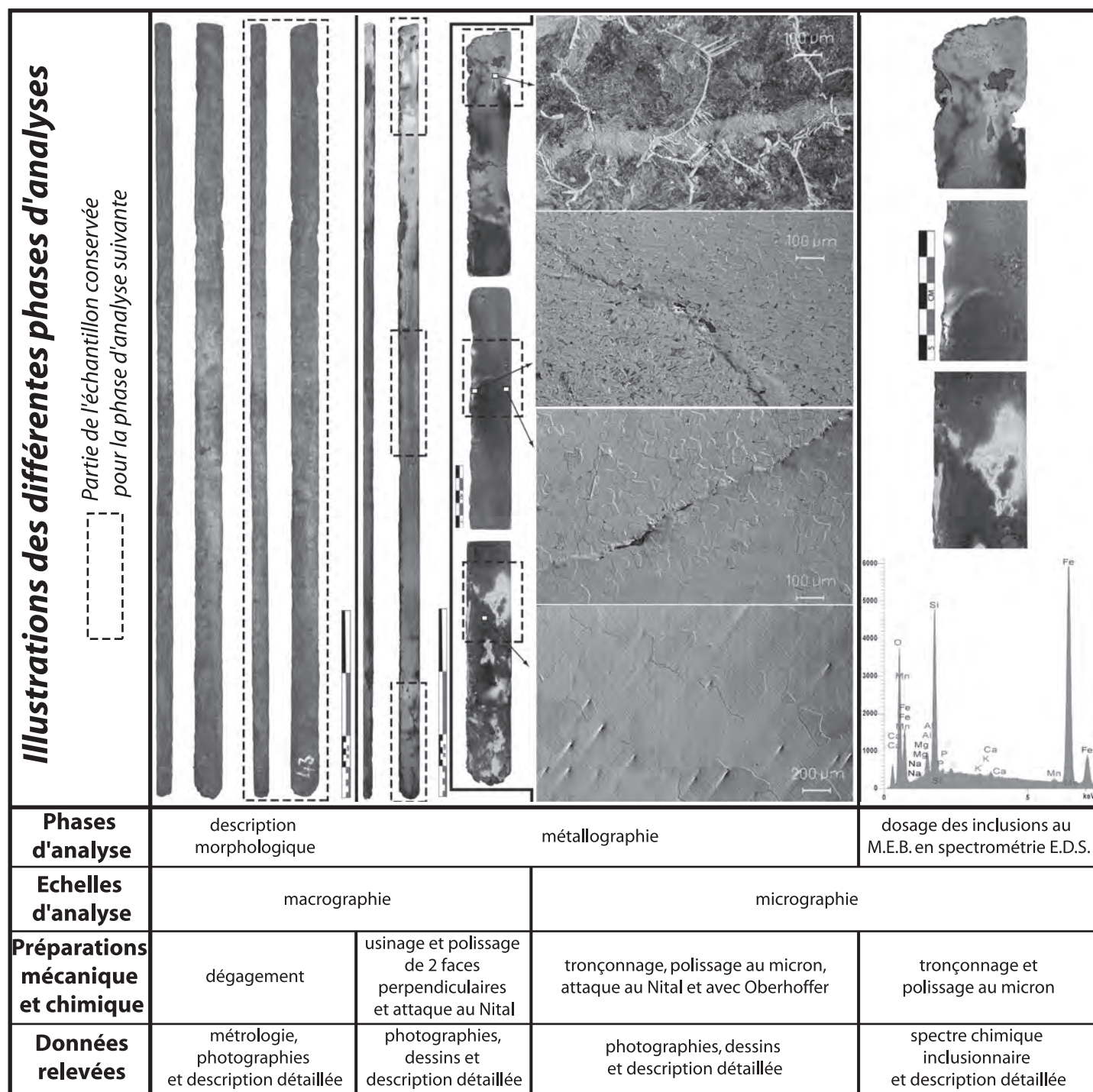


Fig. 5 : Organigramme du protocole d'analyses archéométriques (G. Pagès).

Au-delà de ces aspects cependant, il est le seul à même de calibrer et de considérer, par rapport à la totalité des demi-produits, les différentes échelles et les différents moyens d'analyses. Cela permet de donner des résultats significatifs intégrant l'hétérogénéité naturelle de la majorité des produits de la sidérurgie directe. Toute approche ne tenant pas compte de cette démarche se doit d'être perçue avec prudence.

La métallographie

Le premier volet du protocole concerne l'étude métallographique des demi-produits ; celle-ci est réalisée au sein du Laboratoire de Métallurgies et Cultures (UMR 5060-IRAMAT, Belfort) (fig. 5).

Au préalable, la première étape documente la provenance archéologique, la morphologie, la métrologie et les autres caractères distinctifs. 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 0,1-0,2 % -, l'hétérogénéité structurale, mais également la présence de certaines soudures et, par conséquent, l'éventuel assemblage de plusieurs loupes. Le type d'alliage fer-carbone est ensuite contrôlé et déterminé plus précisément au niveau microscopique en métallographie traditionnelle (*cf. infra*). À partir de ces différents examens, des sections de 20 cm de long - jusqu'à cinq par barre selon leur longueur - 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 et de la texture 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 successives - Nital à 4 % et Oberhoffer - séparées par un autre polissage fin, sont une dernière fois réalisées pour révéler la structure et respectivement qualifier les aciers et les zones phosphoreuses. Ici, la propreté inclusionnaire est également évaluée par l'observation micrographique. Selon cette procédure, quarante-neuf demi-produits ont été examinés en métallographie à l'échelle macrographique. Dans ce lot, vingt demi-produits ont été étudiés en métallographie à l'échelle micrographique à partir de trente-quatre sections (fig. 4).

Pour retranscrire ces différentes observations, plusieurs procédés de mesure sont utilisés. 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 observées respectivement en macrographie et micrographie - à l'aide d'un logiciel de traitement d'image ⁵. À l'échelle micrographique, la propreté inclusionnaire est également chiffrée selon la norme AFNOR NF A04-106, corrigée d'un facteur 10 et, par conséquent, suivie d'un astérisque (L'Heritier *et al.* 2005 : 118-120). On considère qu'une bonne propreté inclusionnaire correspond à un taux d'inclusions et de porosités inférieur à 1 % et à l'échelle 1* de la norme AFNOR NF A04-106. Cette notion est relativisée par rapport à la masse du demi-produit - un petit volume étant plus aisément traité qu'un gros - et aux observations micrographiques qui ont permis d'estimer la présence par exemple de replis. Dans la mesure où la propreté inclusionnaire est fortement dépendante de la phase d'épuration et de compactage, plus elle est élevée plus la valeur ajoutée du demi-produit est haute. Le nombre de loupes assemblées pour constituer un demi-produit influe également sur le critère de la valeur ajoutée (Pagès *et al.* sous presse).

En ce qui concerne la qualité de l'alliage, les paramètres à prendre en compte sont plus compliqués, parce qu'ils doivent intégrer la notion d'hétérogénéité attachée à tous les produits issus de la filière directe. Dans ces conditions, une teneur absolue en carbone seule ne permet pas de caractériser la qualité de l'alliage ferreux. Pour cela, il est nécessaire de prendre en effet 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 aciérées 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 de l'observation micrographique des surfaces occupées par les différents types d'alliage fer-carbone ⁶. La proportion des zones phosphoreuses - 0,1 % < P < 0,6 % - est, pour sa part, évaluée grâce à l'observation micrographique des sections après l'attaque Oberhoffer par l'intermédiaire, là aussi, d'un logiciel de traitement d'image (Pagès *et al.* sous presse).

L'analyse chimique micro-inclusionnaire

Le second volet analytique concerne le dosage des éléments chimiques majeurs constituant les micro-inclusions au MEB par spectrométrie EDS, réalisé au sein d'une structure mutualisée entre le Laboratoire Pierre Süe (UMR 9956, Saclay) et le Laboratoire de Métallurgies et

Cultures (UMR 5060-IRAMAT, Belfort) au Commissariat à l'Énergie Atomique de Saclay (fig. 5). Le détecteur EDS est équipé d'une fenêtre mince qui permet de doser tous les éléments chimiques majeurs, dont le numéro atomique est supérieur ou égal à celui de l'oxygène, avec une bonne précision si leur teneur en masse est supérieure à 1 % – de l'ordre de 2 % d'erreur relative. Les teneurs massiques sont exprimées en équivalent oxyde et normalisées à 100⁷. Afin d'éviter les effets de concentration locale, seules les inclusions de section supérieure à 20 x 20 µm² sont considérées.

La spectrométrie EDS autorise la mesure d'un grand nombre d'inclusions dans un même objet. Elle permet donc d'accéder à des paramètres quasi-statistiques spécialement à même de saisir un objet hétérogène dans sa complexité, ce qui est le cas des produits de la sidérurgie directe comme les barres des Saintes-Maries-de-la-Mer. Ce faisant, dans chaque loupe, une cinquantaine d'inclusions est mesurée. Afin de pouvoir reconstituer une teneur globale représentant une tendance générale, que l'on nomme macroscopique, des teneurs moyennes pondérées sont calculées à partir de ces cinquante dosages et de la surface de chaque inclusion. Leur dénomination est suivie d'un astérisque de manière à les distinguer des dosages dits microscopiques. L'avantage de cette approche, par ailleurs démontrée (Dillmann, L'Héritier 2007), est qu'elle permet de rendre compte d'une composition moyenne de la scorie qui a donné naissance aux inclusions et, ainsi, de s'affranchir des éventuels effets de concentration locale liés aux dosages microscopiques de produits hétérogènes.

Au cours de la réduction directe en bas fourneau, plusieurs composés – contenant les éléments chimiques magnésium, aluminium, silicium, potassium et calcium – combinés au minerai de fer ne sont pas réduits et migrent totalement dans les inclusions de scorie primaire piégées dans le métal. Ils s'y retrouvent alors sous forme d'oxydes. Les composés qui en résultent sont appelés Composés Non Réduits ou CNR. Constituant le plus souvent majoritairement le minerai, ces composés sont aisément détectables par spectrométrie EDS. Toutefois, leur teneur peut être polluée par d'autres apports provenant des charbons de bois – magnésium, potassium et calcium –, des parois du bas fourneau – aluminium – et, à l'occasion, de fondants – calcium. L'influence de ces apports sur les teneurs initiales est variable et dépend de la composition du minerai ainsi que du fonctionnement du bas fourneau. De plus, ces teneurs fluctuent en fonction du processus de réduction puisque le minerai de fer est réduit en métal selon un rendement variable. Partant, ces teneurs deviennent inaccordables avec un minerai spécifique ou une origine quelconque. En revanche, il a été démontré que les rapports de ces CNR signent un système de réduction lorsqu'ils sont calculés à partir des teneurs moyennes pondérées. Ce système de réduction est défini par un minerai, un bas

fourneau, des charbons de bois, des ajouts et la conduite de la réduction. Les rapports des CNR déterminent donc particulièrement l'ensemble des paramètres d'un atelier usant de pratiques lui étant propres, à la condition *sine qua none* que les réactifs et les processus ne varient pas ou peu (Dillmann *et al.* 2005 ; Dillmann, L'Héritier 2007).

Parallèlement à ces éléments qui migrent totalement dans la scorie, d'autres éléments, comme le phosphore, peuvent partiellement être incorporés au métal pendant la réduction. Leur utilisation dans les rapports des CNR est donc proscrite, mais leur présence en teneur moyenne pondérée absolue, quand elle est supérieure à environ 5 %_{mass}, atteste sans conteste de l'utilisation d'un minerai possédant une composition en phosphore non négligeable (Vega *et al.* 2002 ; Vega *et al.* 2003). Enfin, d'autres éléments ne peuvent provenir que du minerai. C'est le cas du manganèse, dont le comportement lors de la réduction est encore mal connu. Par conséquent, lui aussi ne peut être utilisé dans les rapports des CNR. En revanche, sa teneur moyenne pondérée absolue supérieure à 3-4 %_{mass} peut être considérée comme une signature spécifique par rapport à d'autres produits en possédant moins de 1 %_{mass}.

Ainsi, en considérant d'une part, certains rapports de CNR et, d'autre part, la présence en grandes ou en petites quantités de phosphore et de manganèse, il est possible de différencier des groupes de provenance. En contrepartie de cette conception séduisante de la filiation, cette méthode ne peut s'appliquer qu'à des lots homogènes de mobiliers archéologiques. Les barres provenant des navires romains échoués au large des Saintes-Maries-de-la-Mer s'y prêtent donc particulièrement.

Quelle que soit l'analyse chimique micro-inclusionnaire utilisée, précisons qu'il est nécessaire de s'assurer que les inclusions dosées soient directement issues de la réduction du minerai et qu'elles ne soient pas consécutives à des ajouts employés lors du forgeage, notamment au moment de la réalisation de soudures. De fait, les zones étudiées doivent être reconnues et caractérisées en métallographie selon le protocole décrit (*cf. supra*) (fig. 5). De cette manière également, ce ne sont plus les demi-produits, mais les loupes qui se retrouvent au cœur du raisonnement sur la provenance ; un demi-produit pouvant être formé de l'assemblage de plusieurs loupes émanant de différents lieux. Dans le lot des Saintes-Maries-de-la-Mer, vingt demi-produits ont été étudiés en métallographie à l'échelle micrographique à partir de trente-quatre sections. Ce sont donc les inclusions de ces trente-quatre dernières sections qui ont été dosées à raison d'au moins une cinquantaine de mesures par loupe. Les mille cent dosages obtenus par spectrométrie EDS⁸ sont le fondement de la démonstration qui permet de différencier des groupes de provenance (fig. 4 et 5).

2.2. Bilans métallographiques

L'ensemble des analyses métallographiques révèle une corrélation entre la forme et les caractéristiques physiques du métal employé : chaque type de demi-produit semble attaché à une qualité de métal particulière (fig. 6). Vu l'échantillonnage, cette correspondance n'est pas liée à une épave, mais se retrouve de manière récurrente, dans tous les chargements de navires étudiés. En d'autres termes, on peut supposer que la forme des demi-produits détermine, aux yeux des utilisateurs antiques, un type d'alliage précis. Plus particulièrement, quatre familles de demi-produits se distinguent : ceux qui sont aciérés, ceux qui sont hétérogènes, ceux qui sont en ferrite et ceux dont l'alliage ferreux possède une teneur en phosphore élevée. On peut penser raisonnablement que ces différentes qualités d'alliages vont conduire à des comportements mécaniques distincts qui sont appréhendés par les producteurs et utilisateurs antiques (Pagès *et al.* sous presse).

2.2.1. Les demi-produits aciérés

Dans la famille des demi-produits aciérés, le type 4C forme un demi-produit à faible valeur ajoutée, disons « de base » (fig. 6). En moyenne, 45 % de son volume est aciéré à hauteur de 0,4 % de carbone. Provenant toujours d'une unique loupe, il est souvent moyennement épuré et compacté.

Le type 1L correspond à un demi-produit aciéré comme le type 4C à deux exceptions près (fig. 6). D'une part, il est toujours constitué de deux loupes qui permettent de lui conférer une grande longueur, environ 1,1 m. D'autre part, il est généralement mieux épuré. Ce type ne forme donc pas un type aciéré « de base », mais un type aciéré à plus haute valeur ajoutée avec, comme principal atout, une grande longueur dont le façonnage a été possible grâce à l'assemblage de deux loupes. Cette spécificité remarquable est toujours prévue dès la fabrication du demi-produit, probablement pour que ce type soit mis en œuvre dans des pièces aciérées de très grande longueur.

Dans cette même famille de demi-produits aciérés, il existe un dernier demi-produit spécifique (fig. 6). Il s'agit du type 1M. Ici, les zones aciérées couvrent généralement 47 % du volume en moyenne à 0,5 % de carbone. Il est toujours issu d'une unique loupe très correctement compactée et épurée. Il forme par conséquent un demi-produit aciéré à très haute valeur ajoutée.

2.2.2. Les demi-produits hétérogènes

Un seul type compose la famille des demi-produits hétérogènes ; il se place à la transition entre ceux aciérés et ceux ferritiques (fig. 6). Le type 5C caractérise un demi-produit à très faible valeur ajoutée, une sorte de tout-venant. Il possède en effet de manière générale 30 %

de son volume en acier à hauteur de 0,3 % de carbone. De plus, le compactage et l'épuration de son unique loupe sont médiocres. D'autres études métallographiques viendront confirmer cette hypothèse, puisqu'un seul spécimen a été étudié (fig. 4).

2.2.3. Les demi-produits ferritiques

À l'opposé de ces types aciérés, se trouve la famille des demi-produits essentiellement constitués de ferrite. Elle correspond à ce que l'on nomme fer doux.

Le type 2M constitue le demi-produit « de base » de cette famille comme peut l'être le type 4C pour les types aciérés (fig. 6). Très majoritairement formée d'un alliage ferritique à 0,02 % de carbone (85 % du volume), son unique loupe est la plupart du temps moyennement compactée et épurée.

Le type 3C possède des caractéristiques structurales sensiblement équivalentes au type 2M, mais cette similitude devra être vérifiée par d'autres analyses archéométallurgiques, un seul spécimen de ce type ayant été étudié (fig. 4 et 6). Pour l'heure, la forte ressemblance morphologique entre ces deux types et leurs analogies structurales pourraient laisser envisager qu'ils ne forment, en définitive, qu'un seul type avec une variabilité métrologique inhérente au volume des loupes utilisées.

Le type 6C est un demi-produit ferritique à haute valeur ajoutée (fig. 6). Toujours constitué d'une unique loupe très correctement compactée, il possède en moyenne 80 % de son volume en ferrite.

2.2.4. Les demi-produits phosphoreux

La dernière famille est représentée par les demi-produits qui sont constitués d'un alliage avec une teneur en phosphore élevée (fig. 6). Un seul type la compose : le 4L qui est formé d'environ 83 % de zones phosphoreuses. Ce type de demi-produit est par ailleurs très allongé et possède une section importante. Pour ce faire, il est mis en œuvre à partir d'un assemblage en moyenne de quatre loupes, par ailleurs moyennement compactées. Sa morphologie très allongée et très massive, son taux de compactage et d'épuration intermédiaire et son alliage phosphoreux, plutôt difficile à forger (Stewart *et al.* 2000 ; Vega *et al.* 2002 ; Vega *et al.* 2003), semblent prédestiner ce type de demi-produit aux très grosses pièces de métal monobloc, telles celles utilisées dans le gros œuvre.

2.3. Bilans chimiques micro-inclusionnaires

2.3.1. Des loupes aux caractéristiques chimiques singulières

D'un point de vue méthodologique, les demi-produits ne sont pas systématiquement constitués d'une unique loupe, qui forme, pour rappel, la masse brute de fer issue

Famille	Code	Qualité du métal		Spécificités morpho-fonctionnelles		Destination fonctionnelle		Valeur ajoutée
		type d'alliage	taux de compactage et d'épuration	nb de loupe	caractéristique fonctionnelle de la forme			
<i>des demi-produits aciérés</i>	4C	45 % d'acier à 0,4 % de C	moyen	1	barreau = forme inhérente au compactage et à l'épuration	pour des objets et des parties d'objets devant être résistants et durs	demi-produit aciéré «de base»	moyenne
	1L	46 % d'acier à 0,4 % de C	élevé	2	grande barre = assemblage de 2 loupes correctement épurées pour obtenir une grande longueur d'environ 1,1		demi-produit aciéré destiné aux pièces très longues et résistantes comme les essieux et bandages de roues de charrette	
	1M	47 % d'acier à 0,4-0,5 % de C	très élevé	1	barre = forme destinée à favoriser la qualité de l'épuration		demi-produit aciéré de qualité	élevée
<i>des demi-produits hétérogènes</i>	5C	30 % d'acier à 0,3 % de C	très bas	1	barreau en « saumon » = forme inhérente au compactage et à l'épuration	demi-produit hétérogène « de base » sans destination particulière		basse
<i>des demi-produits ferritiques</i>	3C	87 % de ferrite (0,02 % de C)	bas	1	barre = forme destinée à favoriser la qualité de l'épuration	pour des objets et des parties d'objets ductiles (capacité à être allongés, étirés, étendus sans se rompre)		basse
	2M	85 % de ferrite (0,02 % de C)	moyen	1	barre = forme destinée à favoriser la qualité de l'épuration			
	6C	80 % de ferrite (0,02 % de C)	très élevé	1	plaque = forme destinée à favoriser la qualité de l'épuration			élevée
<i>des demi-produits phosphoreux</i>	4L	83 % en alliage phosphoreux (0,1 % < P < 0,6 %)	moyen	4	très grande barre massive = assemblage de 4 loupes pour obtenir une grande longueur (1,4 mètre) avec une section importante	pour des objets de gros œuvre		élevée

Fig. 6 : Tableau synthétisant les résultats des analyses métallographiques selon les qualités physiques des métaux dont dépendent les comportements mécaniques (G. Pagès).

de la réduction. Les types 1L et 4L sont respectivement composés de deux et quatre loupes. Par conséquent, dans un souci de rigueur scientifique, le raisonnement se fonde sur les loupes constituant les demi-produits, une barre multi-loupes pouvant être fabriquée avec des produits de différentes provenances.

Considérons tout d'abord les rapports de CNR et en particulier $\%_{\text{mass}}\text{Al}_2\text{O}_3^*/\%_{\text{mass}}\text{SiO}_2^*$ ⁹. La majorité de ces rapports se situe autour de 0,2. Ils ne permettent pas d'isoler des provenances. Cependant, certaines loupes présentent des rapports sensiblement différents sous-entendant des sources de provenance multiples (fig. 7), c'est le cas notamment de la loupe 4 de la barre SM24.2 (type 4L) et de l'unique loupe de SM9.6 (type 1M). Les rapports $\%_{\text{mass}}\text{CaO}^*/\%_{\text{mass}}\text{K}_2\text{O}^*$ sont un peu plus dispersés mais n'offrent pas non plus la possibilité de différencier nettement des groupes chimiques spécifiques (fig. 7). En revanche, le rapport $\%_{\text{mass}}\text{MgO}^*/\%_{\text{mass}}\text{Al}_2\text{O}_3^*$, ainsi que les teneurs moyennes pondérées en P_2O_5 et MnO permettent d'isoler des groupes de loupes distincts¹⁰ (fig. 8).

On discerne alors :

- le groupe de loupes aux inclusions sans dominante des éléments chimiques majeurs ($\%_{\text{mass}}\text{MnO}^* < 1,5 \%$; $\%_{\text{mass}}\text{P}_2\text{O}_5^* < 2,5 \%$; $\%_{\text{mass}}\text{MgO}^*/\%_{\text{mass}}\text{Al}_2\text{O}_3^* < 0,2$). Ce premier groupe compose également le fond commun des autres groupes dans chacun desquels en revanche une des caractéristiques chimiques du fond commun se différencie en émergeant.

Aussi, on distingue ensuite :

- le groupe de loupes aux inclusions dont la teneur en manganèse est moyenne (3% $\%_{\text{mass}}\text{MnO}^* < 2 \%$) ;
- le groupe de loupes aux inclusions dont la teneur en manganèse est élevée ($\%_{\text{mass}}\text{MnO}^* > 3 \%$) ;
- le groupe de loupes aux inclusions dont la teneur en phosphore est élevée ($\%_{\text{mass}}\text{P}_2\text{O}_5^* > 7,5 \%$) ;
- le groupe de loupes aux inclusions dont le rapport magnésium-aluminium est élevé ($\%_{\text{mass}}\text{MgO}^*/\%_{\text{mass}}\text{Al}_2\text{O}_3^* > 0,25$).

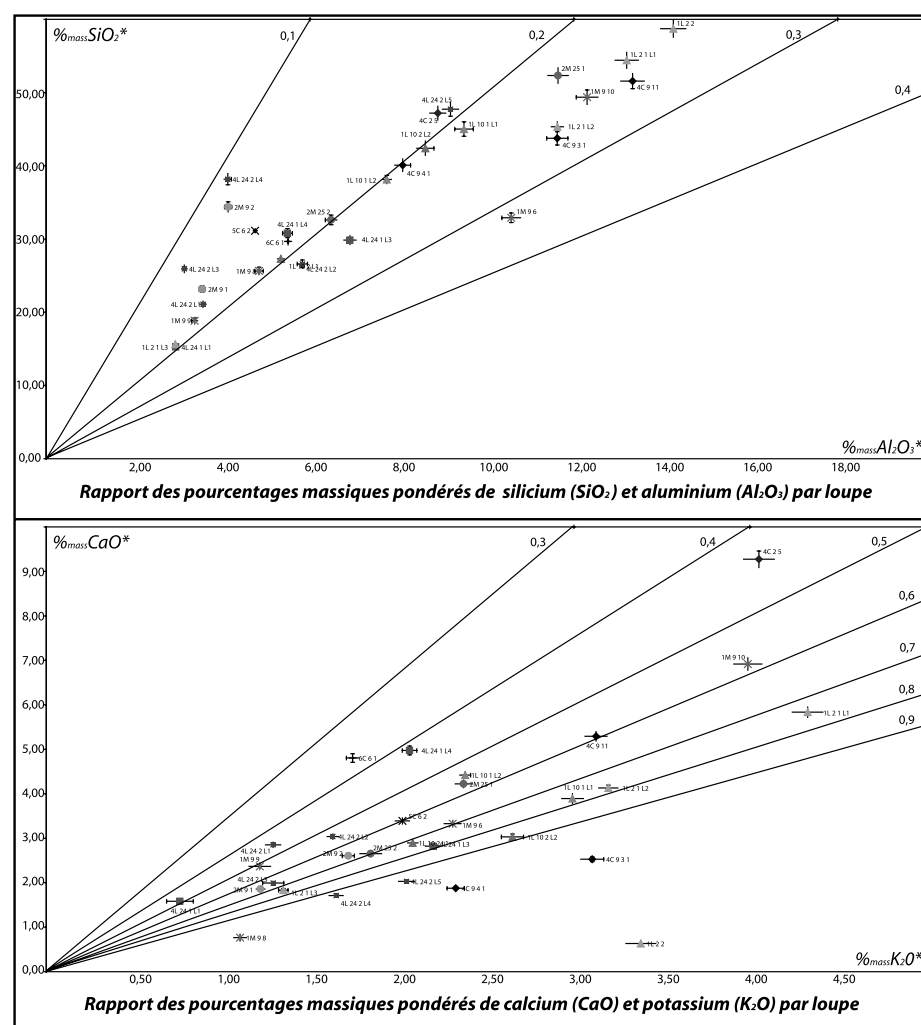


Fig. 7 : Graphiques des teneurs en composés chimiques majeurs constituant les micro-inclusions non prises en compte pour différencier les groupes de loupes (G. Pagès).

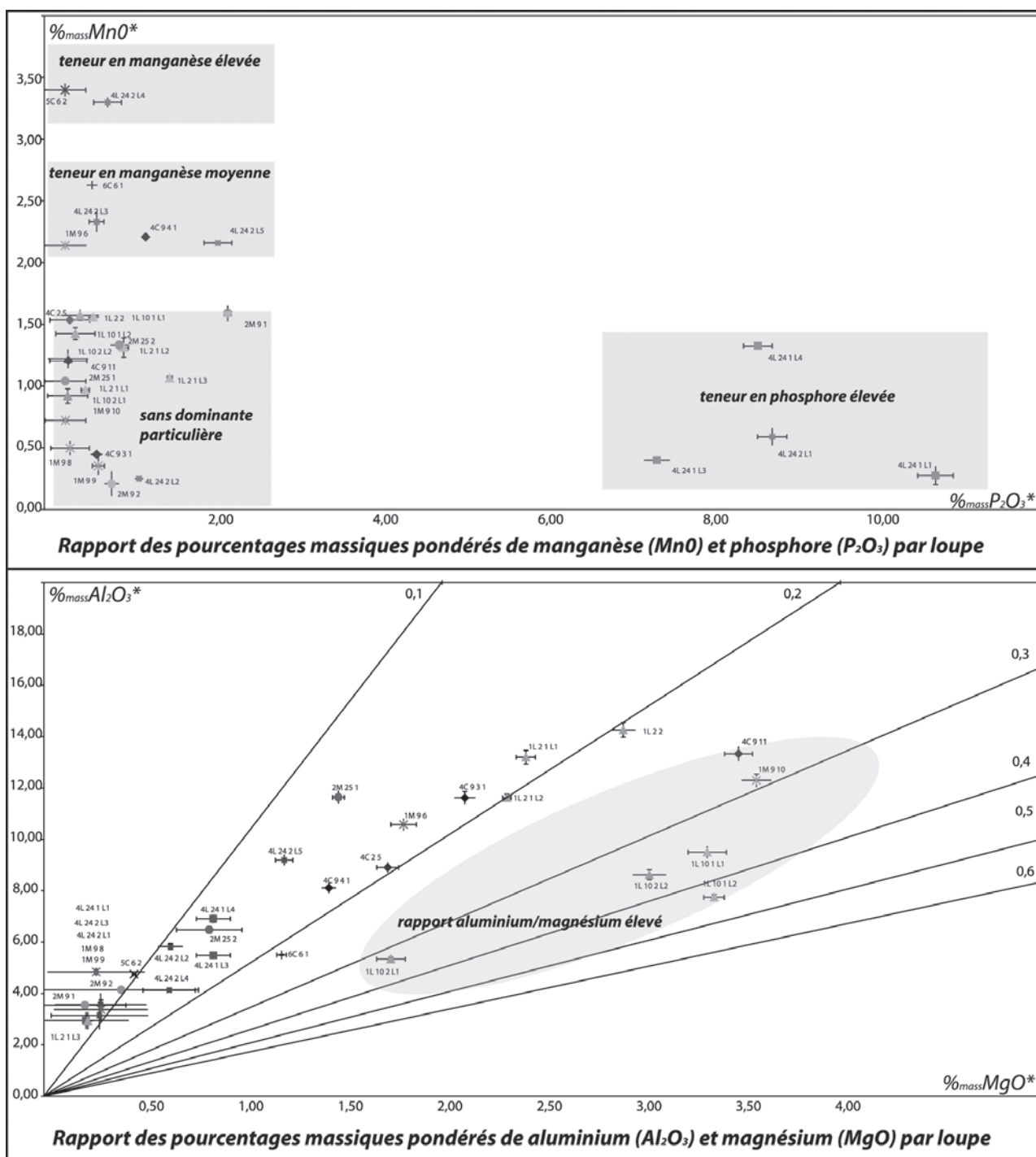


Fig. 8: Graphiques des teneurs en composés chimiques majeurs constituant les micro-inclusions prises en compte pour différencier les groupes de loupes (G. Pagès).

2.3.2. Loupes, types et épaves

Revenons sur la signification des caractères chimiques qui ont été mis en évidence. Le groupe de loupes qui se différencie par le rapport aluminium-magnésium élevé témoigne très probablement d'une provenance originale.

Dans le même sens, les deux groupes avec une forte teneur en phosphore et en manganèse découlent vraisemblablement de l'utilisation de minerais distincts. Le groupe sans dominante est tout aussi caractéristique à cet égard. *A contrario*, le groupe avec une teneur moyenne en manganèse n'est pas considéré comme tel. En effet, s'il

est mentionné systématiquement pour documenter une différence, son existence ne peut être associée à l'utilisation d'un minerai singulier. Le comportement de cet élément chimique au cours de la réduction étant encore mal cerné, ce groupe peut en effet tout autant être validé, qu'être assimilé à celui à forte teneur en manganèse ou encore à celui sans dominante. Enfin, la forte fluctuation du rapport calcium-potassium dans toutes les loupes tendrait à montrer que les approvisionnements en charbons de bois sont très variables – espèces, charbonnages –, mais ceci reste cependant à vérifier car la gangue du minerai peut également influencer dans les mesures. Au total, c'est donc au moins quatre groupes de provenance qui peuvent être différenciés avec certitude à partir du dosage des éléments majeurs

constituant les inclusions piégées dans le métal des barres des Saintes-Maries-de-la-Mer.

Si, d'un point de vue méthodologique, il faut raisonner en terme de loupe, les interprétations de ces résultats deviennent parlantes lorsqu'on les ramène aux types et aux épaves desquels ils proviennent.

Premièrement, les groupes de loupes ne sont pas associés à des types morphologiques particuliers comme peuvent l'être les qualités de métal. Seules les loupes phosphoreuses sont uniquement utilisées dans le type 4L, mais inversement, ce type n'est pas exclusivement constitué de ce groupe de loupes. L'association entre groupe de loupes et type n'est donc pas probante (fig. 9 et 10).

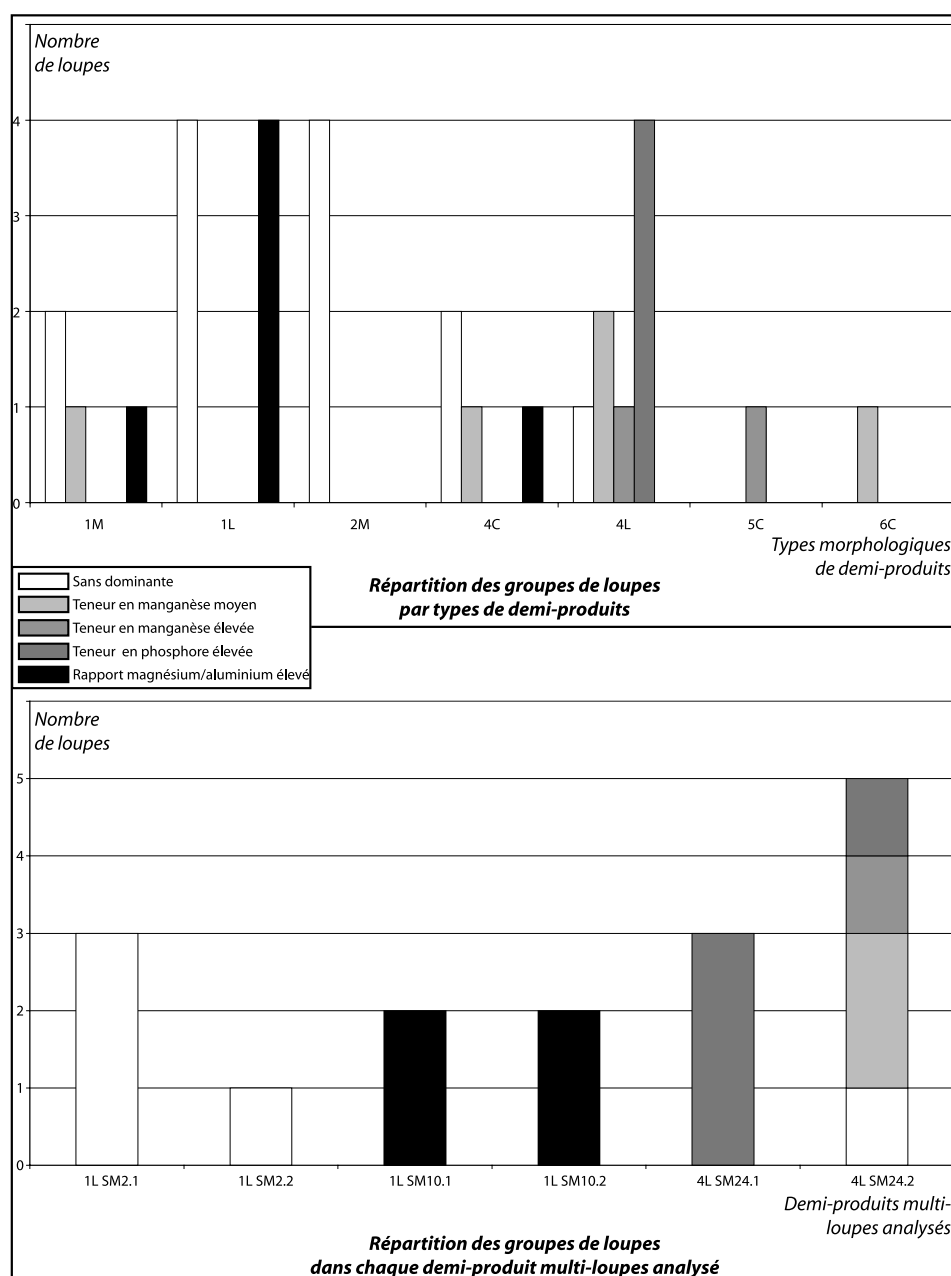


Fig. 9 : Histogrammes de la distribution des groupes de loupes par types de demi-produits et par demi-produits multi-loupes analysés (G. Pagès).

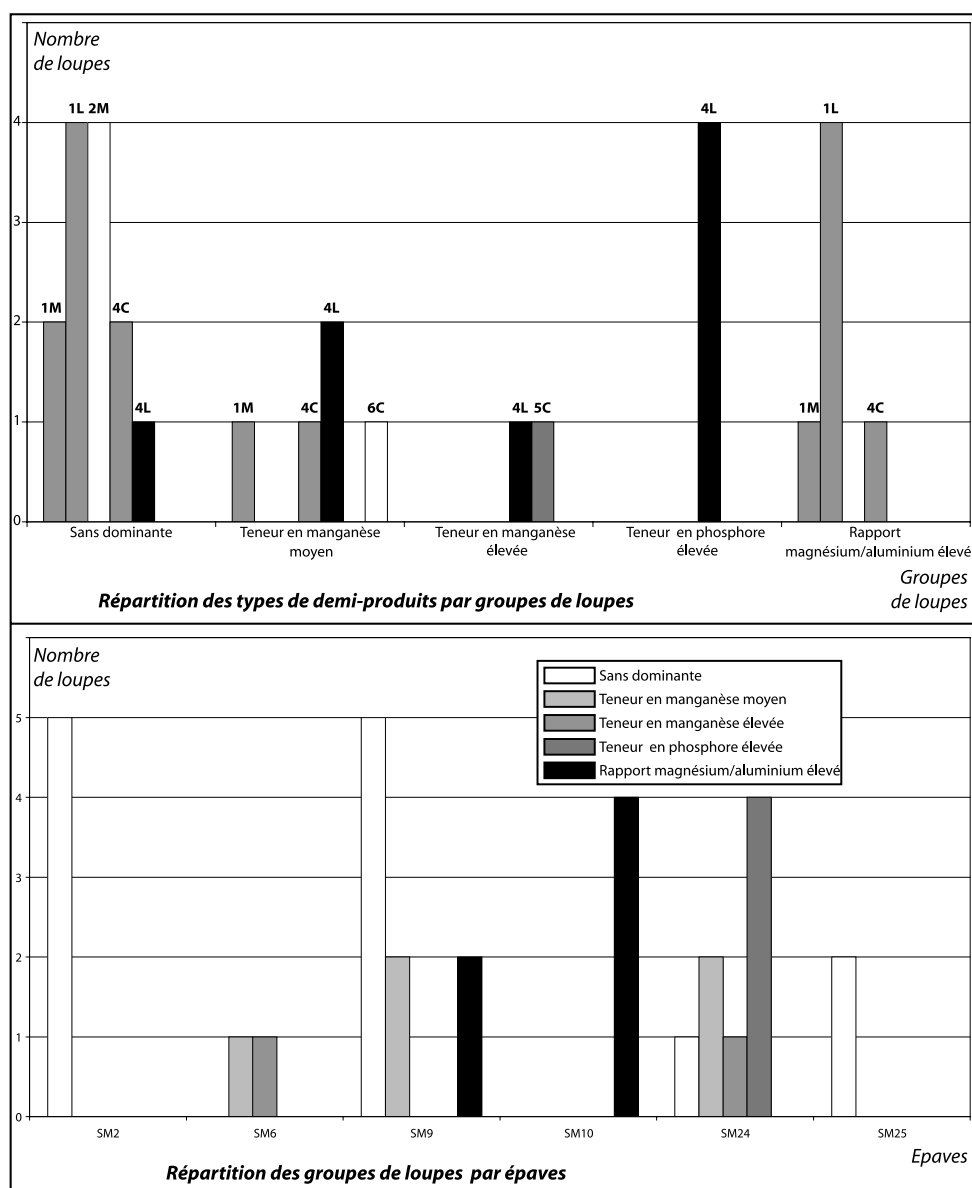


Fig. 10: Histogrammes de la distribution des types de demi-produits par groupes de loupes et des groupes de loupes par épaves (G. Pagès).

Deuxièmement et dans le même sens, une même barre multi-loupes, spécialement du type 4L, n'est pas systématiquement constituée de loupes avec des caractéristiques chimiques semblables. Un des deux échantillons de ce type – SM24.2 – est en effet fabriqué à partir d'au moins trois groupes de loupes reflétant des provenances diversifiées (fig. 9 et 10).

Troisièmement, les navires échoués ne transportaient pas des chargements originaires d'une même source. Chaque bateau pouvait donc véhiculer des types différents fabriqués à partir de loupes issues de provenances distinctes (fig. 9 et 10).

3. RÉSEAUX ET DISTRIBUTIONS DES DEMI-PRODUITS FERREUX EN MÉDITERRANÉE DURANT LE HAUT EMPIRE

3.1. Provenances et productions

En 2006, un article de synthèse était publié sur les barres des Saintes-Maries-de-la-Mer. Le sujet concernait notamment la question de la provenance du métal à partir des éléments chimiques en trace : les mineurs dont le pourcentage massique est inférieur à 0,01 % (Coustures *et al.* 2006). À partir de l'analyse partielle de cinq demi-produits et d'un total de treize mesures réalisées par ablation laser combiné à une torche plasma avec un couplage

inductif et un spectromètre de masse (LA-ICP-MS), il a été démontré que le métal d'au moins deux de ces demi-produits – un type 4C et un type 1L provenant respectivement des épaves *SM9* et *SM10* – était originaire de la Montagne Noire (Aude). Cet enseignement, envisagé depuis longtemps à partir des données archéologiques et épigraphiques, a donc été vérifié. La Montagne Noire renferme en effet durant tout le haut Empire des centres sidérurgiques fondés sur une organisation économique proto-industrielle ¹¹ (Sablayrolles 1989 ; Decombeix *et al.* 2000). L'un d'eux, le Domaine des Forges (Les Martyrs, Aude), documenté précisément, pouvait selon les estimations produire entre 10 et 27 t de fer par semaine (Domergue 1993 ; Decombeix *et al.* 1998 ; Decombeix *et al.* 2000). Sachant qu'une découverte de demi-produits semblables à ceux de Camargue a été réalisée dans le complexe lagunaire de Gruissan, à l'extrémité orientale de l'estuaire narbonnais (Solier 1981) et que toutes les mentions de gentilité relevées sur les estampilles apposées sur les barres se retrouvent à Narbonne et sont soit fort rares, soit très dispersées, en Espagne Citérieure (Long *et al.* 2002), on peut très raisonnablement envisager que des bateaux, venus de Méditerranée et cherchant à remonter le Rhône, se sont en partie approvisionnés dans cette région (Solier 1981 ; Long *et al.* 2002 : 183-187). Desservi par l'Aude et ses allèges, depuis la zone d'extraction, le port d'embarquement de ces demi-produits a toutes les chances d'être Narbonne où d'autres marchandises, notamment les amphores espagnoles, étaient stockées en vue de leur redistribution. De fait, la ville, qui réexportait des produits venus de l'intérieur et accueillait dans ses entrepôts des marchandises lointaines, est considérée par Strabon comme le premier *emporion* de la Gaule (IV, 3, 2).

Aujourd'hui, l'objectif est de pousser plus avant la réflexion en tenant compte des complexités de la chaîne opératoire du fer pour alimenter la discussion sur les schémas économiques qui en découlent. Durant le haut Empire, la production de tous les métaux connaît une augmentation significative reconnue dans toute la Gaule (Domergue *et al.* 2006 : 152-153). Sur le pourtour méditerranéen, ce processus a été constaté dans la Montagne Noire, mais également dans le Canigou (Pyrénées-Orientales) et dans les Hautes-Corbières (Aude) (Rancoule, Solier 1977 ; Barrouillet *et al.* 1989 : 23, 29 ; Cambon 1989, 31-32 ; Izard 1994 : 117-121, 126 ; Pauc, Pauc 1998 ; Mut 2001). D'autres lieux de réduction coexistent en Espagne sans que l'on saisisse encore pleinement leur importance (Rico 2005, 223-224). Toutes ces régions sidérurgiques ne sont pas exploitées par un seul centre de production, même proto-industriel. De multiples ateliers, plus ou moins importants, mitent ces gisements pour utiliser leurs ressources. Dans ces conditions, si une partie du fer constituant les barres des Saintes-Maries-de-la-Mer provient de

la Montagne Noire (Aude), il est certain que tout ou partie de ces autres ateliers alimentent la fabrication de ces barres. D'ailleurs, les analyses chimiques présentées dans cet article, mais également celles déjà publiées (Coustures *et al.* 2006), témoignent de cette diversité. Comme il est pour l'heure impensable de pouvoir identifier la signature chimique de chacun de ces ateliers, le problème que posent les barres de fer des Saintes-Maries-de-la-Mer se formule en d'autres termes : comment s'organise la commercialisation du fer dans un tel contexte historique – le début de l'Empire romain – et économique –, le développement et l'intensification de la production métallique ? Pour y répondre, il faut envisager précisément le fondement de ce négoce, à savoir les modalités techniques et économiques qui régissent la fabrication des demi-produits des Saintes-Maries-de-la-Mer.

3.2. Des fabriques de demi-produits ?

De nos jours, quand l'on considère la sidérurgie antique ou médiévale, il est très fréquemment admis que le lieu dans lequel est réduit le minerai correspond à l'endroit où est fabriqué le demi-produit. Cette évidence, inconsciemment édifiée à partir de la vision contemporaine de la production sidérurgique, doit être reconsidérée. Pourtant, dans la plupart des cas, la réduction du minerai est directement suivie d'une phase d'épuration primaire ou préliminaire. Ceci est attesté au Domaine des Forges (Les Martyrs, Aude) et dans d'autres centres de réduction comme au Ferrys (La Bussière, Loiret) (Fabre 2004 ; Rebiscoul 2003 : 138), mais cette phase de travail témoigne plus du désir de bénéficier de l'inertie thermique de la loupe pour faciliter l'épuration et le compactage grossiers du métal que de la volonté de mettre en forme des demi-produits. Ceux-ci peuvent être fabriqués dans un atelier distinct. Il faut donc se tourner vers la composition chimique des loupes pour pouvoir repenser la question en la traitant de manière moins subjective.

Les analyses micro-inclusionnaires des demi-produits antiques des Saintes-Maries-de-la-Mer ont indiqué l'existence d'au moins quatre groupes chimiques différenciant des provenances différentes. Trois d'entre elles rentrent dans la composition de trois types de barre, au minimum (fig. 9 et 10). Dans cette situation, il semble peu probable que les ateliers de fabrication soient appariés à ceux de la réduction. Peu probable, d'abord à cause de la sectorisation inhérente à la chaîne opératoire de la sidérurgie directe. Cette sectorisation peut paraître inopérante dans bien des cas, mais ici nous considérons des schémas de production proto-industriels, dont l'existence est reconnue dans de nombreux domaines durant tout le haut Empire – amphores, céramiques sigillées, vins... – et qui nécessitent une division des tâches manufacturières. Peu probable ensuite, à cause de la spécialisation des différents travaux

métallurgiques. Cette spécialisation est notamment visible dans l'application de standards – les formes déterminent des qualités de métal particulières (*cf. infra*) – qui encadrent la fabrication des demi-produits. Elle est également perceptible dans la qualité technique des opérations effectuées et particulièrement dans la facture exceptionnelle de toutes les soudures réalisées entre les loupes des types multi-loupes – 1L et 4L – et dans l'épuration et le compactage remarquables de certains types – 1M, 1L et 6C. Peu probable enfin, à cause du résultat de l'analyse chimique d'un des demi-produits de type 4L – échantillon SM24.2 –, dont les cinq loupes proviennent d'au moins trois provenances différentes (fig. 9).

La mise en exergue d'une distinction durant le haut Empire entre ateliers de fabrication et ateliers de réduction a été réalisée uniquement autour de conceptions ayant trait aux travaux et doit donc être entendue comme tel. En d'autres termes, cette différenciation porte sur la sectorisation prononcée des phases de la chaîne opératoire et, dans une moindre mesure, sur la séparation géographique des espaces de travail. En effet, si de nombreux ateliers de réduction traitant le minerai sont localisés, aucun élément ne permet de connaître actuellement l'emplacement de ces fabriques de barres¹² et surtout les relations géographiques qu'elles entretiennent avec les entreprises de production primaire et/ou les lieux de redistribution. Ces ateliers peuvent aussi bien être installés près des centres d'exploitation du minerai qu'à côté des ports, des agglomérations secondaires ou des cités comme Narbonne. Rien n'indique également qu'ils soient regroupés ou dispersés ; les situations peuvent être diverses. Le fait que certains s'approvisionnent dans des lieux différents tendrait néanmoins à prouver que quelques-unes de ces fabriques sont éloignées des centres de traitement du minerai.

Les précisions apportées sont donc d'ordre technique et économique. Elles détaillent l'organisation du travail durant le haut Empire. En amont, le minerai est traité par des centres de réduction proto-industriels qui exploitent les gisements, notamment du nord-ouest du bassin méditerranéen. Ensuite, leurs productions, probablement dégrossies sur place au cours d'une phase d'épuration préliminaire, sont exportées dans des ateliers spécialisés dans la fabrication des demi-produits. En fonction de la qualité du métal – ferrite, acier ou phosphore –, les artisans façonnent les demi-produits dans une forme prédéfinie et régie par un standard (*cf. infra*). Des productions primaires sont privilégiées pour rentrer dans la composition de certains types de demi-produits ; les loupes, dont le rapport aluminium-magnésium est élevé, se retrouvent uniquement dans la famille des types aciérés et celles avec une teneur en phosphore élevée renvoient exclusivement au type 4L. Inversement, aucun type ne semble dépendre d'un unique lieu d'approvisionnement. La plupart des

lieux de réduction semblent donc produire des masses de métal variables, dont les qualités sont ensuite évaluées en aval de la chaîne, dans les fabriques de demi-produits. Alors, les loupes sont façonnées selon une morphologie qui retranscrit leurs propriétés.

Si différents ateliers distincts géographiquement peuvent effectuer un tel travail, certains savoir-faire peuvent peut-être refléter la « signature » d'ateliers spécifiques : on pense ici à la qualité particulièrement remarquable des soudures réalisées entre les loupes des types 1L et 4L. Compte tenu des masses assemblées, celles-ci reflètent une grande maîtrise des forgerons et probablement une organisation du travail très précise. Cela sous-tend en effet une très bonne synchronisation des tâches (manipulations, chauffes, frappes,...) et des infrastructures adaptées (foyers spécifiques, outils de percussion, ...) (Pagès *et al.* sous presse).

Sans revisiter en détail les problèmes, notamment onomastiques, que posent les estampilles observées sur les demi-produits, il est cependant nécessaire de revenir sur la signification générale de ces marques et, par conséquent, sur le moment où elles ont été apposées (Long *et al.* 2002, 179-182 ; Djaoui 2003 ; Coustures *et al.* 2006 : 249-252 ; Djaoui, Long 2007). Leur réalisation a été nécessairement faite à chaud, les alliages ferreux, quels qu'ils soient, étant trop durs et pas assez ductiles pour imprimer profondément, par martelage à froid, un cartouche dont la surface est importante – entre 1 et 2 cm² –, qui plus est avec une inscription délicate¹³. S'il est vrai que toute masse métallique peut être chauffée à volonté et, de ce fait, estampillée à tout moment, il est communément admis, notamment à partir de travaux effectués sur les céramiques fines et les amphores, que les timbres composés d'un nom en capitales renvoient, en tant que marque de fabrique, au responsable des objets concernés (Bémont 1991 : 136). Suivant cette assertion, les estampilles des demi-produits des Saintes-Maries-de-la-Mer ont toujours renvoyé aux ateliers de réduction du minerai. Or, aujourd'hui, la fabrication des demi-produits semble très vraisemblablement détachée de la phase de traitement du minerai. Il apparaît donc très probable qu'au moins une partie des estampilles se réfère à ces fabriques de demi-produits peut-être parfois regroupées en communauté de forgerons, comme semblent le suggérer l'étude épigraphique et l'agencement des cartouches. Deux échantillons de type 1L – SM10.1 et SM10.2 –, dont les estampilles ont été frappées à l'endroit même de la soudure entre leurs deux loupes, viennent étayer cette hypothèse.

3.3. Commercialisation et domaines de destinations fonctionnelles

Les formes des demi-produits ferreux issus des épaves des Saintes-Maries-de-la-Mer montrent l'existence d'une

standardisation morphologique au début de l'Empire romain en Méditerranée nord-occidentale. Pendant longtemps, le problème a été d'identifier la signification de cette standardisation. Les travaux sur les normes ont souvent porté sur la masse ou le volume des matières pour reconnaître les règles fiscales contrôlant le commerce (Domergue, Liou 1997). Des pistes ont également été explorées autour de la notion de provenance. Notre travail montre que le standard des demi-produits ferreux peut être aussi une norme fonction du contenu, à savoir la qualité du métal : à chaque type morphologique de barre correspondent un alliage ferreux et un taux d'épuration particuliers. Trois hypothèses découlent alors de cet enseignement.

Les métallurgistes producteurs, les forgerons et les négociants savaient reconnaître un fer doux, un fer aciéré ou un fer phosphoreux. Ils faisaient également des distinctions dans chacune de ces catégories selon le degré d'épuration et de compactage. Ils connaissaient donc précisément les qualités des métaux que l'on nomme physiques depuis le début du XX^e siècle. Celles-ci étaient assurément perceptibles en termes de sensation et d'aptitude à la déformation selon le comportement mécanique du métal, comme le font encore actuellement les forgerons. Aussi, ce sont selon ces termes que Pline l'Ancien mentionne dans le livre XXXIV de l'*Histoire Naturelle* l'existence de différentes qualités de fer : des fers mous qu'on désigne aujourd'hui sous le vocable de ferrite ou des fers cassants que l'on qualifie d'acier.

L'existence d'une certaine normalisation sous-entend évidemment qu'elle est entérinée autant par les producteurs, les métallurgistes et les négociants, que par les destinataires, les forgerons et les marchands. L'homogénéité de cette rationalisation suggère aussi que cette norme est prise en compte par de nombreux lieux de production et par plusieurs sites importateurs. Un des enjeux à venir est par conséquent d'arriver à cerner l'extension autant géographique que chronologique de cette normalisation. Dans ce sens, faut-il envisager que d'autres régions de la Gaule du Nord, où des centres de production proto-industriels sont reconnus (Dunikowski, Cabboi 1995 ; Rebiscoul 2003), fournissent des loupes pour fabriquer des demi-produits selon ce même standard ? Dans ce cas, les demi-produits découverts dans la Saône que nous avons coutume d'associer à ceux de Camargue, ne devraient-ils pas s'en distinguer même s'ils ressemblent peu ou prou aux types 2M et 3C, comme celui mis au jour plus récemment à Vichy (Allier) (Bonnamour 2000b : 144 ; Bonnamour 2000a : 301-302 ; Pagès à paraître) ? Ne peuvent-ils pas être issus d'autres ateliers septentrionaux ? Vu la complexité des schémas de production mis en évidence, il vaut probablement mieux rester prudent en évitant de relier prématurément les découvertes méditerranéennes à celles d'autres contextes plus éloignés. Des informations com-

plémentaires, comme des estampilles ou des signatures chimiques en tous points identiques, permettront peut-être dans l'avenir d'avancer dans ce domaine.

Enfin, quelles sont les destinations fonctionnelles de ces barres ? Là encore, la complexité des schémas de production incite à la méfiance quant aux interprétations trop rapides. Il faut surtout appréhender le problème dans la globalité et éviter de restreindre la circulation des demi-produits d'un point à un autre. Les épaves des Saintes-Maries-de-la-Mer reflètent un instantané et un type de circulation particulier. La très bonne préservation jusqu'à nos jours de cet assemblage archéologique le rend fort lisible. Cette richesse documentaire ne doit cependant pas cacher la question sous-jacente à toute découverte exceptionnelle : quelle est la représentativité du corpus par rapport à l'ensemble du phénomène, le commerce du fer au haut Empire des lieux de production aux contextes d'utilisation ? Ces épaves reflètent-elles une commercialisation particulière propre au premier siècle de notre ère ou sont-elles le symptôme d'un trafic naissant qui, vu les risques encourus – les nombreux échouements –, a changé de forme à partir de la fin du I^{er} siècle ? Etant donné la richesse typologique des barres – et donc des qualités de métal – et la durabilité de la production primaire du fer reconnue jusqu'au III^e s. dans tous les centres sidérurgiques et notamment dans la Montagne Noire, la deuxième hypothèse pourrait être plus crédible (Sablayrolles 1989 ; Domergue 1993 ; Decombeix *et al.* 2000). En tout état de cause, il est clair que la Gaule, dès la fin du I^{er} s. avant notre ère, connaît un formidable 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 conquête. Toutes ces situations nécessitent clairement un fort apport en fer, il ne faut donc pas cantonner les débouchés à une seule destination.

Dans cette perspective davantage « globalisante », il est seulement possible de constater que chaque type morphologique de demi-produit possède des domaines de destinations fonctionnelles de prédilection qui sont fonction de la qualité du métal qu'il renferme (Pagès *et al.* sous presse). Ainsi, les types ferritiques – 2M, 3C et 6C – peuvent être préférentiellement utilisés dans des objets ou des parties d'objets qui requièrent de la ductilité. Les demi-produits aciérés – 1M et 4C – sont privilégiés dans le façonnage d'objets ou de parties d'objets qui demandent des qualités de dureté et de résistance à l'usure. Certains d'entre eux – 1L –, fabriqués à partir de deux loupes pour leur conférer une grande longueur – environ 1,1 m –, peuvent être employés dans des éléments particulièrement longs comme les essieux de charrettes ou les bandages de roues. Enfin, le type phosphoreux – 4L –, plus difficile à forger

et surtout très massif grâce à l'assemblage de quatre loupes, semble prédestiné au métal réservé au 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 plus diversifiés.

Ces conclusions éclairent d'un jour nouveau les schémas antiques de production et de distribution du fer. Premièrement, elles montrent que la réduction du minerai n'est pas nécessairement associée à la mise en forme des demi-produits. Deuxièmement, elles révèlent que dès la fabrication des demi-produits, les métallurgistes et/ou négociants intègrent et codifient leurs productions en fonction de la diversité des demandes et de la variété des destinations fonctionnelles du matériau fer qui, pour rappel,

pénètre massivement l'ensemble de la culture matérielle à partir du III^e siècle avant notre ère grâce à la qualité et à la diversité de ses propriétés physiques et donc de ses comportements mécaniques.

Gaspard PAGÈS - UMR 5140, 390 av. de Pérols - 34970 Lattes et UMR 5060-IRAMAT, UTBM Site de Sévenans - 90010 Belfort Cedex
Email : gaspard.pages@free.fr

LUC LONG - DRASSM, Fort Saint-Jean - 13235 Marseille Cedex 2
Email : luc.long@culture.gouv.fr

Philippe FLUZIN - UMR 5060-IRAMAT, UTBM Site de Sévenans - 90010 Belfort Cedex. Email : lmc@utbm.fr

Philippe DILLMANN - UMR 5060-IRAMAT, « Laboratoire Pierre Süe » UMR 9956, CEA Saclay - 91191 Gif sur Yvette Cedex
Email : philippe.dillmann@cea.fr

NOTES

- 1- Cette thèse de doctorat a été réalisée par Gaspard Pagès au sein de l'Université Montpellier III-Paul Valéry (Hérault), de l'UMR 5140 « Archéologie des sociétés méditerranéennes » (Lattes, Hérault) et de l'UMR 5060 - IRAMAT « Laboratoire de Métallurgies et Cultures » (Belfort, Territoire de Belfort) (Pagès 2008).
- 2- Demi-produits ferreux en forme de barre allongée (30 à 120 cm) de section rectangulaire aplatie et possédant souvent une extrémité façonnée en douille ou en soie.
- 3- Précisons dès à présent que le terme provenance est entendu dans un sens particulier. Il se rapporte davantage à l'ensemble des critères définissant un atelier de réduction (techniques mises en œuvre, structures employées et matières premières utilisées) que strictement au minerai initial. Cette définition est explicitée plus avant (*cf. infra* 2.1.2. *Protocole et précautions méthodologiques*).
- 4- Cet article coïncide avec une intervention réalisée le 20 avril 2007 à Aix-en-Provence (Bouches-du-Rhône) au colloque du GMPCA *Diffusions, Migrations, Échanges : l'influence du bassin méditerranéen* (Pagès *et al.* 2007).
- 5- Ici, en l'occurrence, le logiciel utilisé est Adobe Photoshop™.
- 6- Les classes des types d'alliage fer-carbone sont : $C < 0,02 \%$; $0,02 \% < C < 0,2 \%$; $0,2 < C < 0,4 \%$; $0,4 \% < C < 0,6 \%$; $0,6 \% < C < 0,8 \%$.
- 7- La tension d'accélérateur des électrons est de 15 keV.
- 8- Une telle approche n'est pas envisageable pour doser les éléments traces ou mineurs – dont le pourcentage massique est inférieur à 0,01 %. Si cette dernière permet de détecter un nombre bien plus important d'éléments, la lourdeur de son maniement limite en effet grandement le nombre d'inclusions dosées par échantillon (Coustures *et al.* 2006). Au risque de n'analyser que des épiphénomènes, ce type d'étude doit donc être précédé par des analyses en spectrométrie EDS pour isoler des groupes de provenance. À l'issue de ce premier tri, les origines pourront peut-être être précisées, si tant est que les référentiels liés aux régions d'origines existent déjà, ce qui est actuellement le cas de peu de régions. On pourra toutefois trouver quelques signatures chimiques régionales dans la base de données Pal-Sid mise en place au sein de l'IRAMAT et du CRPG.
- 9- Pour faciliter la lecture, on mentionne le pourcentage massique par son abréviation « %_{mass} » et les composés chimiques par leur symbole.
- 10- Chaque groupe rassemble des loupes qui ne se retrouvent pas dans un autre groupe.
- 11- La fabrication massive, selon des schémas de production concentrés, d'éléments manufacturés et/ou de matières destinés à l'exportation à moyenne et/ou longue distances sous la direction de marchands et/ou de négociants impose l'emploi d'un terme simple et imagé représentatif de cette réalité. Pour ce faire, nous optons pour l'utilisation du mot « proto-industriel », malgré l'anachronisme qui découle de cette application.
- 12- On entend par « fabrique de barres » atelier d'épuration, de mise en forme et, éventuellement, d'assemblage de loupes.
- 13- Des expériences effectuées récemment par un forgeron arlésien, Jean-Pierre Martin, sur des demi-produits des épaves de Camargue, corroborent cet examen.

BIBLIOGRAPHIE

- Barrouillet et al. 1989** : BARROUILLET (V.), LAMY (A.), MUT (G.), PINEDA (J.), SIRET (A.) — Mines et fonderies antiques et médiévales du Canigou. In : *Mines et métallurgies antiques et médiévales de la France méridionale. Recherches récentes*. Journées de Perpignan, 1987. Perpignan, Université de Toulouse Le Mirail, Ville de Perpignan, 1989, p. 21-29.
- Bémont 1991** : BÉMONT (C.) — Le statut des patrons et des ouvriers d'après les marques de fabriques. *Specimina Nova Universitatis Quinqueecclesiensis*, 1991, p. 133-156.
- Bonnamour 2000a** : BONNAMOUR (L.) — Les ponts romains de Chalon-sur-Saône : étude préliminaire de la pile n°3. *Gallia*, 57, 2000a, p. 273-306.
- Bonnamour 2000b** : BONNAMOUR (L.) dir. — Catalogue de l'exposition *Archéologie de la Saône, le fleuve gardien de la mémoire*. Paris, Errance, 2000b, 160 p.
- Cambon 1989** : CAMBON (C.) — Mines et sites métallurgiques des Corbières (Aude). In : *Mines et métallurgies antiques et médiévales de la France méridionale. Recherches récentes*. Journées de Perpignan, 1987. Perpignan, Université de Toulouse Le Mirail, Ville de Perpignan, 1989, p. 31-36.
- Christol 1971** : CHRISTOL (M.) — Remarques sur les naviculaires d'Arles. *Latomus*, 30, 3, 1971, p. 643-663.
- Christol 1999** : CHRISTOL (M.), avec la collab., FICHES (J.-L.) — Le Rhône : batellerie et commerce dans l'Antiquité. *Gallia*, 56, p. 141-155.
- Coustures et al. 2006** : COUSTURES (M.-P.), RICO (C.), BÉZIAT (D.), DJAOUI (D.), LONG (L.), DOMERGUE (C.), TOLLON (F.) — La provenance des barres de fer romaines des Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône). *Gallia*, 63, 2006, p. 243-261.
- Crew 1994** : CREW (P.) — Currency Bars in Great-Britain ; Typologie and Function. In : MANGIN (M.) dir. - *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen. Archéologie et archéométrie*. Colloque de Besançon, 1993. Paris, Les Belles Lettres, 1994, p. 346-350 (ALUB, 536).
- Decombeix et al. 1998** : DECOMBEIX (P.-M.), FABRE (J.-M.), TOLLON (F.), DOMERGUE (C.) — Évaluation du volume des ferriers romains du Domaine des Forges (Les Martyrs, Aude), de la masse de scories qu'ils renferment et de la production de fer correspondante. *Revue d'Archéométrie*, 22, 1998, p. 77-90.
- Decombeix et al. 2000** : DECOMBEIX (P.-M.), DOMERGUE (C.), FABRE (J.-M.), GORGUES (A.), RICO (C.), TOLLON (F.), TOURNIER (B.) — Réflexions sur l'organisation de la production du fer à l'époque romaine dans le bassin supérieur de la Dure, au voisinage des Martyrs (Aude). *Gallia*, 57, 2000, p. 23-36.
- Dillmann et al. 2005** : DILLMANN (Ph.), ARANDA (R.), L'HERITIER (M.), FLUZIN (Ph.) — Forging of iron-steel artifacts : Archaeology, experiments and archaeometry. In : *1st International Conference of Paleosiderurgy and Industrial Heritage Recovery. Iron, History and Heritage*. San Sebastian, INASMET, 2005, p. 311-324.
- Dillmann, L'Héritier 2007** : DILLMANN (Ph.), L'HERITIER (M.) — Slag inclusion analyses for studing ferrous alloys employed in French medieval building : supply of materials and diffusion of smelting processes. *Journal of Archaeological Science*, 34, 2007, p. 1810-1823.
- Djaoui 2003** : DJAOUI (D.) — *Le commerce du fer d'après les épaves des Saintes-Maries-de-la-Mer (50 av. 90 ap. J.-C.)*. Aix-en-Provence, Aix-Marseille I, 2003 (DEA)
- Djaoui, Long 2007** : DJAOUI (D.), LONG (L.) — Camargue et Rhône. Réflexions sur l'agencement des timbres des lingots de fer. In : DRASSM dir. - *Bilan Scientifique du Département des Recherches Archéologiques Subaquatiques et Sous-Marines 2005*. Paris, Direction du Patrimoine, Sous-direction de l'Archéologie, Ministère de la Culture et de la Communication, 2007, p. 52-54.
- Domergue, Liou 1997** : DOMERGUE (C.), LIOU (B.) — L'apparition de normes dans le commerce maritime romain : le cas des métaux et des denrées transportées en amphores. *Pallas, revue d'études antiques, Mélanges C. Domergue*, n° 1, 46, 1997, p. 11-30.
- Domergue et al. 2006** : DOMERGUE (C.), SERNEELS (V.), CAUUE (B.), PAILLER (J.-M.), ORZECOWSKI (S.) — Mines et métallurgies en Gaule à la fin de l'Âge du Fer et à l'époque romaine. In : PAUNIER (D.) dir. - *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, 2005. Glux-en-Glenne, Bibracte, Centre archéologique européen, 2006, p. 131-162 (Bibracte, 12/5).
- Domergue 1993** : DOMERGUE (C.) dir. — *Un centre sidérurgique romain de la Montagne Noire : Le Domaine des Forges (Les Martyrs, Aude)*. Paris, CNRS, 1993, 477 p., *Revue Archéologique de Narbonnaise*, supplément n° 27.
- Doswald 1994** : DOSWALD (C.) — Les lingots de fer protohistoriques en Europe occidentale : problématique générale. In : MANGIN (M.) dir. - *La sidérurgie ancienne de l'Est de la France dans son contexte européen. Archéologie et archéométrie*. Colloque de Besançon, 1993. Paris, Les Belles Lettres, 1994, p. 333-343 (ALUB, 536).
- Dunikowski, Cabboi 1995** : DUNIKOWSKI (Chr.), CABBOI (S.) — *La sidérurgie chez les Sénons : les ateliers celtiques et gallo-romains des Clérimois (Yonne)*. Paris, Maison des Sciences de l'Homme, 1995, 186 p. (Documents d'Archéologie Française, 51).
- Fabre 2004** : FABRE (J.-M.) — Encadré 1 : la forge d'épuration des Martyrs. In : MANGIN (M.) dir. - *Le fer*. Paris, Errance, 2004, p. 90-91 (Coll. Archéologiques).
- Fiori 1973** : FIORI (P.) — Gisement de blocs de fer au Cap Gros à Antibes. *Cahier d'archéologie subaquatique*, II, 1973, p. 95-96.
- Fluzin 2002** : FLUZIN (Ph.) — La chaîne opératoire en sidérurgie : matériaux archéologiques et procédés. Apport des études métallographiques, In : BOCOUM (H.) dir. - *Aux origines de la métallurgie du fer en Afrique. Une Ancienneté méconnue. Afrique de l'Ouest et Afrique centrale*. Paris, UNESCO, 2002, p. 59-91.
- Fluzin et al. 2000** : FLUZIN (Ph.), PLOQUIN (A.), SERNEELS (V.) — Archéométrie des déchets de production sidérurgique. Moyens et méthodes d'identification des différents éléments de la chaîne opératoire directe. *Gallia*, 57, 2000, p. 101-121.
- Fluzin et al. 2004** : FLUZIN (Ph.), PLOQUIN (A.), DABOSI (F.) — Chapitre 4 : approches métallographiques et archéométriques. In : MANGIN (M.) dir. - *Le fer*. Paris, Errance, 2004, p. 113-173 (Coll. Archéologiques).
- Izard 1994** : IZARD (V.) — Cartographie successive des entreprises métallurgiques dans les Pyrénéens nord catalanes ; support

préliminaire à l'étude éco-historique des forêts charbonnées.
Archéologie du Midi Médiéval, 12, 1994, p. 115-129.

- L'Heritier et al. 2005** : L'HERITIER (M.), JUHIN (A.), DILLMANN (Ph.), ARANDA (R.), BENOÎT (P.) — Utilisation des alliages ferreux dans la construction monumentale du Moyen Âge. Etat des lieux de l'avancée des études métallographiques et archéométriques. *ArcheoSciences, Revue d'Archéométrie*, 29, 2005, p. 117-132.
- Long 1993** : LONG (L.) — Gard. Au large d'Aigues-Mortes, de l'Espiguette au Petit-Rhône. In : DRASSM dir. - *Bilan Scientifique du Département des Recherches Archéologiques Subaquatiques et Sous-Marines 1992*. Paris, Direction du Patrimoine, Sous-direction de l'Archéologie, Ministère de la Culture et de la Communication, 1993, p. 39.
- Long 1994** : LONG (L.) — De l'Espiguette au Petit-Rhône, épave 12 (Saintes-Maries-de-la-Mer 2). In : DRASSM dir. - *Bilan Scientifique du Département des Recherches Archéologiques Subaquatiques et Sous-Marines 1993*. Paris, Direction du Patrimoine, Sous-direction de l'Archéologie, Ministère de la Culture et de la Communication, 1994, p. 29-30.
- Long, Domergue 1995** : LONG (L.), DOMERGUE (C.) — Le véritable plomb de L. Flavius Verucla et autres lingots : l'épave 1 des Saintes-Maries-de-la-Mer. *Mélanges de l'Ecole Française de Rome*, 107, 2, 1995, p. 801-867.
- Long 1997a** : LONG (L.) — 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. In : BAUDAT (M.) dir. - *Crau, Alpilles, Camargue. Histoire et archéologie*. Actes du colloque, 1995. Arles, Groupe Archéologique Arlésien, 1997a, p. 59-113.
- Long 1997b** : LONG (L.) — Carte archéologique au large de la Camargue, les épaves SM2 et SM10, réflexion typologique. In : DRASSM dir. - *Bilan Scientifique du Département des Recherches Archéologiques Subaquatiques et Sous-Marines 1996*. Paris, Direction du Patrimoine, Sous-direction de l'Archéologie, Ministère de la Culture et de la Communication, 1997b, p. 73-81.
- Long et al. 2002** : LONG (L.), RICO (C.), DOMERGUE (C.) — 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*, Rome, XIV, 2002, p. 161-188.
- Long et al. 2005** : LONG (L.), DJAOUI (D.), RICO (C.) — Lingots et barres de fer : vers une typologie plus complète. In : DRASSM dir. - *Bilan Scientifique du Département des Recherches Archéologiques Subaquatiques et Sous-Marines 2003*. Paris, Direction du Patrimoine, Sous-direction de l'Archéologie, Ministère de la Culture et de la Communication, 2005, p. 66-68.
- Long, Djaoui 2007** : LONG (L.), DJAOUI (D.) — Carte archéologique au large de la Camargue. In : DRASSM dir. - *Bilan Scientifique du Département des Recherches Archéologiques Subaquatiques et Sous-Marines 2005*. Paris, Direction du Patrimoine, Sous-direction de l'Archéologie, Ministère de la Culture et de la Communication, 2007, p. 47-52.
- Long et al. à paraître** : LONG (L.), MARLIER (S.), RIVAL (M.) — The Saintes-Maries-de-la-Mer 24 (SM24) shipwreck (France, 40-75 AD): a sea-river vessel with stitched frames. In : BOCKIUS (R.) dir. - *Between the Seas, the 11th International Symposium on Boat and Ship Archaeology*. Mainz, 2006, à paraître (ISBSA 11).
- Maréchal 1984** : MARÉCHAL (J.-F.) — À propos de deux lingots de cuivre pur inscrits retrouvés dans la baie des Saintes-Maries-de-la-Mer. *Bulletin de la société nationale des Antiquaires de France*, 1984, p. 231-239.
- Maréchal 1985** : MARÉCHAL (J.-F.) — 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.
- Maréchal 1998** : MARÉCHAL (J.-F.) — 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.
- Maréchal 2003** : MARÉCHAL (J.-F.) — À propos quelques découvertes sous-marines aux environs de Palavas-les-Flots. *Archéologie en Languedoc*, 27, 2003, p. 119-123.
- Monguilan 1987** : MONGUILAN (L.) — Une épave romaine chargée de fer et de plomb dans le golfe de Fos-Saint-Gervais I. In : *Les mines et la métallurgie en Gaule et dans les provinces voisines*. Paris, Errance, 1987, p. 171-179 (Caesarodunum, XXII).
- Mut 2001** : MUT (G.) — Les forges de Baillestavy. In : SABLAYROLLES (R.) dir. - *Les ressources naturelles des Pyrénées. Leur exploitation durant l'Antiquité*. Saint-Bertrand-de-Comminges, musée archéologique départemental, 2001, p. 141-153 (Entretien d'Archéologie et d'Histoire de Saint-Bertrand-de-Comminges).
- Pagès 2008** : PAGÈS (G.), *La métallurgie du fer en France méditerranéenne de l'Antiquité au début du Moyen Âge : jalons d'une approche interdisciplinaire*, Montpellier, Université Montpellier III - Paul-Valéry, thèse de doctorat, 3 volumes, 302, 249 et 264 p. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00357391/fr/>
- Pagès à paraître** : PAGÈS (G.) — Un demi-produit en alliage ferreux. In : CHUNIAUD (K.) dir. - *Garage Palace (Vichy, 03)*. INRAP, Rapport final d'opération de fouille archéologique, Ministère de la Culture, Service Régional de l'Archéologie d'Auvergne, à paraître.
- Pagès et al. 2007** : PAGÈS (G.), FLUZIN (Ph.), LONG (L.), DILLMANN (Ph.) — Les demi-produits ferreux des épaves antiques des Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rhône) : apports des analyses archéométriques à la définition du corpus et des circuits de production. In : GMPCA dir. - *Archéométrie 07. Diffusion, migrations, échanges. L'influence du bassin méditerranéen*. Pré-actes du colloque d'Aix-en-Provence, 2007, p. 48.
- Pagès et al. sous presse** : PAGÈS (G.), FLUZIN (Ph.), LONG (L.) — 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). In : DILLMANN (Ph.), HILAIRE-PEREZ (L.), VERNÉ (C.) dir. - *L'acier en Europe avant Bessemer*. Actes du colloque de Paris, 2005. Toulouse, Méridiennes-FRAMESPA-CNRS/Université de Toulouse, sous presse (Histoire et Techniques).
- Pauc, Pauc 1998** : PAUC (B.), PAUC (P.) — Quelques sites de réduction du minerai de fer dans les Corbières (Aude). In : FEUGÈRE (M.), SERNEELS (V.) dir. - *Recherches sur l'économie du fer en Méditerranée nord-occidentale*. Montagnac, Monique Mergoïl, 1998, p. 116-128 (Monographies instrumentum, 4).
- Rancoule, Solier 1977** : RANCOULE (G.), SOLIER (Y.) — Les mines antiques des Corbières audoises. In : FHDLMED ROUSSILLON dir. - *Mines et mineurs en Languedoc et régions voisines de l'Antiquité à nos jours*. Actes du XLIX^e congrès de la

- Fédération Historique du Languedoc Méditerranéen et du Roussillon. Montpellier, 1977, p. 23-39.
- Rauzier 2007** : RAUZIER (M.) — Les lingots de Maguelone. *In* : DRASSM dir. - *Bilan Scientifique du Département des Recherches Archéologiques Subaquatiques et Sous-Marines 2005*. Paris, Direction du Patrimoine, Sous-direction de l'Archéologie, Ministère de la Culture et de la Communication, 2007, p. 39.
- Rebiscoul 2003** : REBISCOUL (A.) — Le site paléométallurgique des « Ferrys » commune de La Bussière (Loiret). *Revue Archéologique de Picardie, Cultivateurs, éleveurs et artisans dans les campagnes de la Gaule romaine*, Actes du VI^e colloque AGER, Compiègne (Oise), juin 2002, 1/2, 2003, p. 129-140.
- Rico 2005** : RICO (Chr.) — Vingt ans de recherche sur les mines et les métallurgies romaines en péninsule ibérique (1985-2004). *Pallas, revue d'études antiques*, 67, 2005, p. 217-239.
- Rougé 1966** : ROUGÉ (J.) — *L'organisation du commerce maritime en Méditerranée sous l'Empire romain*. Paris, Publications de l'École pratique des hautes études, 1966, 540 p.
- Sablayrolles 1989** : SABLAYROLLES (R.) — Six années de recherches à Saint-Denis (Aude). *In* : *Mines et métallurgies antiques et médiévales de la France méridionale. Recherches récentes*. Journées de Perpignan, 1987. Perpignan, Université de Toulouse Le Mirail, Ville de Perpignan, 1989, p. 73-84.
- Solier 1981** : SOLIER (Y.) — Les épaves de Gruissan, *Archaeonautica*, III, 1981, p. 196-212.
- Stewart et al. 2000** : STEWART (J.-W.), CHARLES (J.-A.), WALLACH (E.-R.) — *Iron-phosphorus-carbon system*. Part I to III. *Materials Science and Technology*, 16, 2000, p. 275-303.
- Tchernia 1969** : TCHERNIA (A.) — Épave métallique du Cap des Mèdes. *Gallia*, 27, 2, 1969, p. 476-478.
- Vega et al. 2002** : VEGA (E.), DILLMANN (P.), FLUZIN (Ph.) — Contribution à l'étude de fers phosphoreux en sidérurgie ancienne. *Archéométrie*, 26, 2003, p. 197-208.
- Vega et al. 2003** : VEGA (E.), DILLMANN (Ph.), L'HERITIER (M.), FLUZIN (P.), CREW (P.), BENOÎT (P.) — Forging of phosphoric iron. An analytical and experimental approach. *In* : *Archaeometallurgy in Europe*. Proceedings of the International Conference de Milan, 2003. Milan, Associazione Italiana di Metallurgia, 2003, p. 337-346.