

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

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

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ PAUL VALÉRY – MONTPELLIER III

Archéologie, spécialité mondes classiques et cultures indigènes

THÈSE

présentée et soutenue publiquement par

PAGÈS Gaspard

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

Volume II : illustrations

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

MEMBRES DU JURY :

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

Décembre 2008

TABLE DES FIGURES

PARTIE I : LA PRODUCTION DU FER 10

CHAPITRE 1 : RÉPERTOIRE DES INITIATIVES SIDÉRURGIQUES DE L'ANTIQUITÉ AU DÉBUT DU MOYEN ÂGE 12

Fig. 1 : représentation schématique des différents types de moyen de production sidérurgique.	13
Fig. 2 : modèle de fiche employé dans le répertoire des lieux de réduction directe des Alpes aux Pyrénées-Orientales.	14
Fig. 3 : distributions des enquêtes archéologiques sidérurgiques menées dans le Midi méditerranéen en fonction de la date de leur réalisation, du type d'exploitation sidérurgique qu'elles concernent et du genre d'investigations archéologiques.	15
Fig. 4 : carte de répartition des différents types de moyen de production sidérurgique répertoriés dans le midi de la France.	16
Fig. 5 : les différents types de moyen de production sidérurgique répertoriés dans le midi de la France : nomination, localisation et datation.	17
Fig. 6 : distributions des différents types de moyen de production sidérurgique répertoriés dans le midi de la France en fonction de la chronologie de leur fonctionnement et de leur localisation.	18
Fig. 7 : les différents types de moyen de production sidérurgique répertoriés dans le midi de la France : les fourchettes chronologiques de leur fonctionnement.	19

CHAPITRE 2 : LES MOYENS DE PRODUCTION DISPERSÉS TARDO-ANTIQUES : L'APPORT DE NOUVELLES DOCUMENTATIONS 20

1. L'ATELIER DE RÉDUCTION ISOLÉ DES ESPÉRELLES (MARTIGUES, 13) AU DÉBUT DU BAS-EMPIRE	21
Fig. 8 : carte de localisation du site.	21
Fig. 9 : le site dans son contexte géologique proche.	22
Fig. 10 : plan général de la fouille.	23
Fig. 11 : plans détaillés du bas fourneau FR21.	24
Fig. 12 : coupes du bas fourneau FR21.	25
Fig. 13 : le bas fourneau FR21.	26
Fig. 14 : répartition spatiale, en nombre et en masse, des types de mobiliers sidérurgiques.	27
Fig. 15 : bilan répertorié des analyses métallographiques.	27
Fig. 16 : observations métallographiques de la scorie écoulée non magnétique 18.1.	28
Fig. 17 : observations métallographiques du <i>gromps</i> 18.5.	29
Fig. 18 : observations métallographiques de la scorie de fond de four 18.7.	30
2. LE GRAVAS (SAINT-MAMERT-DU-GARD, 30), UN ATELIER TARDO-ANTIQUE DANS LE DISTRICT SIDÉRURGIQUE DU BOIS DES LENS	31
Fig. 19 : carte de localisation du site.	31
Fig. 20 : le site dans ses contextes géologique, sidérurgique et artisanal proches.	32
Fig. 21 : plan général de la fouille du bas fourneau des Dévenau (Montpezat, 30) (d'après J.-Cl. Bessac).	33
Fig. 22 : la fouille du bas fourneau des Dévenau vue du sud et du nord (Montpezat, 30) (d'après J.-Cl. Bessac).	33
Fig. 23 : plan détaillé et coupe de la fouille du bas fourneau des Dévenau (Montpezat, 30) (d'après J.-Cl. Bessac).	34
Fig. 24 : le minerai de fer pisolithique du Bois des Lens (30).	34
Fig. 25 : plan général de la fouille.	35
Fig. 26 : coupes du bas fourneau FR113.	36

Fig. 27 : le bas fourneau FR113 et la fouille.	37
Fig. 28 : répartition spatiale, en nombre et en masse, des types de mobiliers de construction.	38
Fig. 29 : répartition spatiale, en nombre et en masse, des types de mobiliers sidérurgiques.	38
Fig. 30 : bilan répertorié des analyses métallographiques.	38
Fig. 31 : l'échantillon 108.1 (macrographie).	39
Fig. 32 : observations métallographiques de la scorie de fond de four 101S.2.	40
Fig. 33/1 : observations métallographiques de l'agglomération métallique 102.1 (macrographie).	41
Fig. 33/2 : observations métallographiques de l'agglomération métallique 102.1 (micrographie).	42
Fig. 34 : observations métallographiques de l'agglomération métallique 102.2.	43
Fig. 35 : les fragments de tuyères du site.	44
Fig. 36 : diagramme des estimations sidérurgiques.	45

CHAPITRE 1 : DANS LES HABITATS GROUPÉS

1. L'ÎLOT 6 D'OLBLIA (HYÈRES, 83) AU DÉBUT DE LA PÉRIODE ROMAINE	49
Fig. 37 : carte de localisation du site.	49
Fig. 38 : plan général du site et localisation de l'îlot 6 (d'après M. Bats).	49
Fig. 39 : l'îlot 6 de la fin du IV ^e siècle à la première moitié du II ^e siècle avant notre ère (d'après M. Bats).	50
Fig. 40 : l'îlot 6 de la première moitié du II ^e siècle aux années 40/30 avant notre ère (d'après M. Bats).	50
Fig. 41 : l'îlot 6 durant la période romaine, des années 40/30 avant notre ère aux années 20 de notre ère (d'après M. Bats).	51
Fig. 42 : plan et coupe de l'atelier de forge romain (d'après M. Bats).	52
Fig. 43 : l'atelier de forge romain vu de l'ouest (d'après M. Bats).	52
Fig. 44 : l'enclume en galet de l'atelier de forge romain (US 61200).	53
Fig. 45 : les battitures de l'atelier de forge romain (US 61192).	53
Fig. 46 : répartition, en nombre et en masse, des types de mobiliers métallurgiques dans l'atelier de forge romain.	53
Fig. 47 : bilan répertorié des analyses métallographiques.	54
Fig. 48 : observations métallographiques du culot de forge 61148.3.	55
2. LUNEL-VIEL (34) AU MILIEU DU II^E SIÈCLE	56
Fig. 49 : carte de localisation du site.	56
Fig. 50 : plan général du quartier central et localisation de la pièce 5-6-8 dans la maison A (d'après C. Raynaud).	57
Fig. 51 : plan détaillé de la maison A (d'après C. Raynaud).	58
Fig. 52 : plan détaillé de l'atelier de forge (d'après C. Raynaud).	58
Fig. 53 : coupe de l'atelier de forge (d'après C. Raynaud).	59
Fig. 54 : répartition, en nombre et en masse, des types de mobiliers métallurgiques dans l'atelier de forge.	59
Fig. 55 : distribution, par classes de masse, des culots de l'atelier de forge.	60
Fig. 56 : bilan répertorié des analyses métallographiques.	61
Fig. 57 : observations métallographiques du culot de forge 2045.5.	62
Fig. 58 : observations métallographiques du culot de forge 2085.3.	63
Fig. 59/1 : observations métallographiques de l'outil tranchant 2045.12 (macrographie).	64
Fig. 59/2 : observations métallographiques de l'outil tranchant 2045.12 (micrographie).	65
Fig. 60 : observations métallographiques du probable plomb de chantier 2045.10.	66
Fig. 61 : observations métallographiques du demi-produit 2045.8.	67
Fig. 62 : observations métallographiques du demi-produit 2045.14.	68
3. LA STATION ROUTIÈRE D'AMBRUSSUM (VILLETELLE, 34) AU HAUT-EMPIRE	69
Fig. 63 : carte de localisation du site.	69
Fig. 64 : plan général du site et localisation de l'îlot 9 (d'après V. Mathieu et J.-L. Paillet).	69
Fig. 65 : répartition par périodes, en nombre et en masse, des types de mobiliers métallurgiques et ferreux de l'îlot.	70
Fig. 66 : répartition par périodes, en nombre, des objets en bronze et en plomb de l'îlot.	70
ÉTAT D : 25-50 DE NOTRE ÈRE	71
Fig. 67 : plan général de l'îlot (d'après J.-L. Fiches, Y. Manniez, V. Mathieu).	71
Fig. 68 : répartition spatiale, en nombre, des types de mobiliers métallurgiques dans l'îlot.	72
Fig. 69 : bilan répertorié des analyses métallographiques.	72
Fig. 70 : observations métallographiques du demi-produit 9799.1.	73
Fig. 71 : observations métallographiques du fragment de bandage de roue 9504.1.	74
Fig. 72 : mobiliers de harnachement et autres (dessin J. Chevalier).	75
ÉTAT C : 50-75 DE NOTRE ÈRE	76
Fig. 73 : plan général de l'îlot et localisation des espaces métallurgiques (d'après J.-L. Fiches, Y. Manniez, V. Mathieu).	76
Fig. 74 : répartition spatiale, en nombre, des types de mobiliers métallurgiques dans l'îlot.	77
Fig. 75 : tas de scories localisé dans l'angle sud-ouest de l'atelier de forge principal, installé dans la pièce 29 (cliché J.-L. Fiches).	78
Fig. 76 : plan détaillé de l'espace 25, où se trouve le foyer de forge d'appoint FR388 (d'après J.-L. Fiches, Y. Manniez, V. Mathieu).	78
Fig. 77 : foyer de forge d'appoint (FR388) creusé dans la cour sud, au sein de l'espace 25 (cliché Y. Manniez).	78
Fig. 78 : distribution, par classes de masse, des culots de l'atelier de forge principal, installé dans la pièce 29.	79
Fig. 79 : bilan répertorié des analyses métallographiques.	79

Fig. 80 : observations métallographiques du culot de forge 9820.4.	80
Fig. 81 : observations métallographiques du culot de forge 9754.2.	81
Fig. 82 : observations métallographiques du fragment de bandage de roue 9806.1.	82
Fig. 83 : mobiliers de harnachement et autres (dessin J. Chevalier).	83
Fig. 84 : observations métallographiques du demi-produit 9797.2.	84
ÉTAT B : 75-100 DE NOTRE ÈRE	85
Fig. 85 : plan général de l'îlot (d'après J.-L. Fiches, Y. Manniez, V. Mathieu).	85
Fig. 86 : répartition spatiale, en nombre, des types de mobiliers métallurgiques dans l'îlot.	86
Fig. 87 : mobiliers de harnachement, militaire et domestique (dessin J. Chevalier).	86
ÉTAT A : 125-175 DE NOTRE ÈRE	87
Fig. 88 : plan général de l'îlot et localisation des espaces métallurgiques (d'après J.-L. Fiches, Y. Manniez, V. Mathieu).	87
Fig. 89 : répartition spatiale, en nombre, des types de mobiliers métallurgiques dans l'îlot.	88
Fig. 90 : plan détaillé des pièces 8 et 17 qui regroupent l'ensemble des vestiges métallurgiques (d'après J.-L. Fiches, Y. Manniez, V. Mathieu).	89
Fig. 91 : bilan répertorié des analyses métallographiques.	90
Fig. 92 : échantillon de battitures lamellaires et en bille provenant du comblement de la fosse dite dépotoir ou de recyclage FS325, localisée dans la pièce 17.	91
Fig. 93 : fragments d'armes découverts dans le comblement des fosses métallurgiques FS305 (pièce 8) et FS325 (pièce 17).	91
Fig. 94 : observations métallographiques du fragment de bandage de roue 9103.1.	92
Fig. 95 : mobiliers de harnachement, militaire et domestique (dessin J. Chevalier).	93
4. LE ROC DE PAMPÉLUNE (ARGELLIERS, 34) AU VI^E SIÈCLE	94
Fig. 96 : carte de localisation du site.	94
Fig. 97 : plan général du site et localisation des découvertes métallurgiques (d'après L. Schneider et G. Marchand).	95
Fig. 98/1 : répartition spatiale, en nombre et en masse, des types de mobiliers métallurgiques dans le site (n°1).	96
Fig. 98/2 : répartition spatiale, en nombre et en masse, des types de mobiliers métallurgiques dans le site (n°2).	97
Fig. 99 : distribution, par classes de masse, des culots des différents espaces métallurgiques.	98
Fig. 100 : le foyer de forge temporaire établi dans les niveaux de fondation du bâtiment 1S1.	99
Fig. 101 : poinçon à manche biconique surmonté d'une tête mycomorphe (US4309, tour 4G).	100
Fig. 102 : bilan de l'analyse métallographique de la matrice 4309.1 (tour 4G).	101
Fig. 103/1 : observations métallographiques de la matrice 4309.1 (tour 4G) (macrographie).	101
Fig. 103/2 : observations métallographiques de la matrice 4309.1 (tour 4G) (micrographie).	102
LE QUARTIER SOMMITAL	103
Fig. 104 : bilan répertorié des analyses métallographiques.	103
Fig. 105 : observations métallographiques du culot de forge 1389.2 (terrasse 1H).	104
Fig. 106 : observations métallographiques du culot de forge 1393.2 (terrasse 1H).	105
LE QUARTIER NORD-ORIENTAL	106
Fig. 107 : bilan répertorié des analyses métallographiques.	106
Fig. 108 : observations métallographiques du demi-produit 2194.1 (cour 2A3).	107
Fig. 109 : observations métallographiques de l'outil tranchant 2194.3 (cour 2A3).	108
Fig. 110 : observations métallographiques du couteau 2208.1 (cour 2A3).	109
Fig. 111 : un ciseau à bois provenant de l'US2180 (cour 2A3).	110
LE QUARTIER CENTRAL	111
Fig. 112 : bilan répertorié des analyses métallographiques.	111
Fig. 113 : observations métallographiques du fragment de loupe en cours de compactage 1176.1 (pièce 1L1).	112
Fig. 114 : les demi-produits du site : synthèse des données métriques.	113
Fig. 115 : un exemple de demi-produit assimilé au gabarit court (US3013, pièce 3A1).	114
Fig. 116 : un exemple de demi-produit assimilé au gabarit court (US1109, cour 1C).	115
Fig. 117 : observations métallographiques du demi-produit 2505.1 assimilé au gabarit court (bâtiment 2H).	116
Fig. 118 : observations métallographiques du demi-produit 2535.1 assimilé au gabarit long (terrasse 2L).	117
LES ESTIMATIONS	118
Fig. 119 : estimations du nombre et de la masse de scories que renferme le site.	118
Fig. 120 : estimations de la durée de fonctionnement des forges et du déficit en scories sur le site.	119
Fig. 121 : estimations de la masse de fer travaillée dans les forges.	120
Fig. 122 : estimations du nombre d'objets fabriqués dans les forges.	121
Fig. 123 : estimations de la surface de bois exploitée et charbonnée pour le fonctionnement des forges.	122

1. LE CHANTIER DE CONSTRUCTION DU BÂTIMENT A DE L'ÎLOT 12 D'AMBRUSSUM (VILLETTELLE, 34) DANS LA SECONDE MOITIÉ DU II^E SIÈCLE	125
Fig. 124 : carte de localisation du site.	125
Fig. 125 : plan général du site et localisation du bâtiment A dans l'îlot 12 (d'après V. Mathieu et J.-L. Pailler).	125
Fig. 126 : répartition spatiale, en nombre et en masse, des types de mobiliers métallurgiques dans le bâtiment.	126
Fig. 127 : bilan répertorié des analyses métallographiques.	127
Fig. 128 : observations métallographiques du tranchant en cours de fabrication 12214.2.	128
Fig. 129 : observations métallographiques du culot de forge 12216.3.	129
2. LE FORGEAGE DANS LES VILLAE DU HAUT-EMPIRE	130
Fig. 130 : localisation des <i>villae</i> et des établissements antiques fouillés possédant une forge, et positionnement des zones géographiques prospectées ayant livré des scories sur l'emplacement des bâtiments domaniaux.	130
Fig. 131 : plan du Haut-Empire des <i>villae</i> de Vareilles (Paulhan, Hérault) et des Près-Bas (Loupian, Hérault), et localisation des espaces artisanaux liés au forgeage (d'après S. Mauné et C. Pellecuer).	131
3. L'AURIBELLE-BASSE (PÉZENAS, 34) AU DÉBUT DU II^E SIÈCLE	132
Fig. 132 : carte de localisation du site.	132
Fig. 133 : plan général du site et localisation des contextes métallurgiques (d'après S. Mauné).	133
Fig. 134 : répartitions spatiale et chronologique, en nombre et en masse, des types de mobiliers métallurgiques.	134
Fig. 135 : distribution, par classes de masse, des culots de forge de la phase 2b (100-130 de n. è.).	134
Fig. 136 : bilan répertorié des analyses métallographiques.	135
Fig. 137 : observations métallographiques du culot de forge 1213.6.	136
Fig. 138 : observations métallographiques du <i>gromps</i> 1212.2.	137
Fig. 139 : observations métallographiques du pseudo- <i>gromps</i> 1213.2.	138
Fig. 140 : observations métallographiques de la chute de forge 1213.3.	139
Fig. 141 : observations métallographiques du demi-produit 1230.1.	140
Fig. 142 : observations métallographiques de l'outil type poinçon 1151.1.	141
4. LE BÂTIMENT B DE LA MADELEINE II (CLERMONT-L'HÉRAULT, 34) AUX IV^E-V^E SIÈCLES	142
Fig. 143 : carte de localisation du site.	142
Fig. 144 : le site dans son contexte micro-régional (d'après L. Schneider).	143
Fig. 145 : le site dans son contexte archéologique proche (d'après H. Pomarède).	143
Fig. 146 : plan général du site et localisation du contexte métallurgique (d'après A. Bergeret).	144
Fig. 147 : plan détaillé de la forge (d'après A. Bergeret et S. Barbey).	145
Fig. 148 : le support de l'enclume.	146
Fig. 149 : répartition spatiale, en nombre et en masse, des types de mobiliers métallurgiques dans le bâtiment.	147
Fig. 150 : bilan répertorié des analyses métallographiques.	147
Fig. 151 : observations métallographiques du culot de forge 3291.1.	148
Fig. 152 : observations métallographiques du fragment de loupe en cours de compactage 3291.2.	149
5. L'ERMITAGE (PAULHAN, 34) AU HAUT MOYEN ÂGE	150
Fig. 153 : carte de localisation du site.	150
Fig. 154 : plan général, toutes périodes confondues (du V ^e au XIV ^e siècle), des occupations du site et des concentrations en scories (d'après C. Labarussiat et O. Ginouvez).	151
Fig. 155 : répartitions chronologique et spatiale, en nombre et en masse, des types de mobiliers métallurgiques du site.	152
Fig. 156 : distribution, par classes de masse, des culots de forge de la phase des VII ^e et VIII ^e siècles.	153
Fig. 157 : bilan répertorié des analyses métallographiques.	153
Fig. 158 : observations métallographiques du culot de forge 3421.1.	154
Fig. 159 : observations métallographiques du culot de forge 3423.1.	155
Fig. 160 : observations métallographiques du pseudo- <i>gromps</i> 3421.3.	156

PARTIE III : LA CIRCULATION ET LE COMMERCE

DU MATÉRIAU FER

158

CHAPITRE 1 : SPÉCIFICITÉS DU SUPPORT ET DÉMARCHE 160

Fig. 161 : organigramme du protocole d'analyses archéométriques d'un demi-produit.	161
Fig. 162 : hiérarchisation des différentes qualités de propreté inclusionnaire.	161

CHAPITRE 2 : DES DEMI-PRODUITS EN CONTEXTE DE CIRCULATION ET D'UTILISATION 162

1. DES NAVIRES ANTIQUES CHARGÉS DE FER 163

Fig. 163 : localisation des épaves chargées de fer et des découvertes de demi-produits en contextes maritime et fluvial autour de la Méditerranée occidentale.	163
Fig. 164 : les épaves chargées de fer et les découvertes de demi-produits en contextes maritime et fluvial autour de la Méditerranée occidentale : nomination, localisation, datation, type morphologique et estimation quantitative.	164
Fig. 165 : Localisation et chargement des épaves des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) (d'après L. Long).	164
Fig. 166 : typologie des demi-produits des épaves des Saintes-Maries-de-la-Mer (d'après L. Long et D. Djaoui).	165
Fig. 167 : tableau croisé synthétisant l'échantillonnage des demi-produits des épaves de Méditerranée occidentale : Bagaud 2 (Hyères, 83) et les Saintes-Maries-de-la-Mer (13).	166

LE TYPE 1L 167

Fig. 168/1 : les demi-produits de type 1L des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.	167
Fig. 168/2 : les demi-produits de type 1L des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.	168
Fig. 169 : la structure des demi-produits de type 1L des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.	169
Fig. 170 : le demi-produit SM2.1 (type 1L) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	170
Fig. 171 : le demi-produit SM2.2 (type 1L) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	171
Fig. 172 : le demi-produit SM10.1 (type 1L) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	172
Fig. 173 : le demi-produit SM10.2 (type 1L) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	173
Fig. 174 : la structure des demi-produits de type 1L des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle micrographique.	174
Fig. 175 : dimensions et structure des demi-produits de type 1L des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) : données métriques.	175

LE TYPE 1M 176

Fig. 176 : les demi-produits de type 1M des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.	176
Fig. 177 : la structure des demi-produits de type 1M des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.	177
Fig. 178 : le demi-produit SM9.6 (type 1M) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	178
Fig. 179 : le demi-produit SM9.8 (type 1M) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	179
Fig. 180 : le demi-produit SM9.9 (type 1M) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	180
Fig. 181 : le demi-produit SM9.10 (type 1M) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	181
Fig. 182 : la structure des demi-produits de type 1M des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle micrographique.	182
Fig. 183 : dimensions et structure des demi-produits de type 1M des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) : données métriques.	183

LES TYPES 2M ET 3C 184

Fig. 184/1 : les demi-produits de types 2M et 3C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.	184
Fig. 184/2 : les demi-produits de type 2M des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.	185
Fig. 184/3 : les demi-produits de type 2M des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.	186
Fig. 185 : la structure des demi-produits de types 2M et 3C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.	187
Fig. 186 : les demi-produits de type 2M de Bagaud 2 (Hyères, 83) analysés à l'échelle macrographique.	188
Fig. 187 : le demi-produit BG2.3 (type 2M) de Bagaud 2 (Hyères, 83) analysé à l'échelle micrographique.	189
Fig. 188 : la structure des demi-produits de type 2M de Bagaud 2 (Hyères, 83) analysés aux échelles macrographique et micrographique.	190

Fig. 189 : le demi-produit SM9.1 (type 2M) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	191
Fig. 190 : le demi-produit SM9.2 (type 2M) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	192
Fig. 191 : le demi-produit SM25.1 (type 2M) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	193
Fig. 192 : le demi-produit SM25.2 (type 2M) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	194
Fig. 193 : la structure des demi-produits de type 2M des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle micrographique.	195
Fig. 194 : dimensions et structure des demi-produits de type 2M des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) et de Bagaud 2 (Hyères, 83) : données métriques.	196
Fig. 195 : dimensions et structure du demi-produit de type 3M des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) : données métriques.	197
LE TYPE 4C	198
Fig. 196/1 : les demi-produits de type 4C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.	198
Fig. 196/2 : les demi-produits de type 4C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.	199
Fig. 196/3 : les demi-produits de type 4C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.	200
Fig. 197 : la structure des demi-produits de type 4C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.	201
Fig. 198 : les demi-produits de type 4C de Bagaud 2 (Hyères, 83) analysés à l'échelle macrographique.	202
Fig. 199 : la structure des demi-produits de type 4C de Bagaud 2 (Hyères, 83) analysés à l'échelle macrographique.	203
Fig. 200 : le demi-produit SM2.5 (type 4C) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	204
Fig. 201 : le demi-produit SM9.3 (type 4C) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	205
Fig. 202 : le demi-produit SM9.4 (type 4C) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	206
Fig. 203 : le demi-produit SM9.11 (type 4C) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	207
Fig. 204 : la structure des demi-produits de type 4C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle micrographique.	208
Fig. 205 : dimensions et structure des demi-produits de type 4C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) et de Bagaud 2 (Hyères, 83) : données métriques.	209
LE TYPE 4L	210
Fig. 206/1 : les demi-produits de type 4L des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.	210
Fig. 206/2 : les demi-produits de type 4L des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.	211
Fig. 207 : la structure des demi-produits de type 4L des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.	212
Fig. 208 : le demi-produit SM24.1 (type 4L) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	213
Fig. 209 : le demi-produit SM24.2 (type 4L) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	214
Fig. 210 : la structure des demi-produits de type 4L des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle micrographique.	215
Fig. 211 : dimensions et structure des demi-produits de type 4L des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) : données métriques.	216
LE TYPE 5C	217
Fig. 212 : le demi-produit SM6.2 (type 5C) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	217
Fig. 213 : la structure du demi-produit de type 5C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	218
Fig. 214 : dimensions et structure du demi-produit de type 5C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) : données métriques.	219
LE TYPE 6C	220
Fig. 215 : les demi-produits de type 5C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.	220
Fig. 216 : le demi-produit SM6.1 (type 6C) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.	221
Fig. 217 : la structure des demi-produits de type 6C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés aux échelles macrographique et micrographique.	222
Fig. 218 : dimensions et structure des demi-produits de type 6C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) : données métriques.	223
SYNTHÈSE MÉTALLOGRAPHIQUE	224
Fig. 219 : résumé des principales caractéristiques structurales de chaque type de demi-produits assimilé à la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer.	224
Fig. 220 : rapport entre le % de carbone pondéré (observation microscopique des sections polies) et la proportion des zones aciérées (observation macroscopique des deux grandes faces) dans chaque demi-produit assimilé à la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer.	225
Fig. 221 : volume et nombre de loupe(s) mise(s) en œuvre dans chaque type morphologique de demi-produits assimilé à la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer.	226
Fig. 222 : la qualité des alliages fer-carbone de chaque type morphologique de demi-produits assimilé à la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer : proportion des zones aciérées et teneur en carbone pondérée.	226
Fig. 223 : la propreté inclusionnaire de chaque type morphologique de demi-produits assimilé à la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer.	226
Fig. 224 : détail de la soudure entre les loupes n°4 et n°5 du demi-produit SM24.2 : un exemple de soudure inter-loupe.	227
Fig. 225 : les demi-produits assimilés à la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer : synthèse métallographique, classement typométrallographique et destinations fonctionnelles.	228
LES ANALYSES CHIMIQUES SEMI-QUANTITATIVES MICRO-INCLUSIONNAIRES	229
Fig. 226 : moyenne pondérée des composés chimiques majeurs présents dans les inclusions de chaque section analytique des demi-produits du type 1L.	229

Fig. 227 : moyenne pondérée des composés chimiques majeurs présents dans les micro-inclusions de chaque section analytique des demi-produits du type 1M.	230
Fig. 228 : moyenne pondérée des composés chimiques majeurs présents dans les micro-inclusions de chaque section analytique des demi-produits du type 2M.	231
Fig. 229 : moyenne pondérée des composés chimiques majeurs présents dans les micro-inclusions de chaque section analytique des demi-produits du type 4C.	232
Fig. 230 : moyenne pondérée des composés chimiques majeurs présents dans les micro-inclusions de chaque section analytique des demi-produits du type 4L.	233
Fig. 231 : moyenne pondérée des composés chimiques majeurs présents dans les micro-inclusions de chaque section analytique des demi-produits du type 5C.	234
Fig. 232 : moyenne pondérée des composés chimiques majeurs présents dans les micro-inclusions de chaque section analytique des demi-produits du type 6C.	234
Fig. 233 : rapports des composés chimiques majeurs constituant les micro-inclusions non prises en compte pour différencier les groupes de loupes.	235
Fig. 234 : rapports et teneurs des composés chimiques majeurs constituant les micro-inclusions prises en compte pour différencier les groupes de loupes.	236
Fig. 235 : résumé des principales caractéristiques chimiques de chaque demi-produit par groupes de loupes discriminés.	237
Fig. 236 : les résultats des analyses chimiques micro-inclusionnaires pratiquées par Marie-Pierre Coustures sur cinq demi-produits des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) et leurs correspondances avec les groupes de loupes discriminés.	238
Fig. 237 : distribution des groupes de loupes par types de demi-produits et dans chaque demi-produit multi-loupe.	239
Fig. 238 : distribution des types de demi-produits par groupes de loupes et des groupes de loupes par épaves.	240

2. DES DEMI-PRODUITS EN COURS DE FAÇONNAGE ET D'UTILISATION **241**

Fig. 239 : dimensions, structure et correspondance typologique des demi-produits du Haut-Empire découverts en contexte de forge : données métriques.	241
Fig. 240 : dimensions, structure et correspondance typologique des demi-produits de l'Antiquité tardive découverts en contexte de forge : données métriques.	242
Fig. 241 : moyenne pondérée des composés chimiques majeurs présents dans les micro-inclusions des demi-produits analysés du Roc de Pampelune (Argelliers, 34).	243
Fig. 242/1 : rapports des composés chimiques majeurs constituant les micro-inclusions des demi-produits du Roc de Pampelune (Argelliers, 34) prises en compte pour différencier les groupes de loupes.	244
Fig. 242/2 : rapport et teneur des composés chimiques majeurs constituant les micro-inclusions des demi-produits du Roc de Pampelune (Argelliers, 34) prises en compte pour différencier les groupes de loupes.	245
Fig. 243 : les demi-produits du Haut-Empire découverts en contexte de forge : synthèse métallographique, classement typométrallographique et destinations fonctionnelles.	246
Fig. 244 : les demi-produits de l'Antiquité tardive découverts en contexte de forge : synthèse métallographique, classement typométrallographique et destinations fonctionnelles.	247

PARTIE I : LA PRODUCTION DU FER

**CHAPITRE 1 : RÉPERTOIRE DES
INITIATIVES SIDÉRURGIQUES DE L'ANTIQUITÉ
AU DÉBUT DU MOYEN ÂGE**

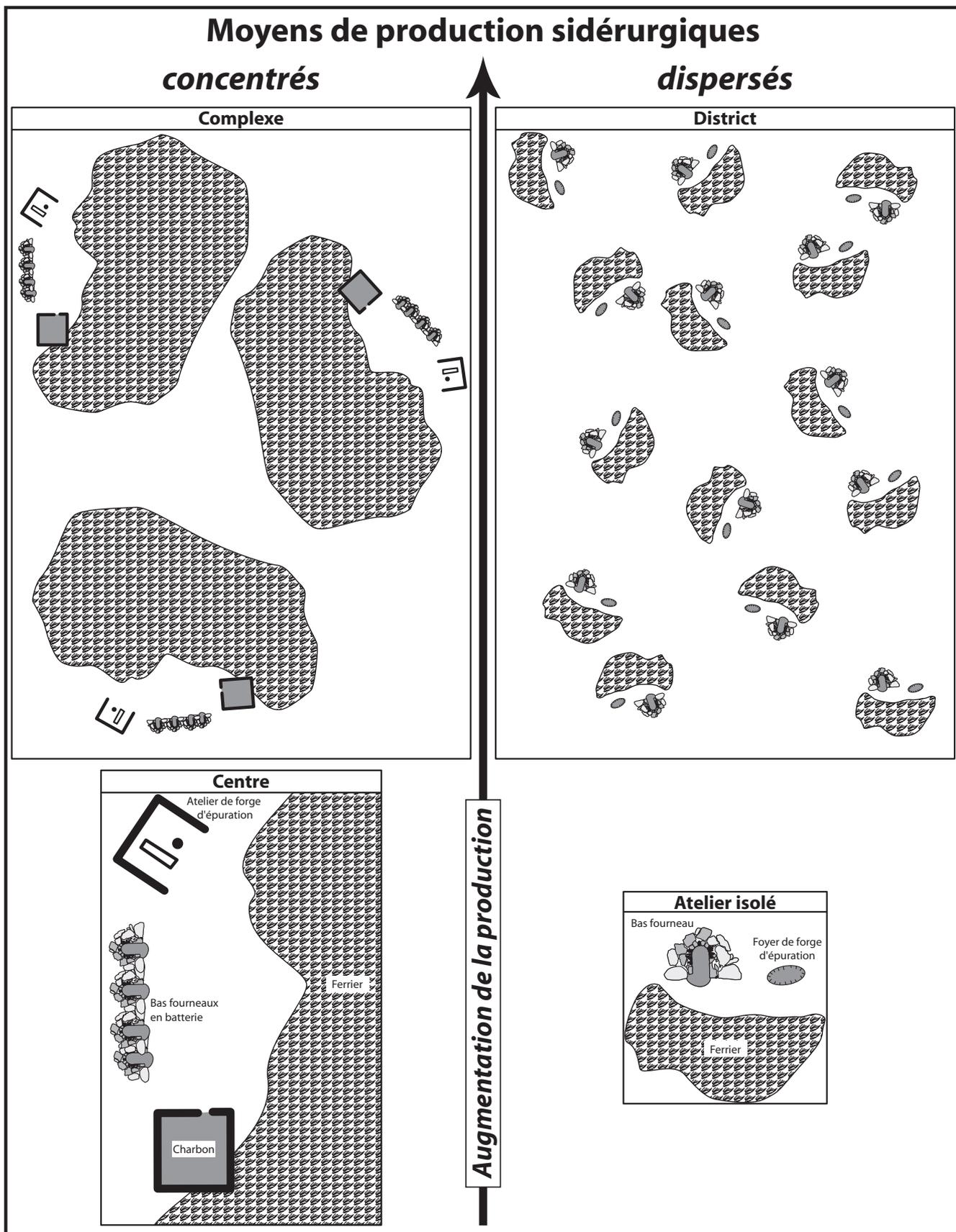


Fig. 1 : représentation schématique des différents types de moyen de production sidérurgique.

IDENTITÉ		
Nom/lieu-dit :	n° inv. :	Type :
Commune :	Département :	
CHRONOLOGIE		
VESTIGES		
Les déchets :		
Les produits :		
Les aménagements et constructions associés :		
CONTEXTE SIDÉRURGIQUE ENVIRONNANT		
Centres sidérurgiques postérieurs :		
Centres sidérurgiques proches et synchrones :		
Substrat sidérurgique antérieur :		
Exploitations modernes :		
Exploitations contemporaines :		
TRAVAUX		
Enquête de terrain :		
Bibliographie :		
EXPERTISE COMPLÉMENTAIRE OU JUSTIFICATIVE		

Fig. 2 : modèle de fiche employé dans le répertoire des lieux de réduction directe des Alpes aux Pyrénées-Orientales.

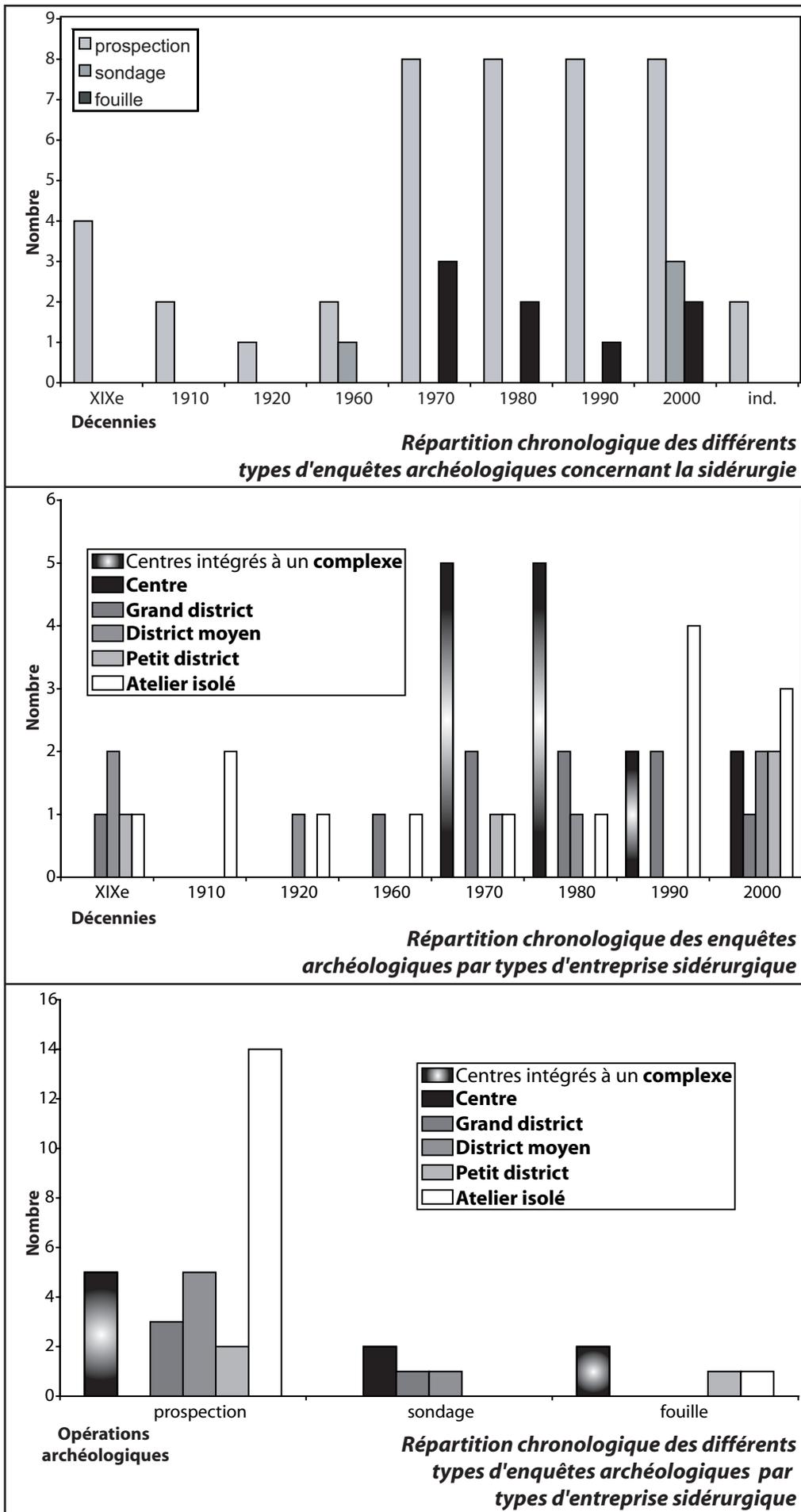


Fig. 3 : distributions des enquêtes archéologiques sidérurgiques menées dans le Midi méditerranéen en fonction de la date de leur réalisation, du type d'exploitation sidérurgique qu'elles concernent et du genre d'investigations archéologiques.

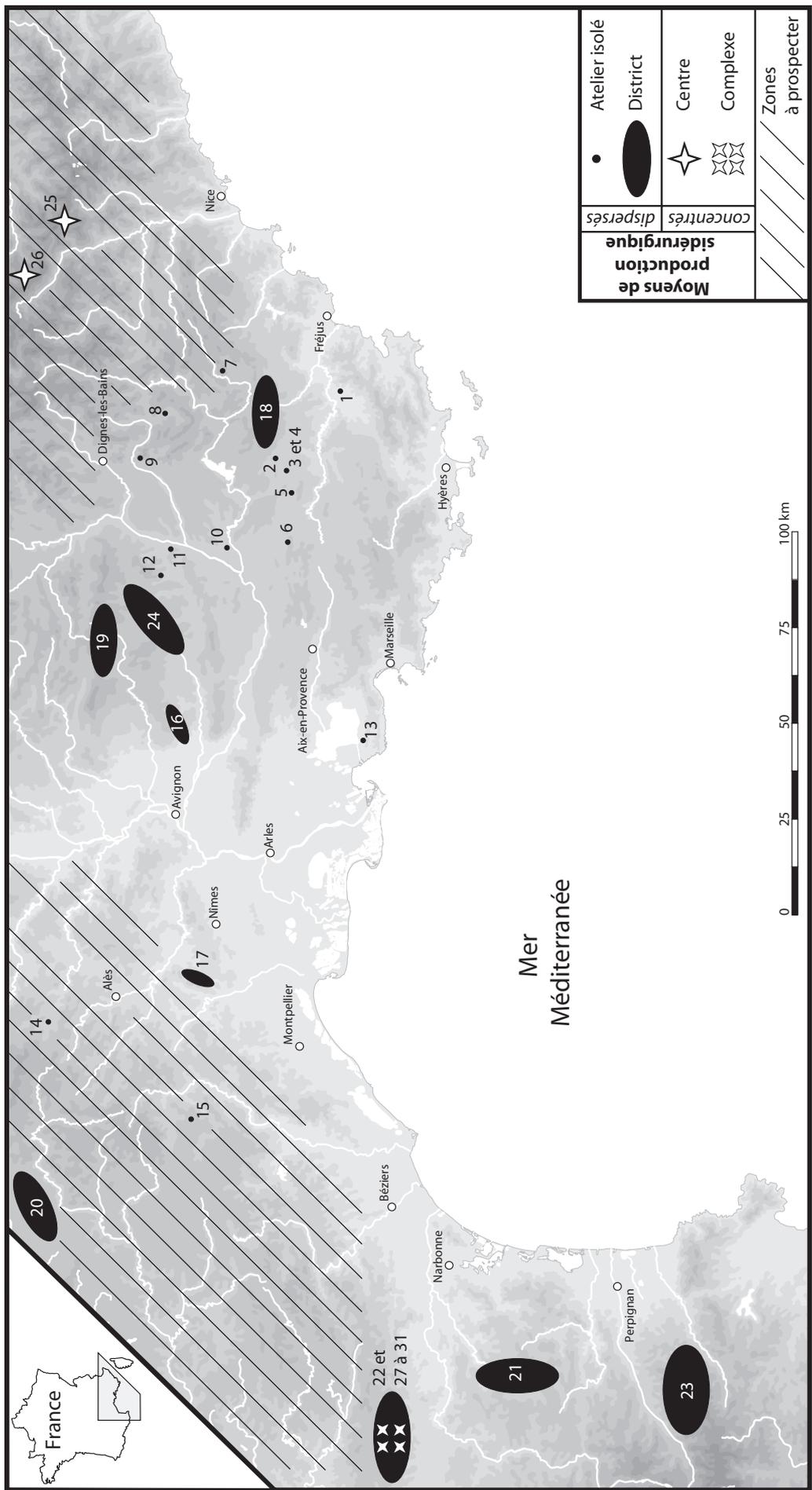


Fig. 4 : carte de répartition des différents types de moyen de production sidérurgique répertoriés dans le midi de la France.

Les numéros renvoient à la fig. 5.

n° inv.	Noms/lieux-dits	Communes	Dép.	Types	Chronologie du fonctionnement													
1	<i>Le bois de Peylobier</i>	Vidauban	83	Moyens de production sidérurgiques dispersés	Antiquité, Antiquité tardive													
2	<i>Espouvières 1 et 2</i>	Aups	83		<i>Atelier isolé</i>	Antiquité, Antiquité tardive												
3	<i>La Garesse</i>	Sillans-la-Cascade	83			Antiquité, Antiquité tardive												
4	<i>Les Fabrières</i>	Sillans-la-Cascade	83				indéterminée											
5	<i>Les Ferrières 1 et 2</i>	Pontévès	83					Antiquité, Antiquité tardive										
6	<i>Les Menques</i>	Esparron	83						indéterminée									
7	<i>Saint-Laurent</i>	Bargème	83							Antiquité								
8	<i>Sénez</i>	Barème	04								indéterminée							
9	<i>La Boudure</i>	Châteauredon	04									Antiquité, Antiquité tardive						
10	<i>Anrafrède</i>	Gréoux-les-Bains	04										Antiquité, Antiquité tardive					
11	<i>Saint-Michel</i>	Lurs	04											indéterminée				
12	<i>La Grillère</i>	Ongles	04												Antiquité, Antiquité tardive			
13	<i>Les Espérelles</i>	Martigues	13													IIIe-IVe siècles		
14	<i>Le col de Montredon</i>	Concoules	30														indéterminée	
15	<i>La Sanguinière</i>	Montdardier	30															indéterminée
16	<i>Fontaine-de-Vauchuse</i>		84	<i>Petit district</i>														
17	<i>Le Bois des Lens</i>		30		IVe-Ve siècles													
18	<i>Le plateau de Camjers</i>		83	<i>District moyen</i>		Ve siècle												
19	<i>Le plateau d'Albion</i>		04, 84		Antiquité, Antiquité tardive													
20	<i>Le causse de Sauveterre</i>		48	Antiquité, Antiquité tardive														
21	<i>Les Hautes-Corbières</i>		11		Antiquité, Antiquité tardive													
22	<i>Le versant méridional de la Montagne Noire</i>		11	<i>Grand district</i>		Ier siècle av.												
23	<i>Le massif du Canigou</i>		66		Ier siècle av., Antiquité (?) et Moyen Age													
24	<i>Les monts du Vauchise</i>		04, 84	IIIe siècle, Antiquité tardive, haut Moyen Age														
25	<i>Le col Ferrière</i>	Saint-Dalmas-de-Valdeblore	06		<i>Centre</i>	IIIe-IVe siècles												
26	<i>La Cime du Fer</i>	Saint-Etienne-de-Tinée	06	<i>Complexe</i>		IIIe-IVe siècles												
27	<i>Le Domaine des Forges</i>	Martys	11		Moyens de production sidérurgiques concentrés	Ier siècle av.- IIIe siècle ap.												
28		Laprade-Basse	11	Ier siècle- IIIe siècle														
29	<i>Co d'Espérou</i>	Lacombe	11		Ier siècle- IIIe siècle													
30	<i>Carreleit</i>	Fontiers	11	Ier siècle- IIIe siècle														
31	<i>Camp Naout</i>	Saint-Denis	11		Ier siècle- IIIe siècle													

Fig. 5 : les différents types de moyen de production sidérurgique répertoriés dans le midi de la France : nomination, localisation et datation.

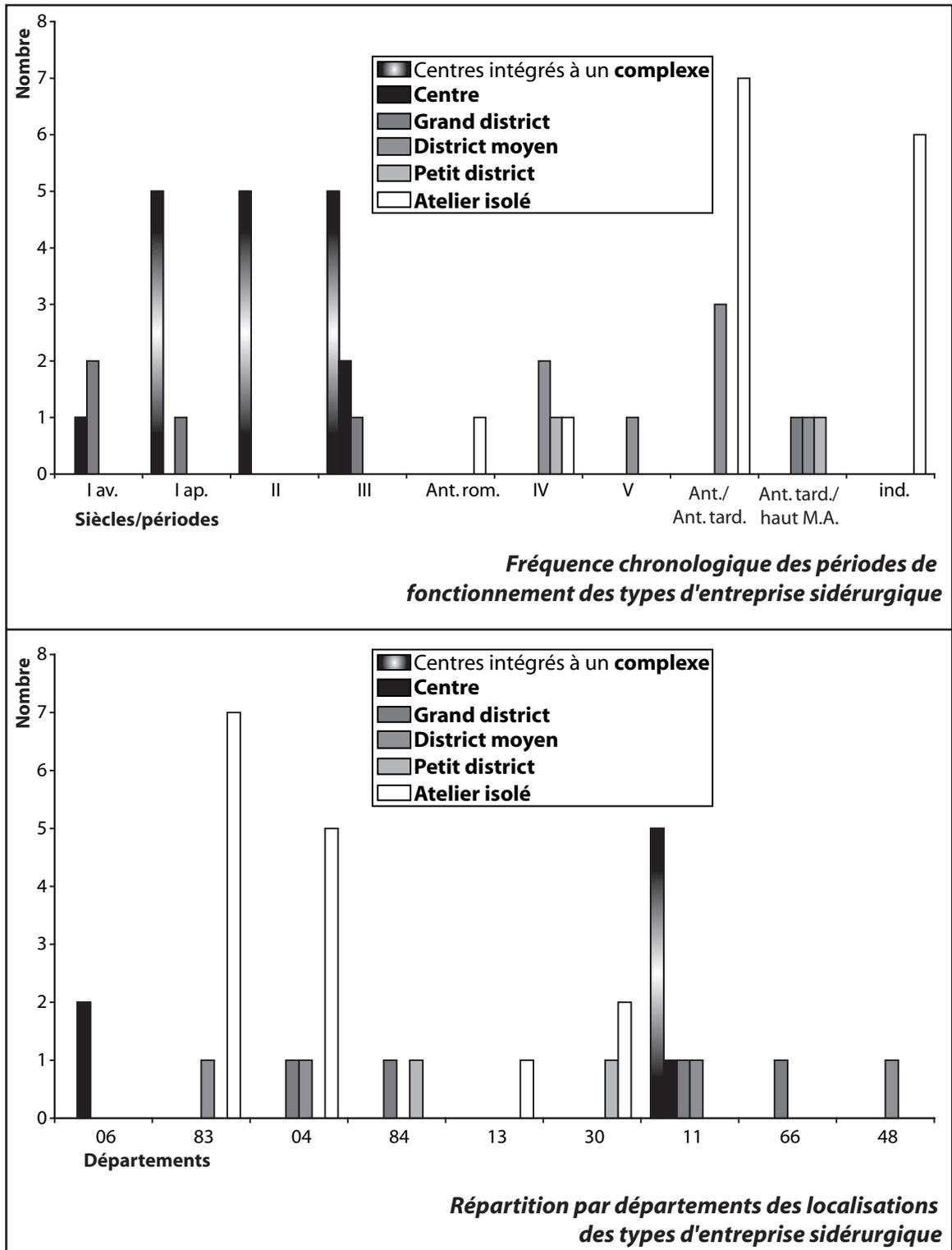


Fig. 6 : distributions des différents types de moyen de production sidérurgique répertoriés dans le midi de la France en fonction de la chronologie de leur fonctionnement et de leur localisation.

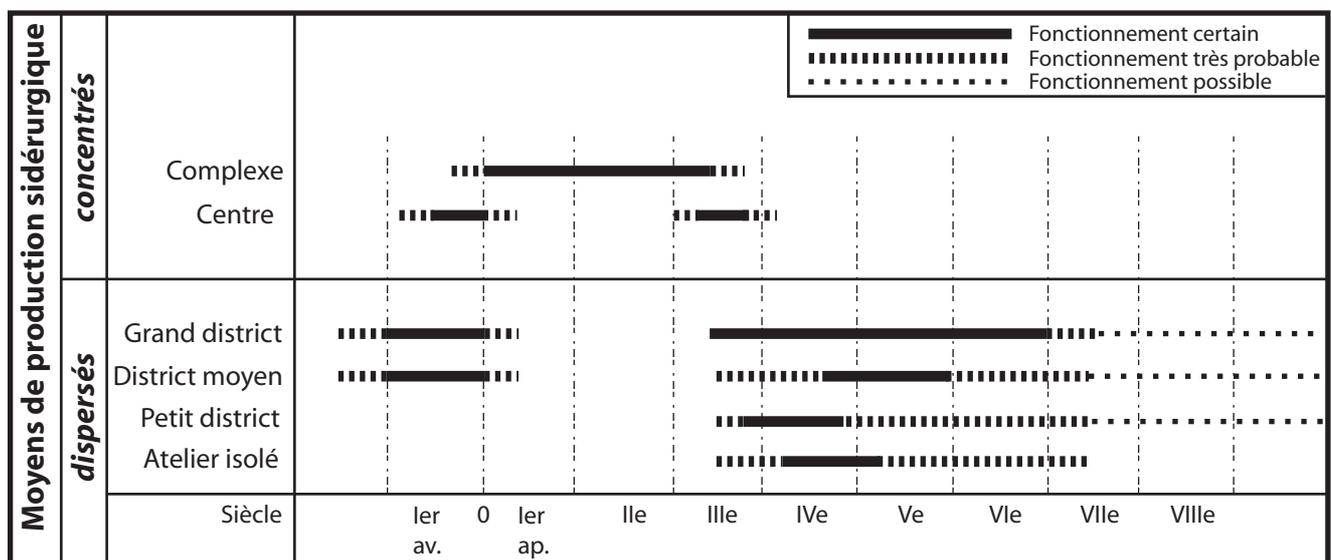


Fig. 7 : les différents types de moyen de production sidérurgique répertoriés dans le midi de la France : les fourchettes chronologiques de leur fonctionnement.

**CHAPITRE 2 : LES MOYENS DE
PRODUCTION DISPERSÉS TARDO-ANTIQUES :
L'APPORT DE NOUVELLES DOCUMENTATIONS**

1. L'ATELIER DE RÉDUCTION ISOLÉ DES ESPÉRELLES (MARTIGUES, 13) AU DÉBUT DU BAS-EMPIRE

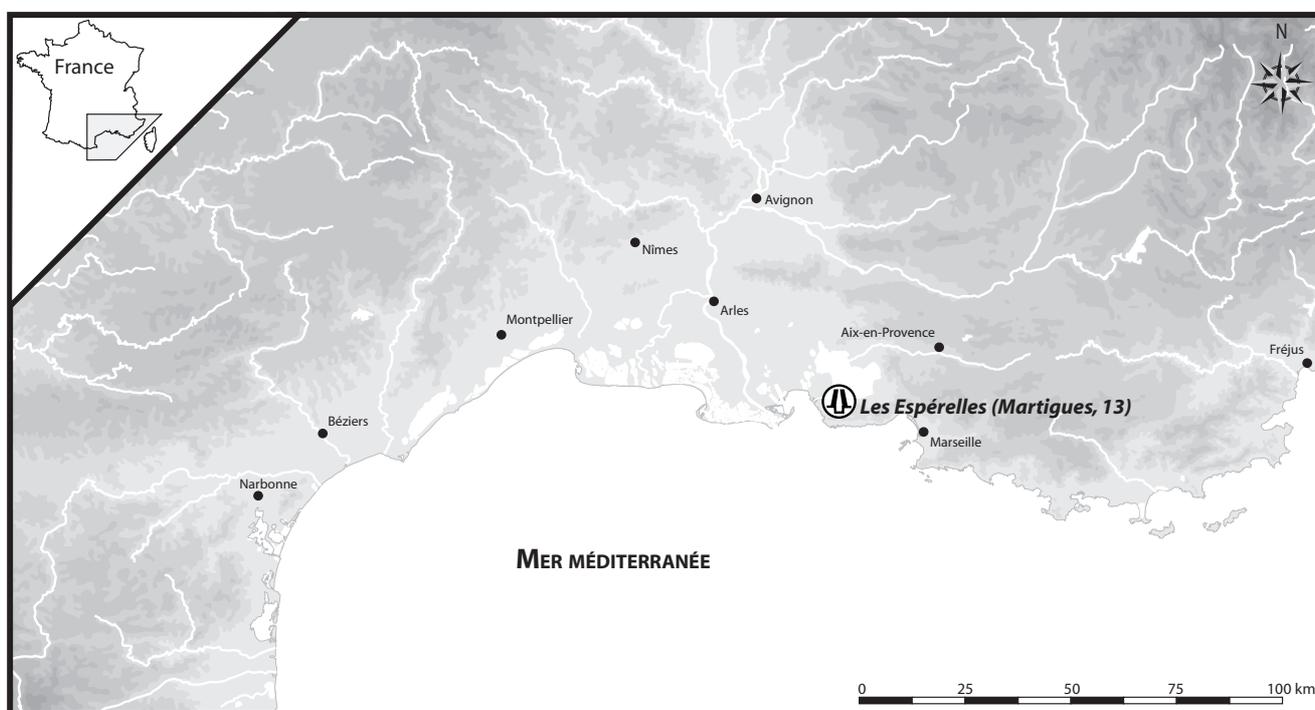


Fig. 8 : carte de localisation du site.

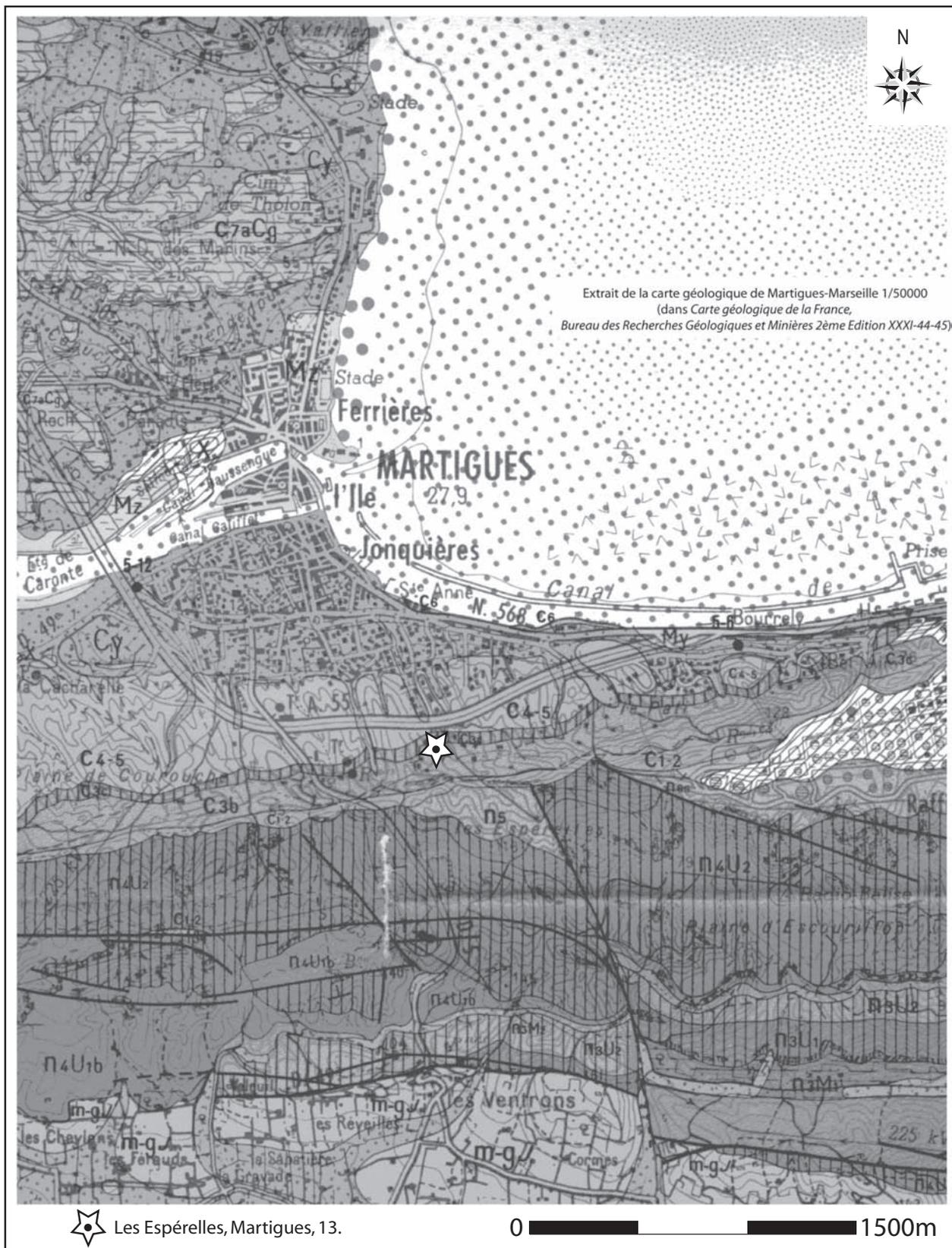


Fig. 9 : le site dans son contexte géologique proche.

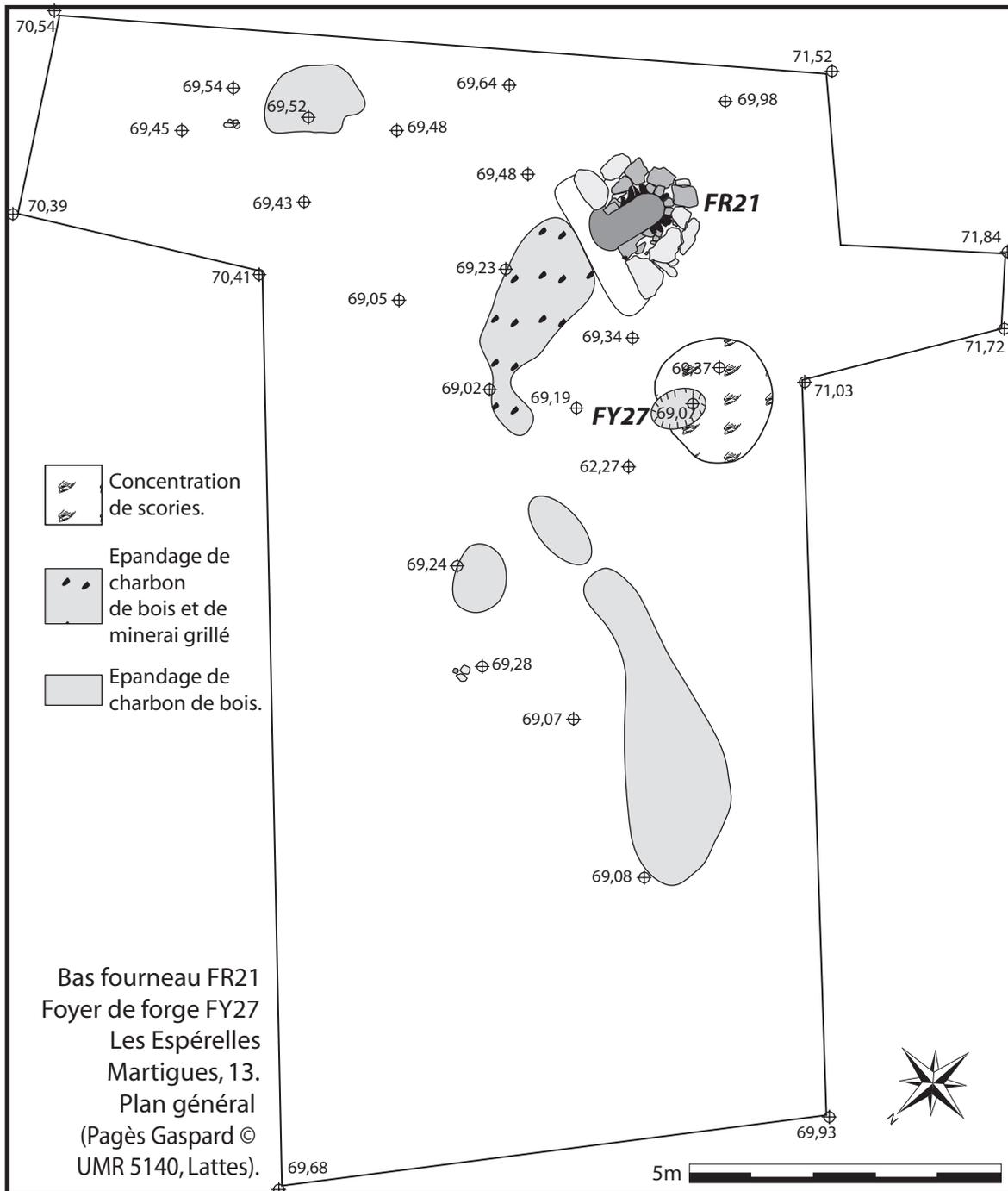


Fig. 10 : plan général de la fouille.

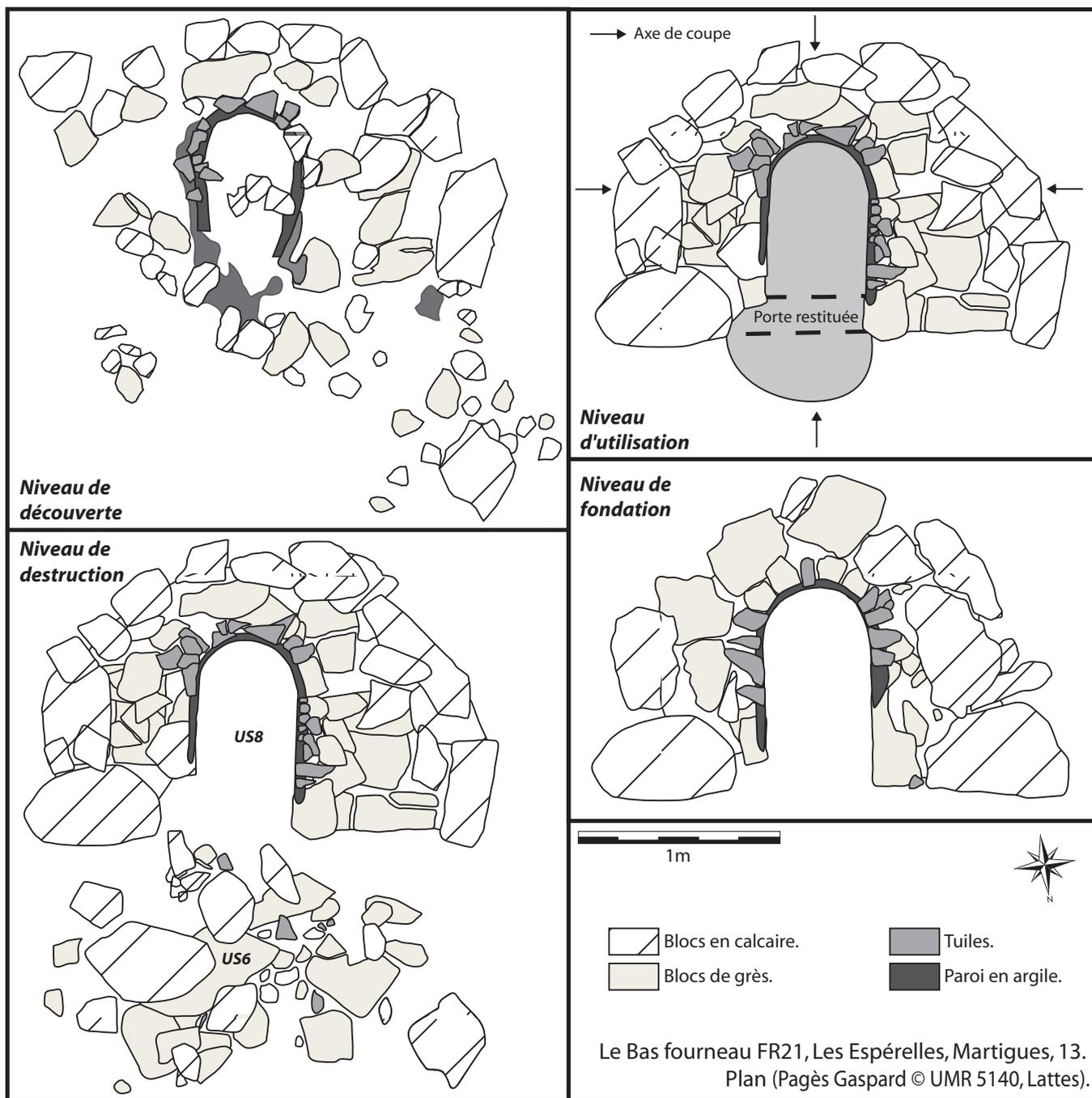


Fig. 11 : plans détaillés du bas fourneau FR21.

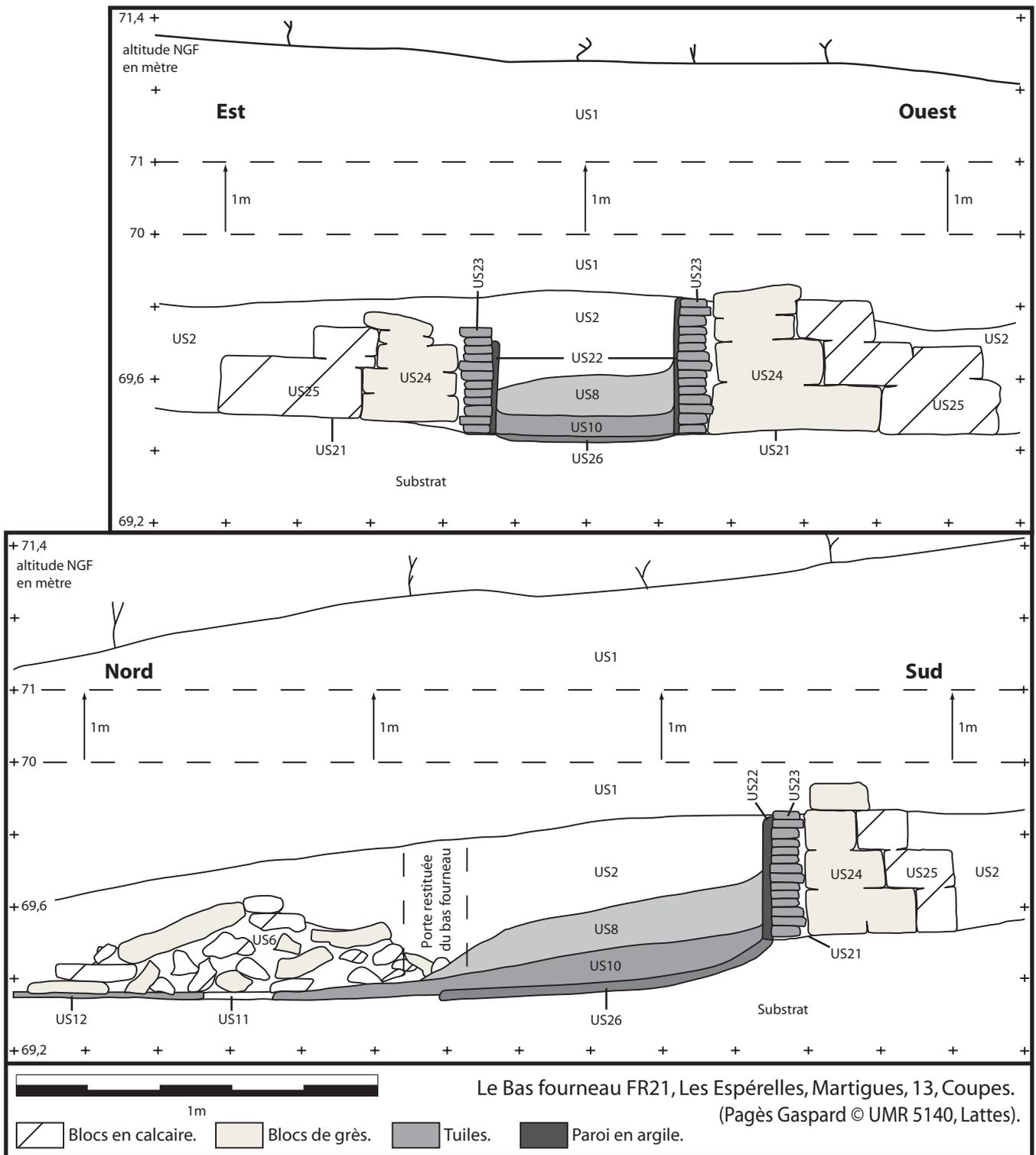
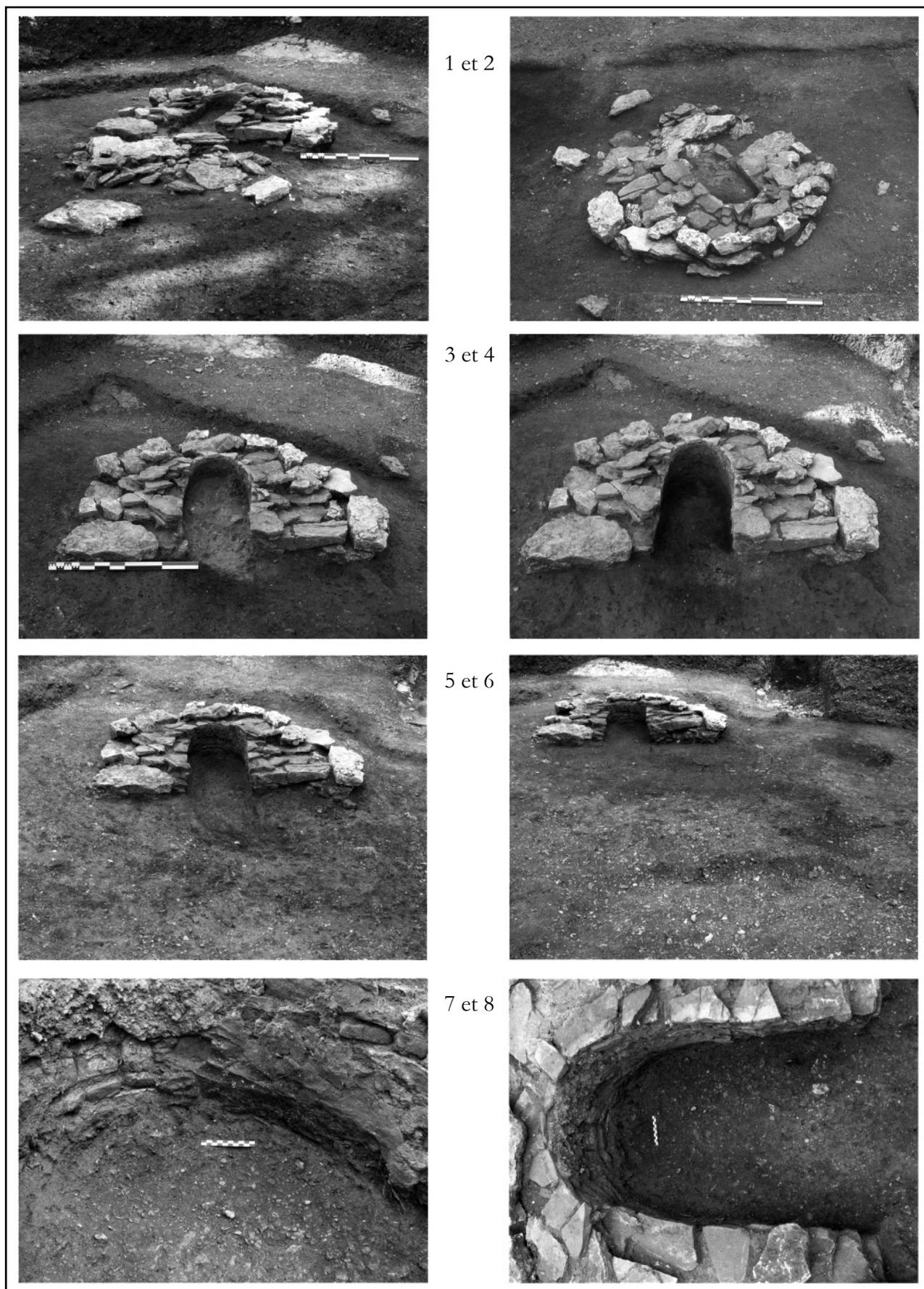


Fig. 12 : coupes du bas fourneau FR21.



1 à 2 : vues du nord-ouest et du sud-ouest des niveaux de destruction du bas fourneau FR21.
 3 à 6 : vues du nord des niveaux de fonctionnement du bas fourneau FR21. Sur la vue n°4, on perçoit à l'ouest le foyer de forge d'épuration excavé dans le substrat (FY27).
 7 et 8 : vues de la paroi interne du fond de la cuve du bas fourneau FR21.

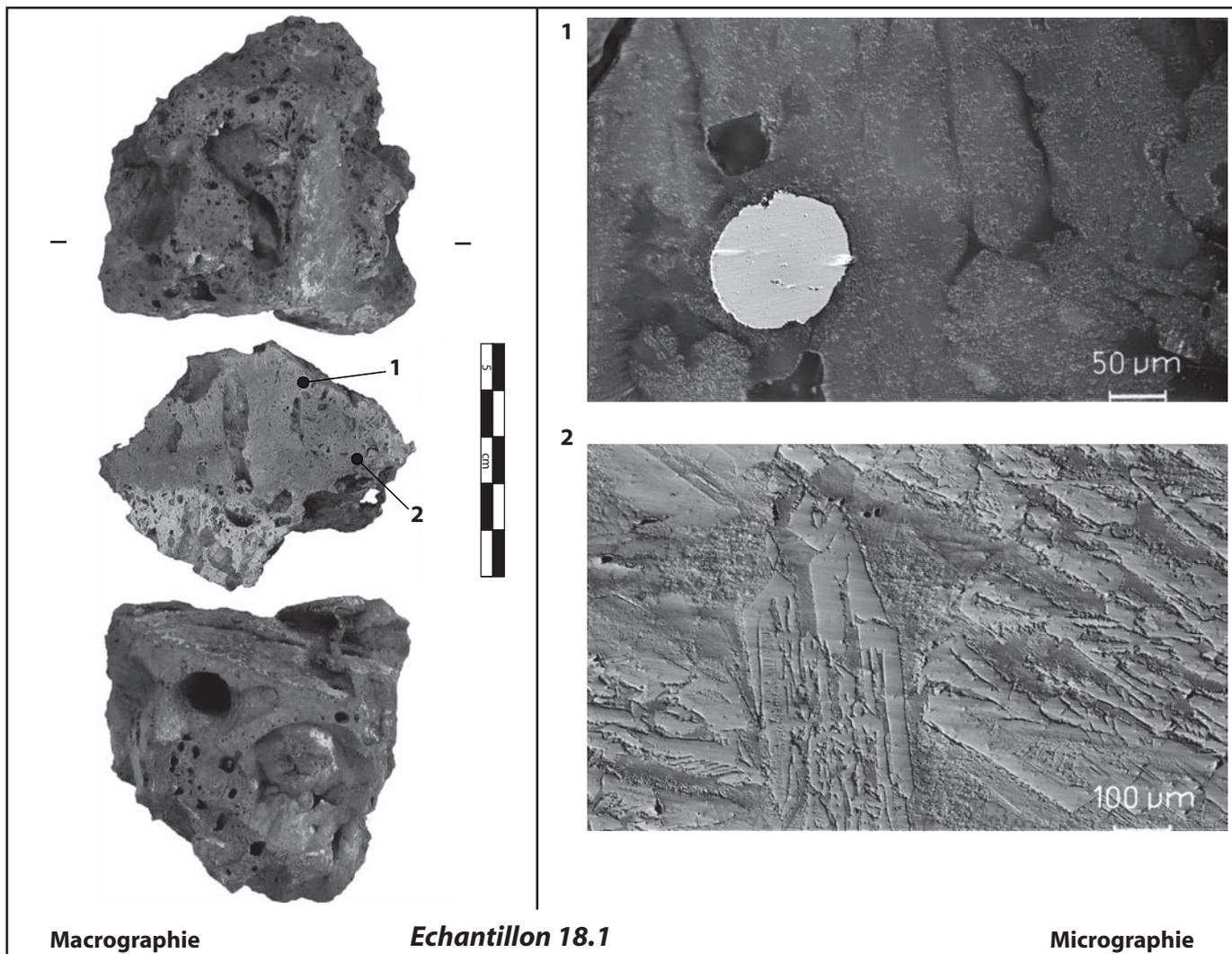
Fig. 13 : le bas fourneau FR21.

Aménagements	Décapage général		Bas fourneau FR21						Aire de grillage ?	Foyer d'épuration FY27						Total						
			abandon		destruction		sous total			épannage		comblement		sous total								
US	1		8		6		11		12		13		18									
Types	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)						
Scories	coulées denses		5	70	2	140	17	930	6	160	25	1230	3	50	118	2270	249	12900	367	15170	400	16520
	très magnétiques														14	470	14	470			14	470
	<i>sous total</i>		5	70	2	140	17	930	6	160	25	1230	3	50	118	2270	263	13370	381	15640	414	16990
Bas fourneau	parois				5	170			5	170			50	660	70	1700	120	2360			125	2530
	parois scorifiées				6	180	10	850	16	1030			16	350	59	3980	75	4330			91	5360
	<i>sous total</i>				11	350	10	850	21	1200			66	1010	129	5680	195	6690			216	7890
Minerais rubéfiés		1	10							10	280	14	230			14	230			25	520	
Total		6	80	2	140	28	1280	16	1010	46	2430	13	330	198	3510	392	19050	590	22560	655	25400	

Fig. 14 : répartition spatiale, en nombre et en masse, des types de mobiliers sidérurgiques.

N°	L x l x e (mm)	M (g)	Identifications	Synthèse des observations métallographiques	Interprétations
18.1	73 x 63 x 39	180	<i>scorie é coulée non magnétique</i>	Matrice fayalite pure à grandes lattes où se situent quelques très rares billes de fer non réoxydées à chaud.	Scorie de réduction é coulée proche d'un laitier.
18.2	58 x 55 x 41	118			
18.3	61 x 53 x 34	106			
18.4	74 x 49 x 44	144			
18.6	122 x 89 x 92	604			
18.7	126 x 79 x 50	440	<i>fond de four</i>	Matrice fayalite pure à grandes lattes où se trouvent des ilots de multiples petites billes ferritiques en cours d'agglomération et des fragments d'acier eutectoïde ou hypereutectoïde et, plus localement, de la fonte blanche.	Scorie de réduction proche d'un laitier dont la formation s'est réalisée à proximité de la loupe.
6.1	71 x 48 x 29	100	<i>gromps</i>	Fragments métalliques avec des inclusions et des porosités écrasées, composés d'acier eutectoïde et de fontes grise et blanche. Le tout est englobé dans une gangue siliceuse avec des charbons et des battitures.	Pertes métalliques témoignant de phases d'épuration, de compactage et de décarburation d'une loupe sale composée d'aciers et de fontes.
18.5	71 x 53 x 41	162		Fragments métalliques (entre la ferrite et l'acier eutectoïde) en cours d'épuration, de compactage et de décarburation. Un enrobage de scorie englobe la totalité. Il comprend des battitures globulaires et lamellaires dont certaines sont en cours de formation.	
18.8	156 x 125 x 87	848		Matrice fayalite pure à grandes lattes dans laquelle se trouvent des ilots de petites billes ferritiques et quelques filaments réoxydés à chaud, ainsi que des zones concentrant des battitures lamellaires et globulaires.	

Fig. 15 : bilan répertorié des analyses métallographiques.



*1 : bille de métal non réoxydée dans un bain fayalitique sans wustite.
2 : grandes lattes de fayalite sans wustite.*

Fig. 16 : observations métallographiques de la scorie é coulée non magnétique 18.1.

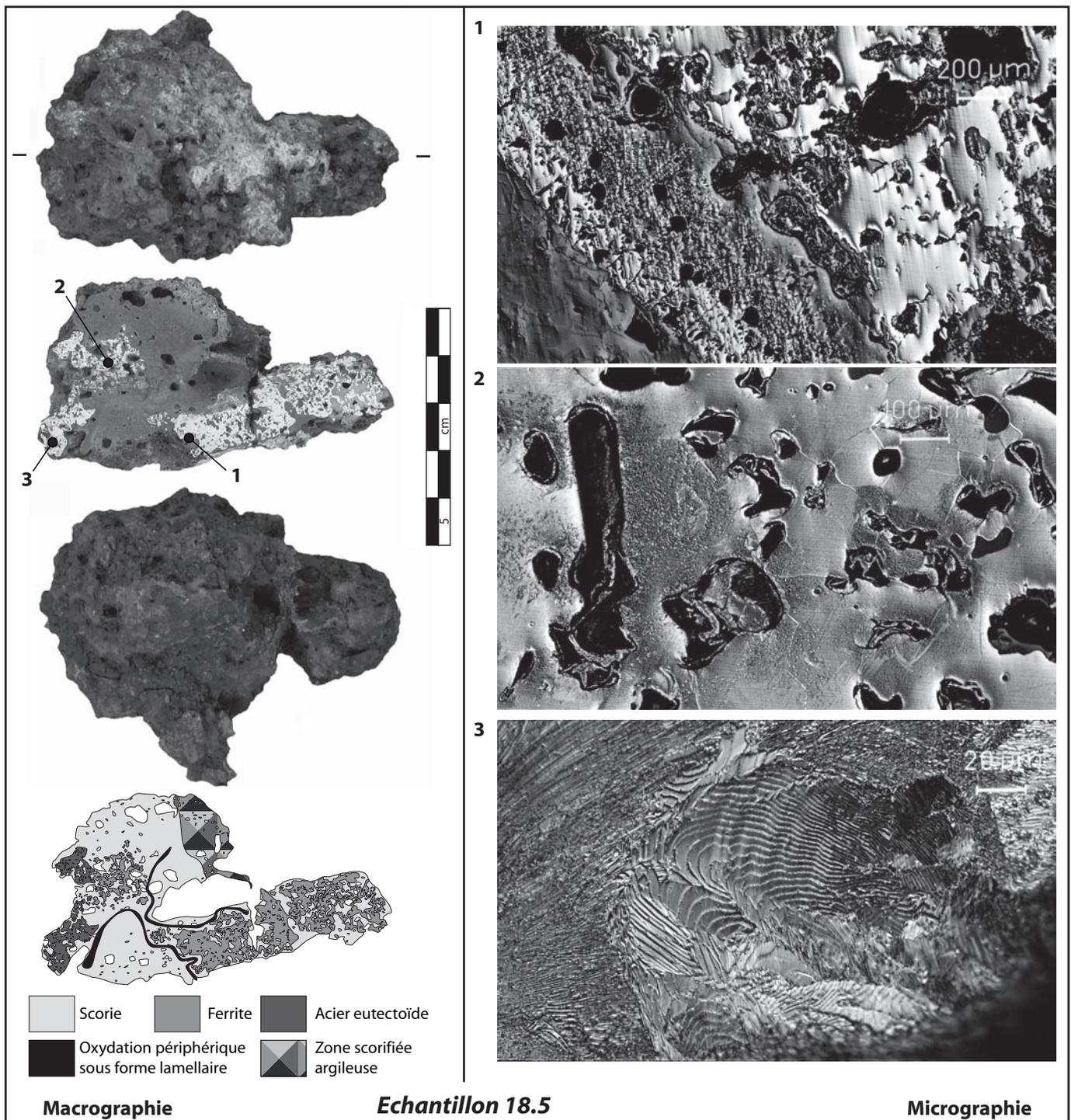
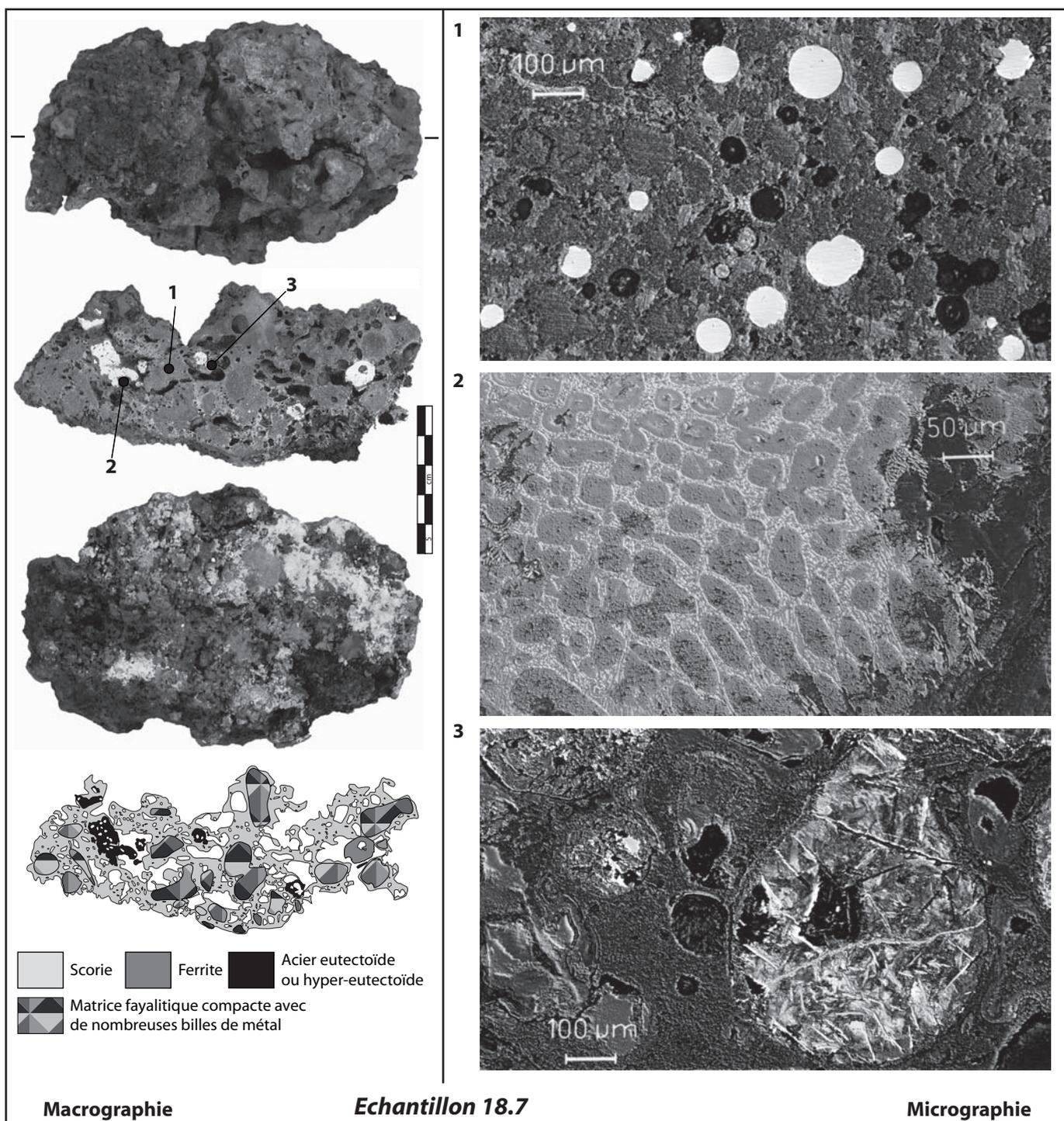


Fig. 17 : observations métallographiques du *gromps* 18.5.



- 1 : matrice hétérogène et en partie argileuse contenant de nombreuses billes ferritiques non réoxydées.
- 2 : bille de métal avec une structure lédébunitique (fonte grise entre 3,5 et 6 % de C).
- 3 : bille d'acier pratiquement hypereutectoïde dans une matrice hétérogène.

Fig. 18 : observations métallographiques de la scorie de fond de four 18.7.

2. LE GRAVAS (SAINT-MAMERT-DU-GARD, 30), UN ATELIER TARDO-ANTIQUE DANS LE DISTRICT SIDÉRURGIQUE DU BOIS DES LENS

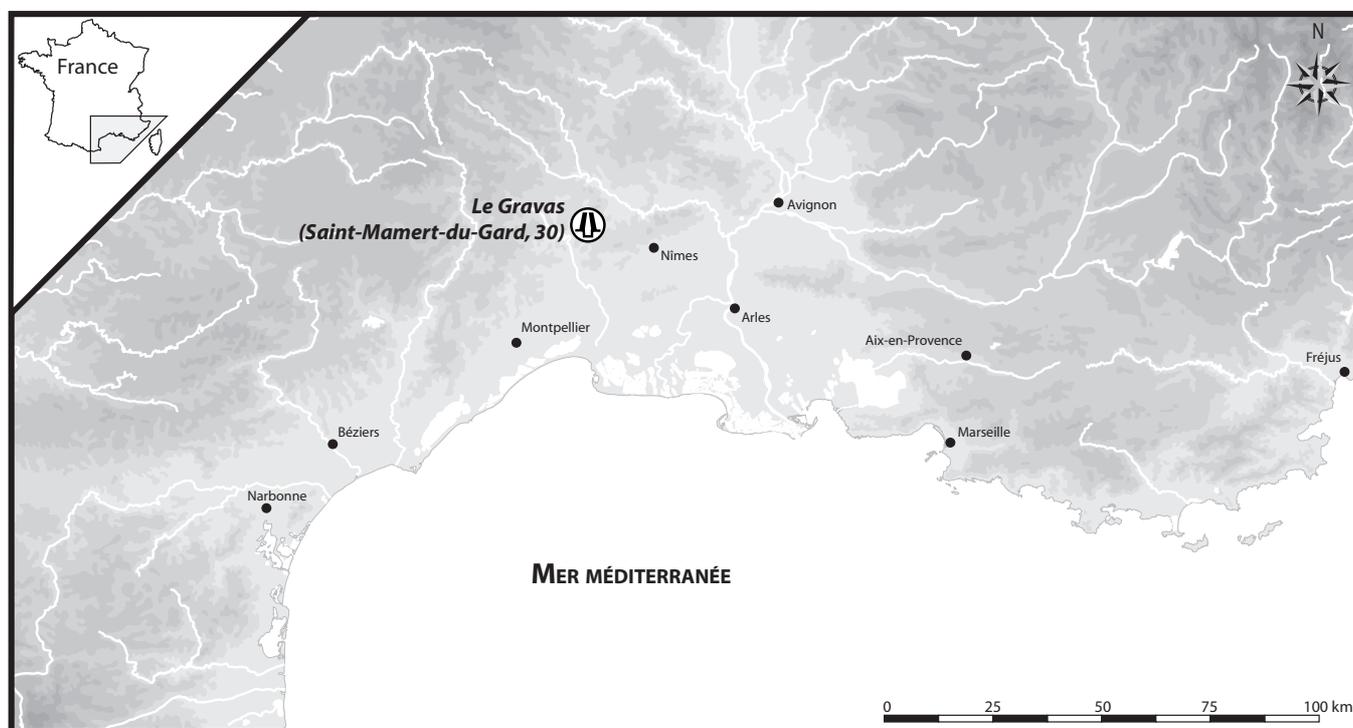


Fig. 19 : carte de localisation du site.

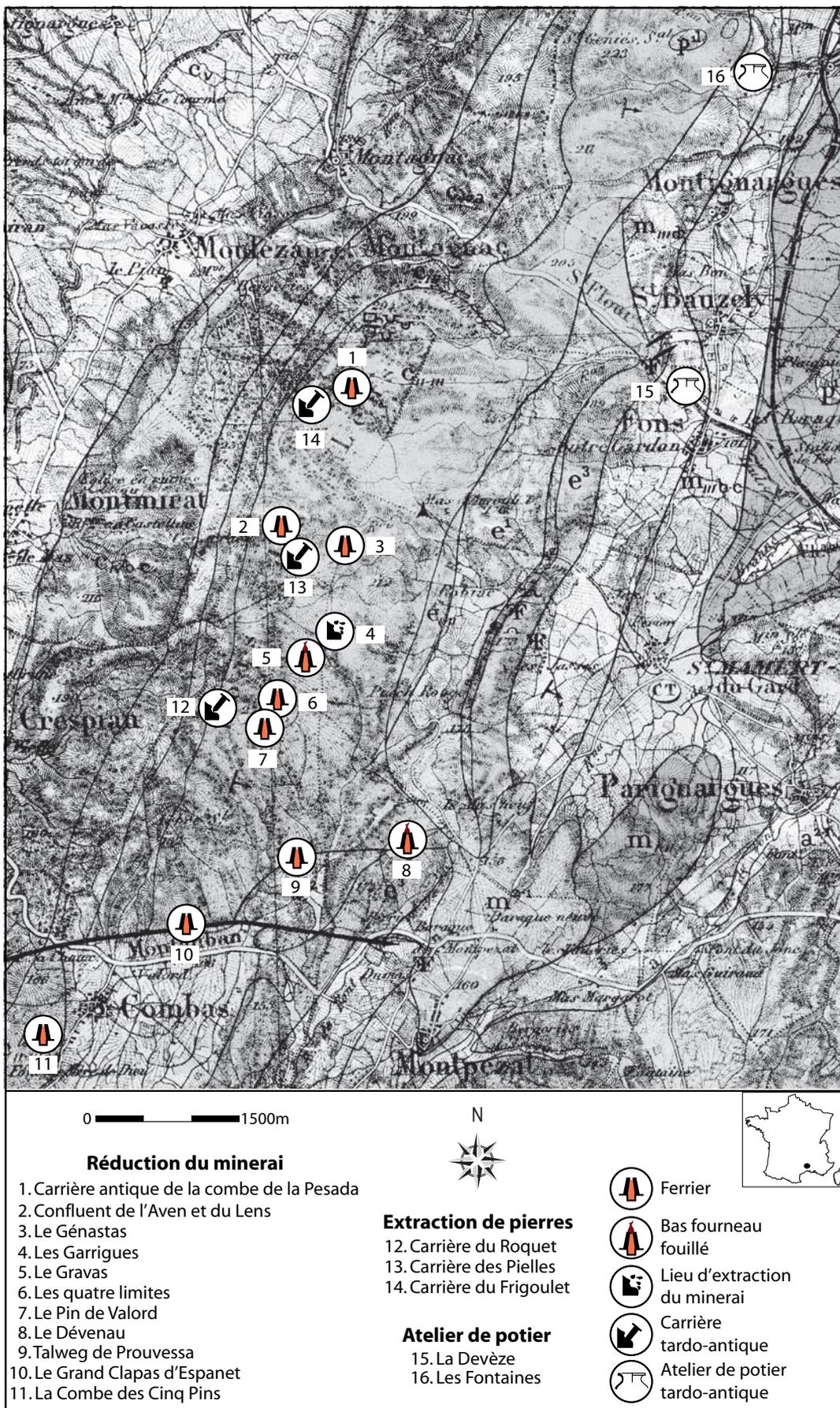


Fig. 20 : le site dans ses contextes géologique, sidérurgique et artisanal proches.

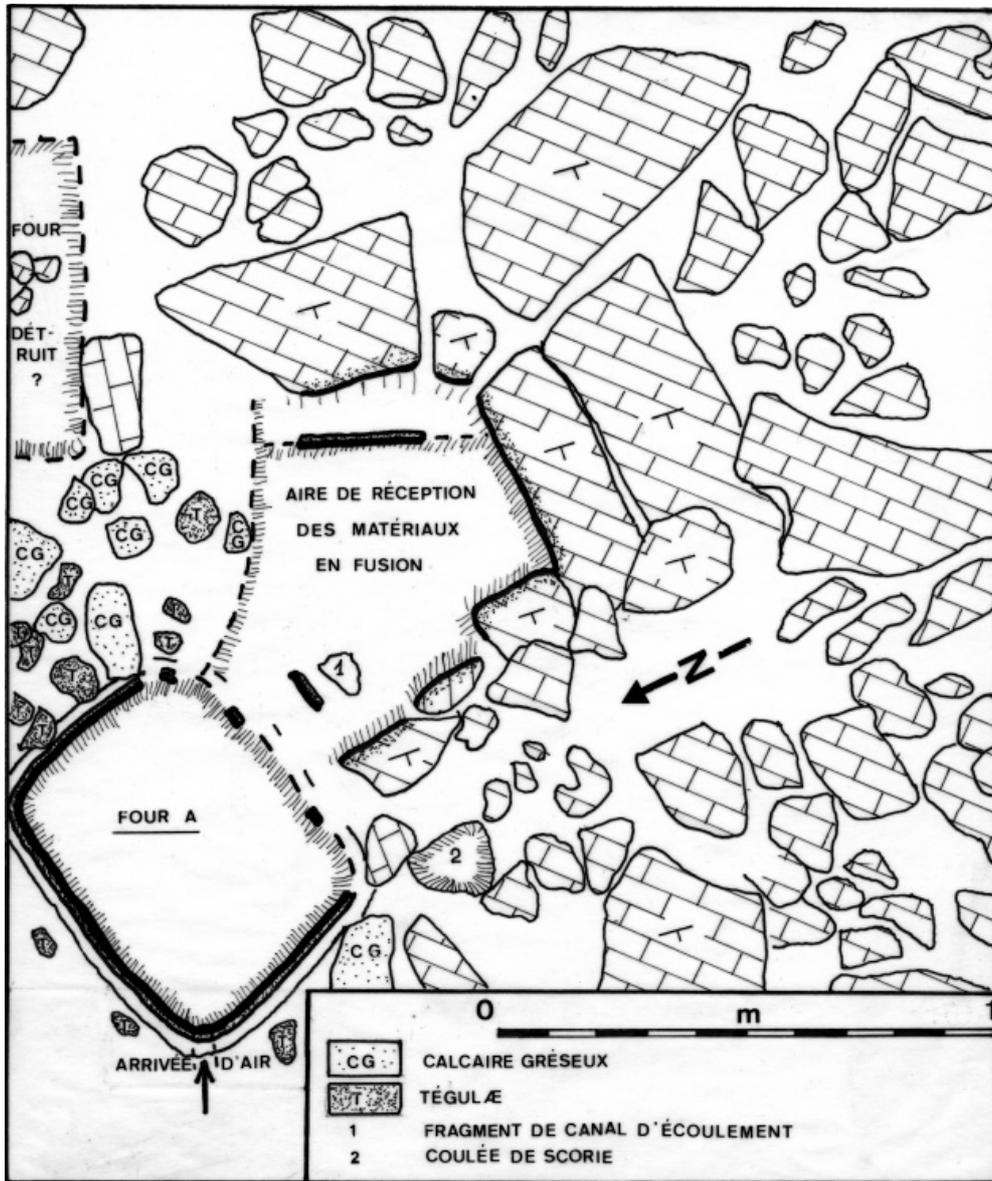


Fig. 21 : plan général de la fouille du bas fourneau des Dévenau (Montpezat, 30) (d'après J.-Cl. Bessac).



Fig. 22 : la fouille du bas fourneau des Dévenau vue du sud et du nord (Montpezat, 30) (d'après J.-Cl. Bessac).

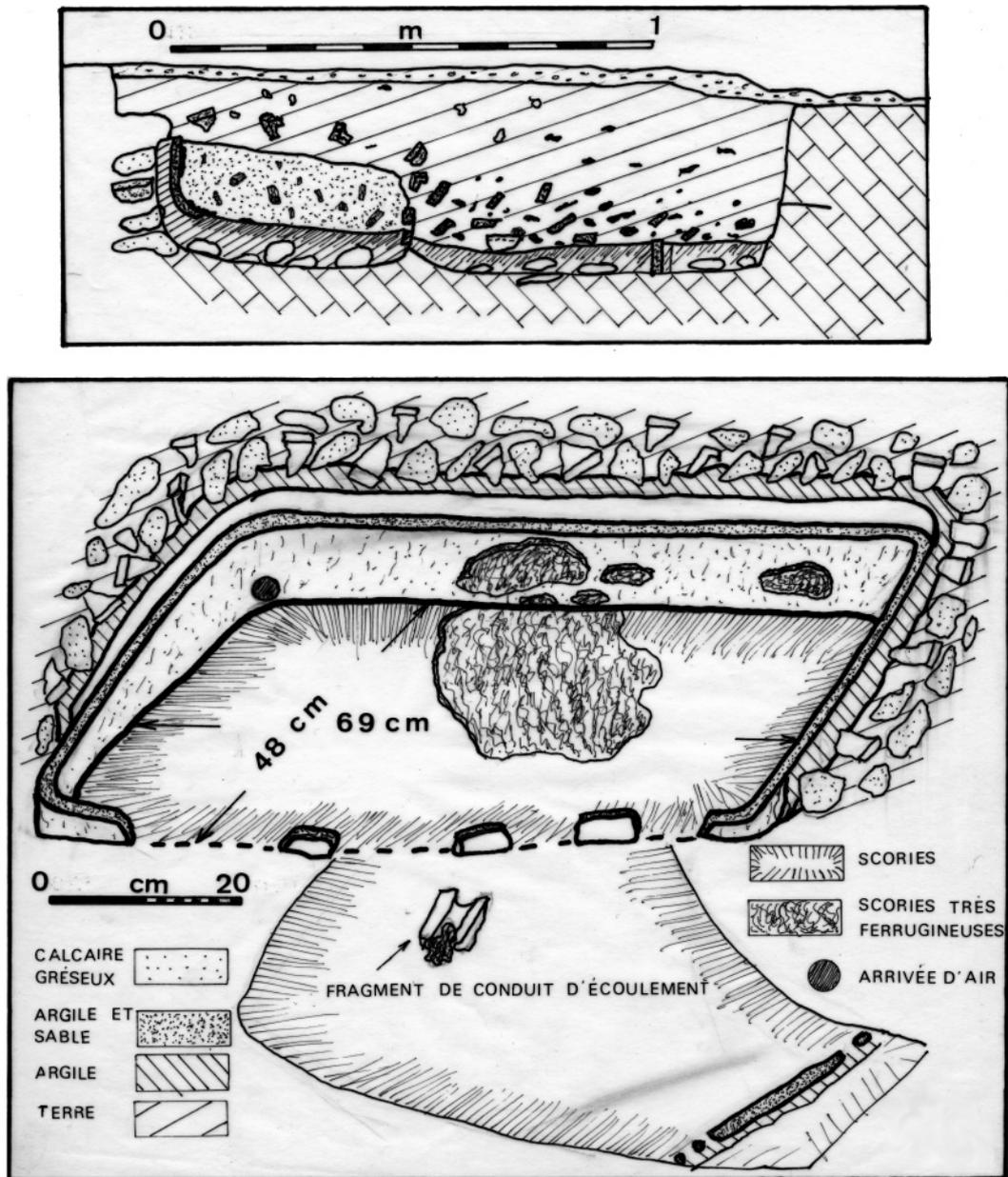


Fig. 23 : plan détaillé et coupe de la fouille du bas fourneau des Dévenau (Montpezat, 30) (d'après J.-Cl. Bessac).

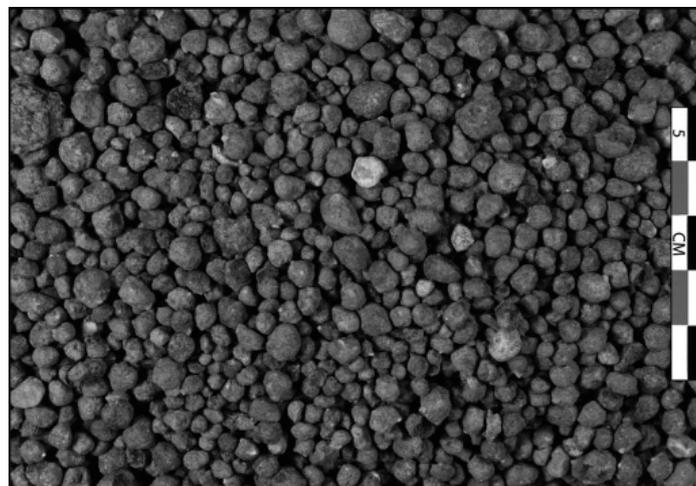


Fig. 24 : le minerai de fer pisolitique du Bois des Lens (30).

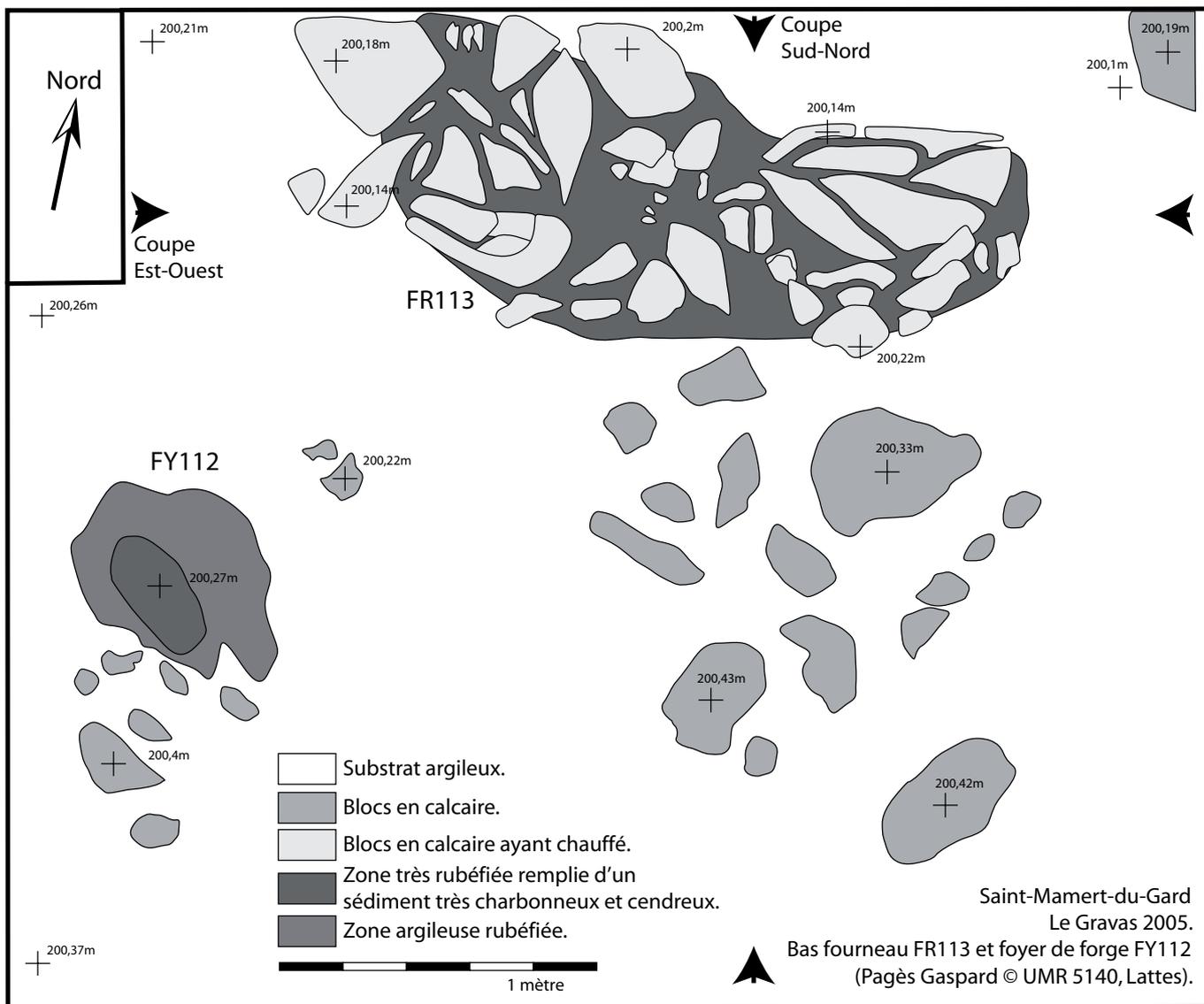
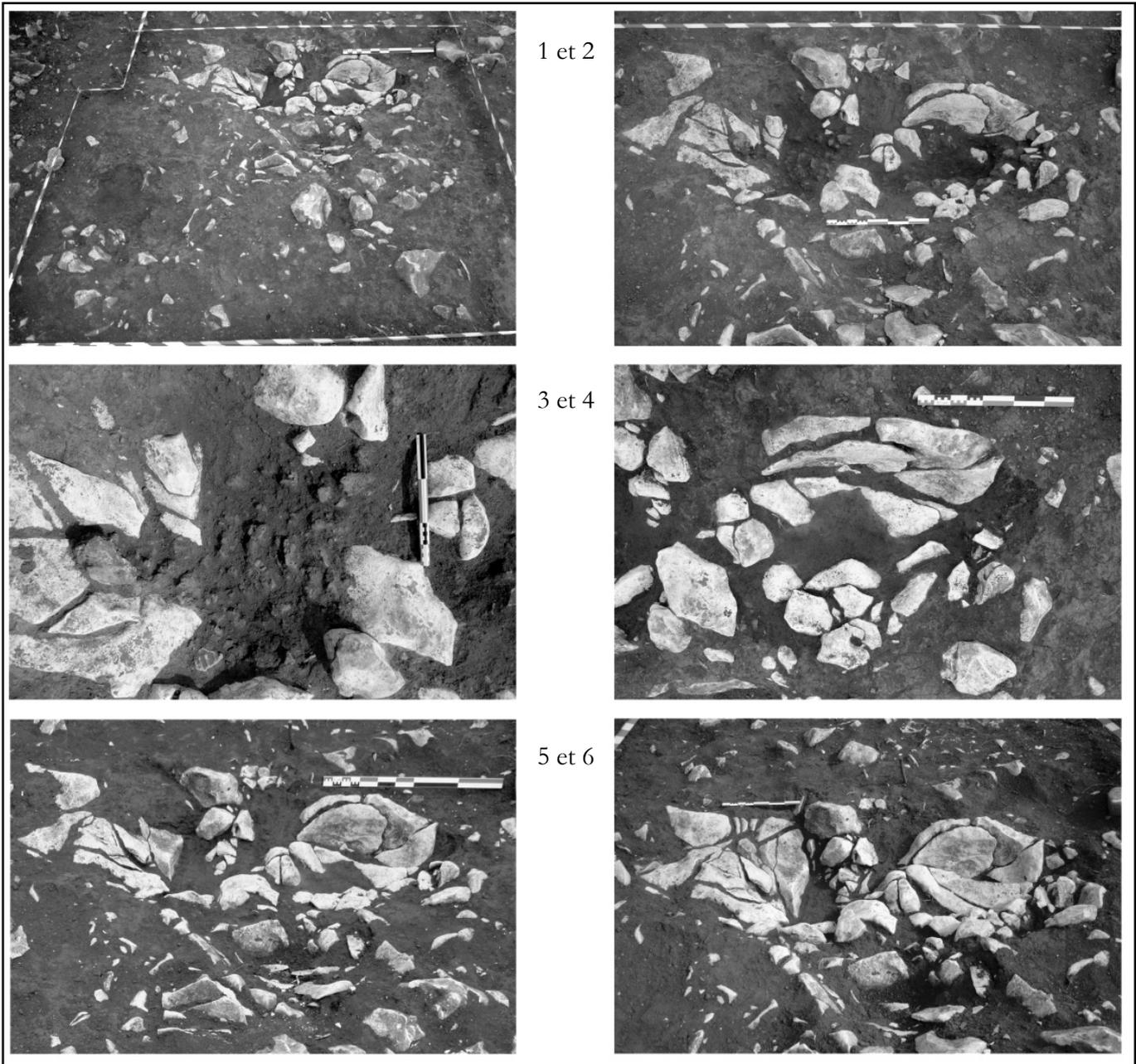


Fig. 25 : plan général de la fouille.



1 et 2

3 et 4

5 et 6

1 : vue du sud de l'ensemble du sondage avec, au nord, le bas fourneau FR113 et, au sud-ouest, le foyer de forge d'épuration FY112.

2 : vue du sud du bas fourneau au niveau des US107 et US108.

3 : vue du sud de la moitié occidentale du bas fourneau FR113, là où se sont écoulées les scories retrouvées en position primaire (US108).

4 : vue du sud de la moitié orientale du bas fourneau FR113 qui correspond au fond de la cuve.

5 et 6 : vues du sud du bas fourneau FR113 en fin de dégagement.

Fig. 27 : le bas fourneau FR113 et la fouille.

Aménagements	Décapage général								Bas fourneau FR113						Total								
									abandon		cuve			fosse d'écoulement									
US	101 sud		101 nord		102		sous total		104		105		107		108		109		sous total				
Types	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)			
Paroi	informe	74	3100	56	2800	88	1200	218	7100	328	6160	46	646	63	2220	57	840	8	320	502	10186	720	17286
	avec tuyère			2	360	1	50	3	410	4	780					1	20			5	800	8	1210
Fragment de	tegulae	81	6500	12	200	68	800	161	7500	16	450	10	50	3	110	1	80			30	690	191	8190
	grès	10	4100			2	200	12	4300													12	4300
	quartz	1	80					1	80													1	80
Total	166	13780	70	3360	159	2250	395	19390	348	7390	56	696	66	2330	59	940	8	320	537	11676	932	31066	

Fig. 28 : répartition spatiale, en nombre et en masse, des types de mobiliers de construction.

Aménagements	Décapage général								Forge FY112	Bas fourneau FR113						Total										
										abandon		cuve			fosse d'écoulement											
US	101 sud		101 nord		102		sous total		103	104		105		107		106		108		109		sous total				
Types	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)			
Scories	en culot	2	1736					2	1736														2	1736		
	coulées denses	950	40300	3277	130200	3452	113480	7679	283980		1186	28920	66	1210	33	970	8	160	196	4410	3	140	1492	35810	9171	319790
	très magnétiques	1	410	6	1670	8	2330	15	4410		4	120	2	50					2	40			8	210	23	4620
	de petites dimensions (tamisage)									1650		14135		2157		960		1131		1885				20269	21919	
Petits fragments métalliques (tamisage)	pas de prélèvement								244		4068		786		324		289		404				5870	6114		
Total	953	42446	3283	131870	3460	115810	7696	290126	1895	1190	47243	68	4203	33	2253	8	1580	198	6740	3	140	1500	62158	9196	354179	

Fig. 29 : répartition spatiale, en nombre et en masse, des types de mobiliers sidérurgiques.

N°	L x l x e (mm)	M (g)	Identifications	Synthèse des observations métallographiques	Interprétations
108.1	140 x 110 x 70	738	scorie écoulee non magnétique	Morphologie identique aux échantillons 18.1 à 18.6 des Espérelles (Martigues, 13).	Scorie de réduction écoulee proche d'un laitier.
101S.1	120 x 110 x 60	886	fond de four	Matrice fayalitique avec des dendrites et des globules de wustite comprenant aucune battiture mais quelques fragments et filaments ferritiques, en partie supérieure, réoxydés.	Scorie de réduction dont la formation s'est réalisée à proximité de la loupe.
101S.2	130 x 95 x 58	830			
102.1	122 x 100 x 65	1308	agglomération métallique	Matrice fayalitique où se développent des globules de wustite et de très nombreux filaments et billes de métal autour de puits de diffusion gazeux (porosités). Ceux-ci ont une forme écrasée croissante d'une extrémité à une autre.	Métal en cours d'agglomération encore largement scorifié qui a été martelé.
102.2	95 x 47 x 25	134		Fonte blanche, localement grise, très légèrement décarburée en périphérie, dont les inclusions sont écrasées.	Fragment de fonte martelé.

Fig. 30 : bilan répertorié des analyses métallographiques.

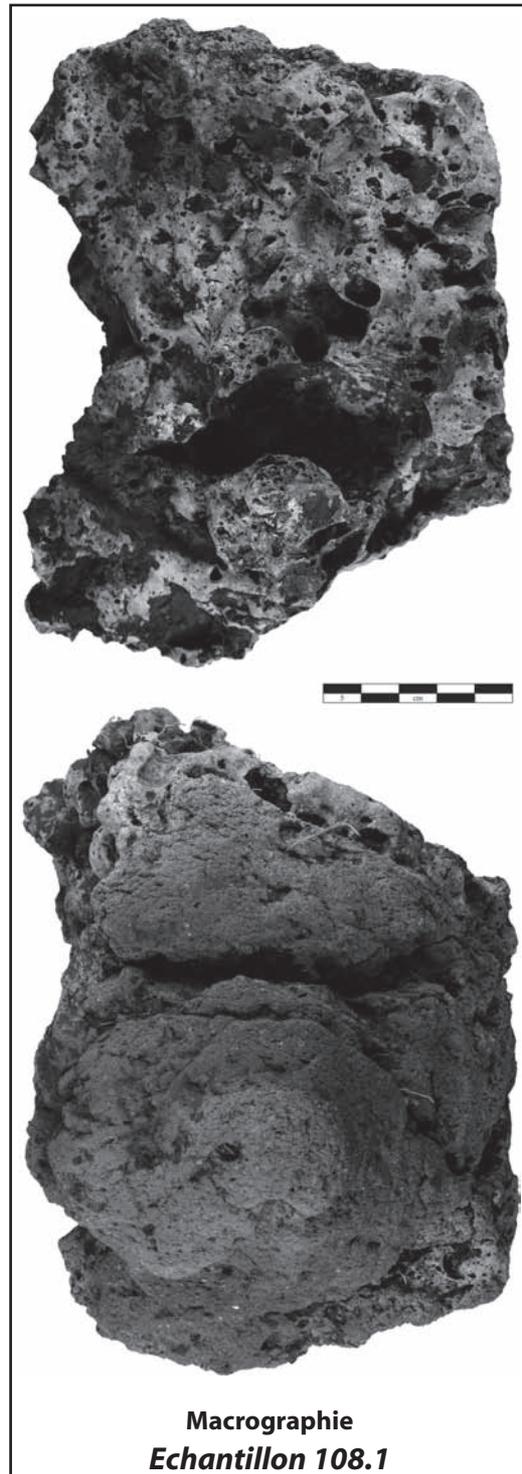
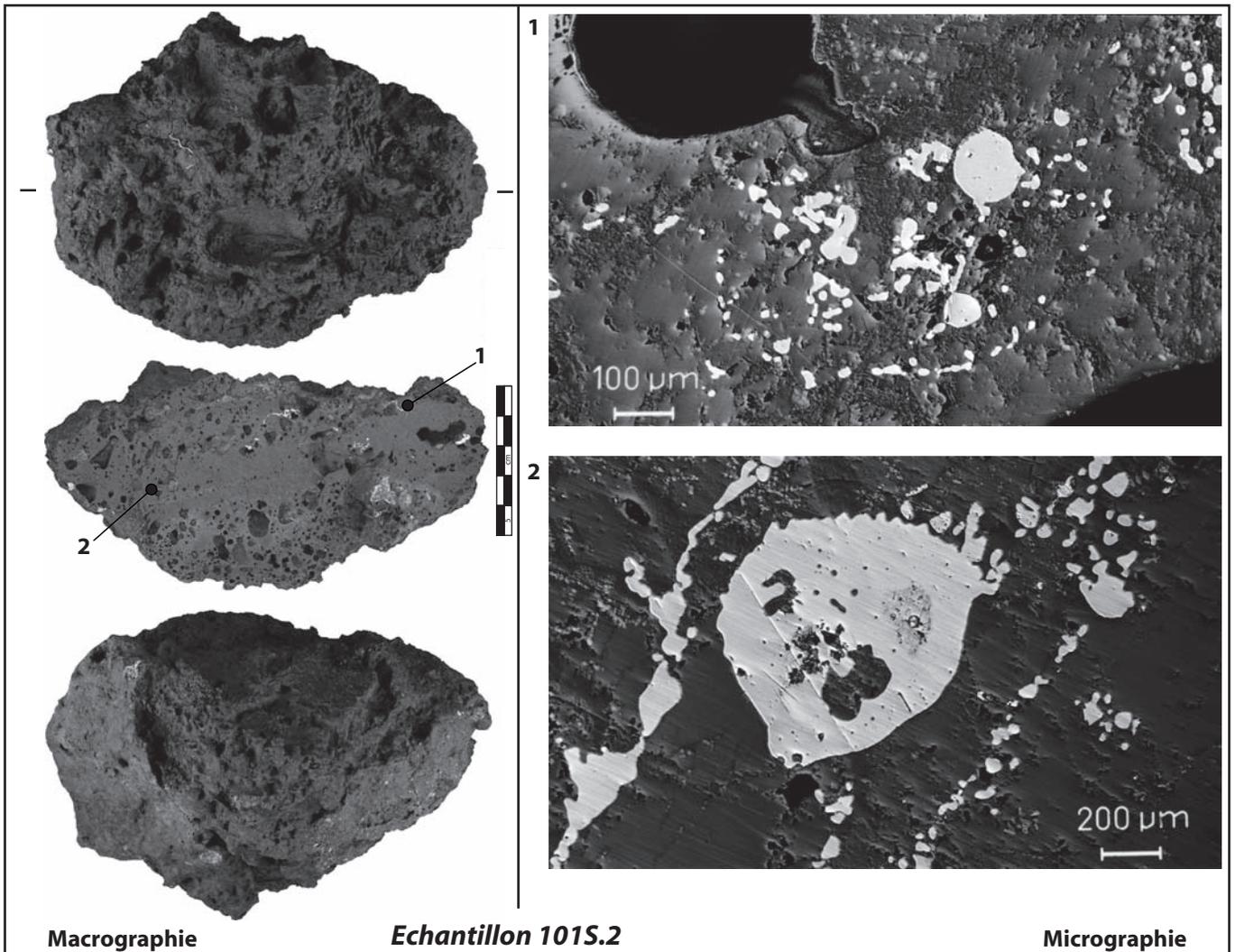


Fig. 31 : l'échantillon 108.1
(macrographie).



1 : semis de billes métalliques non réoxydées dans une matrice fayalitique sans wustite.

2 : billes et filaments métalliques non réoxydés dans une matrice fayalitique sans wustite.

Fig. 32 : observations métallographiques de la scorie de fond de four 101S.2.

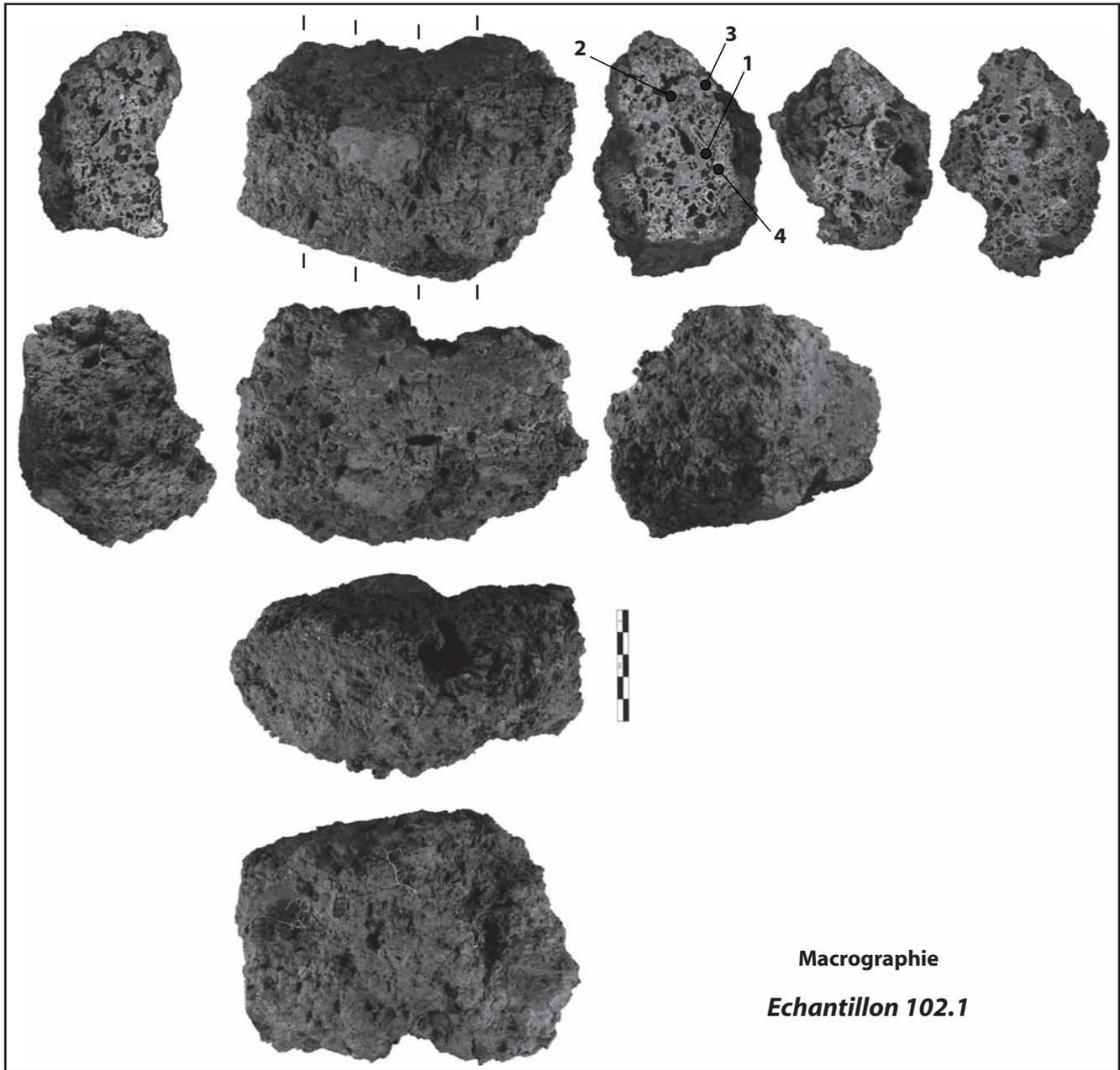
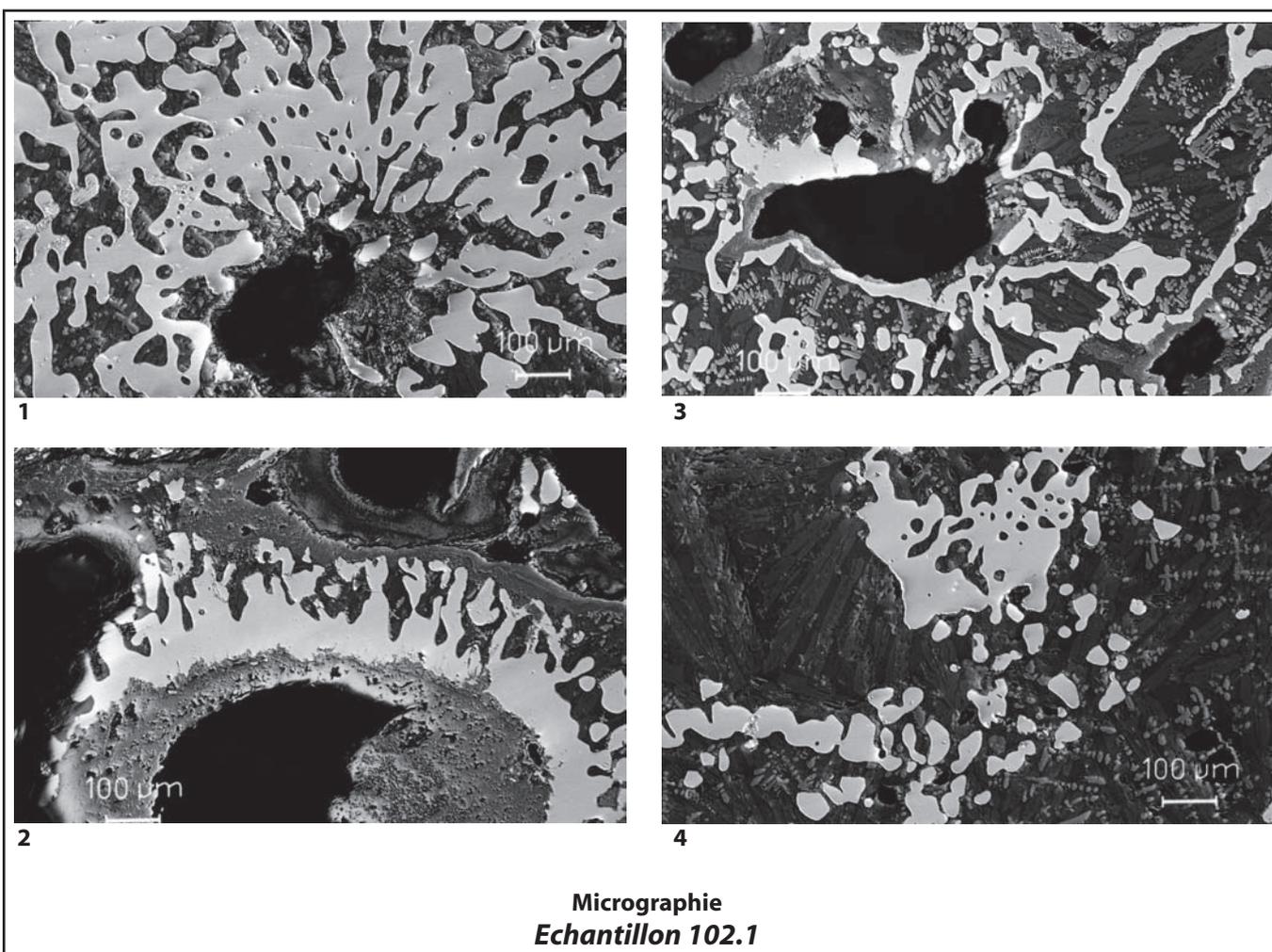
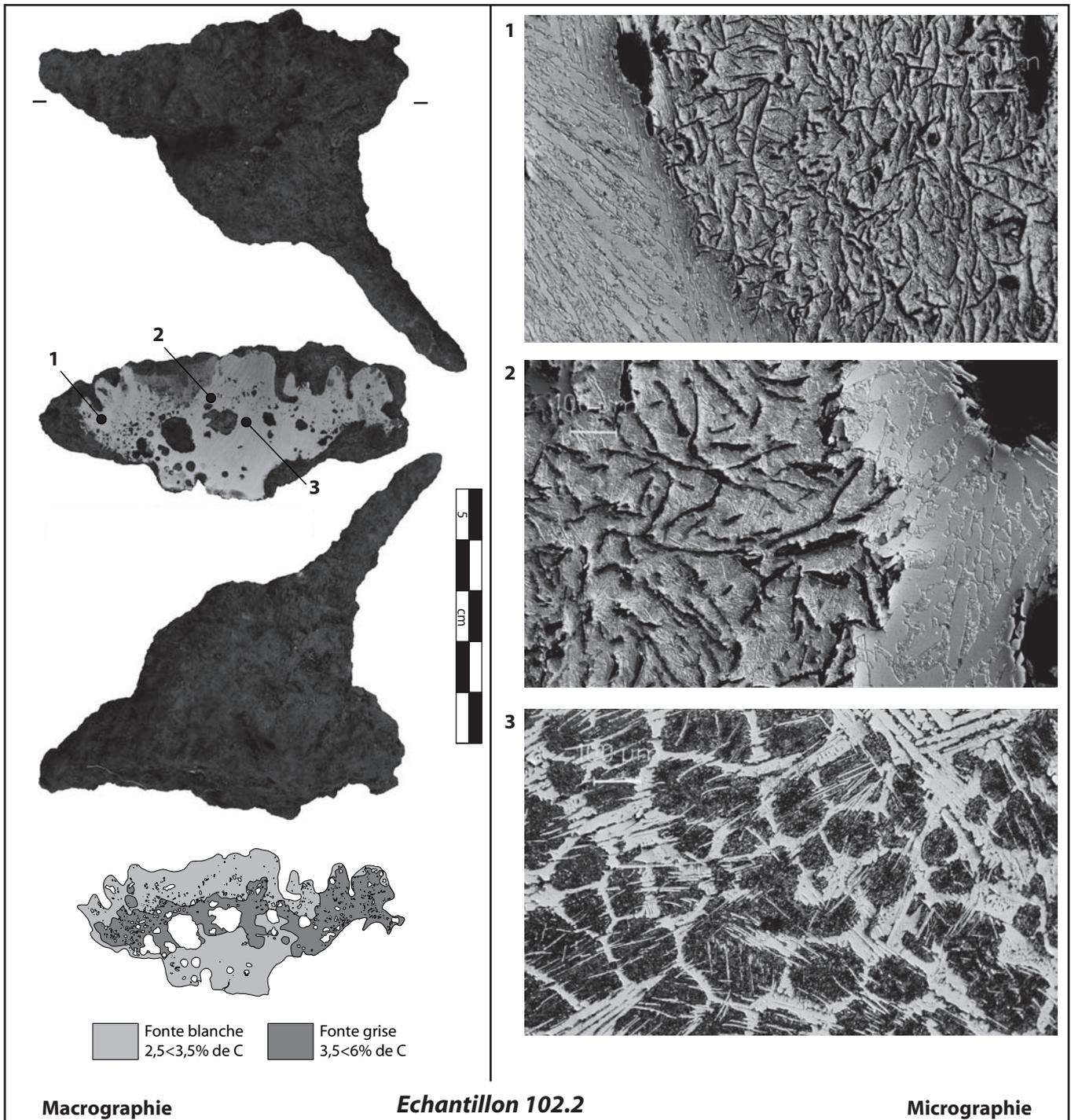


Fig. 33/1 : observations métallographiques de l'agglomération métallique 102.1 (macrographie).



*1 et 2 : filaments métalliques non réoxydés disposés de manière concentrique autour d'une porosité.
3 et 4 : filaments métalliques non réoxydés dans une matrice fayalitique.*

Fig. 33/2 : observations métallographiques de l'agglomération métallique 102.1 (micrographie).



1 et 2 : transition entre une fonte blanche et une fonte grise (lédeburite).

3 : fonte grise (lédeburite).

Fig. 34 : observations métallographiques de l'agglomération métallique 102.2.

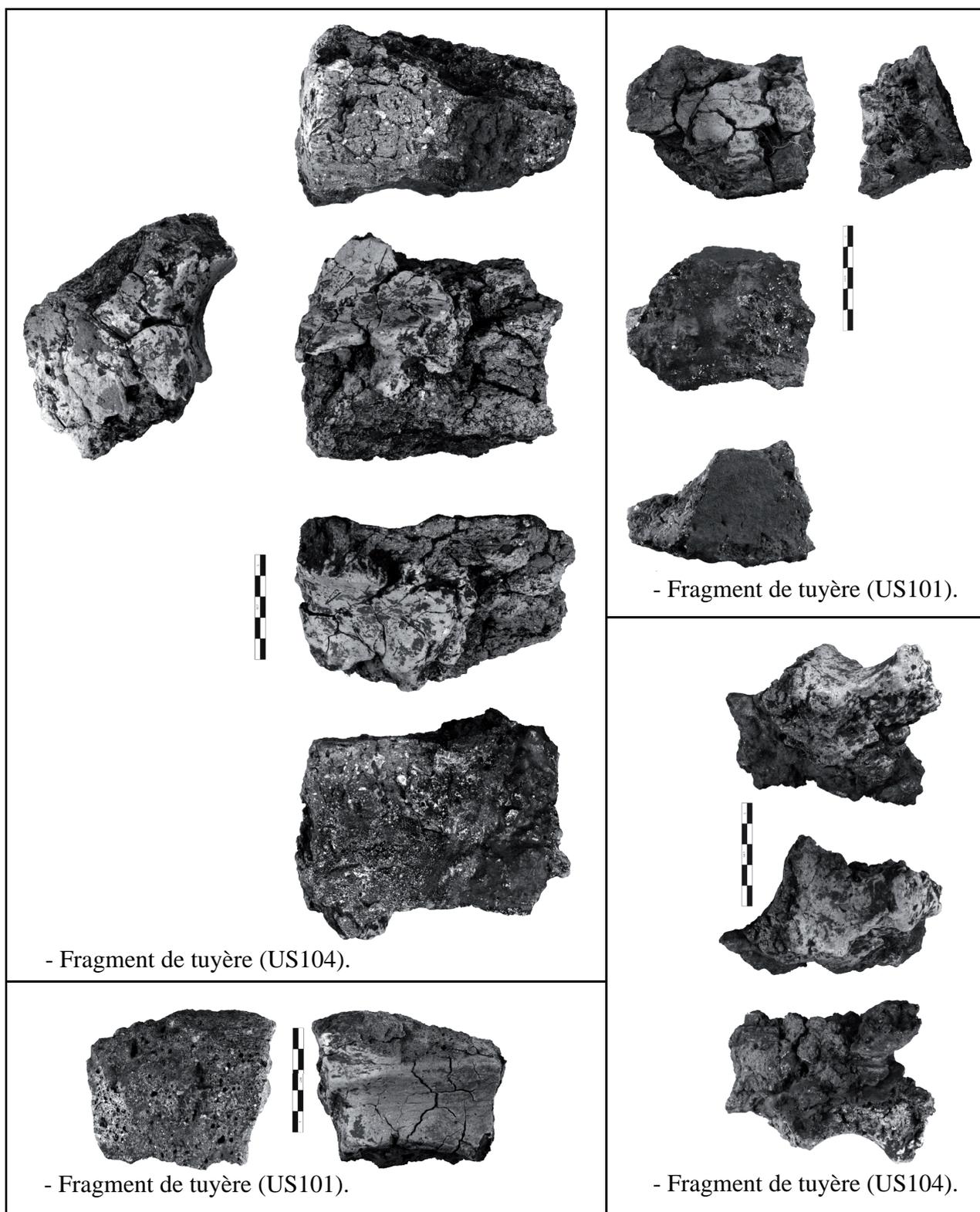


Fig. 35 : les fragments de tuyères du site.

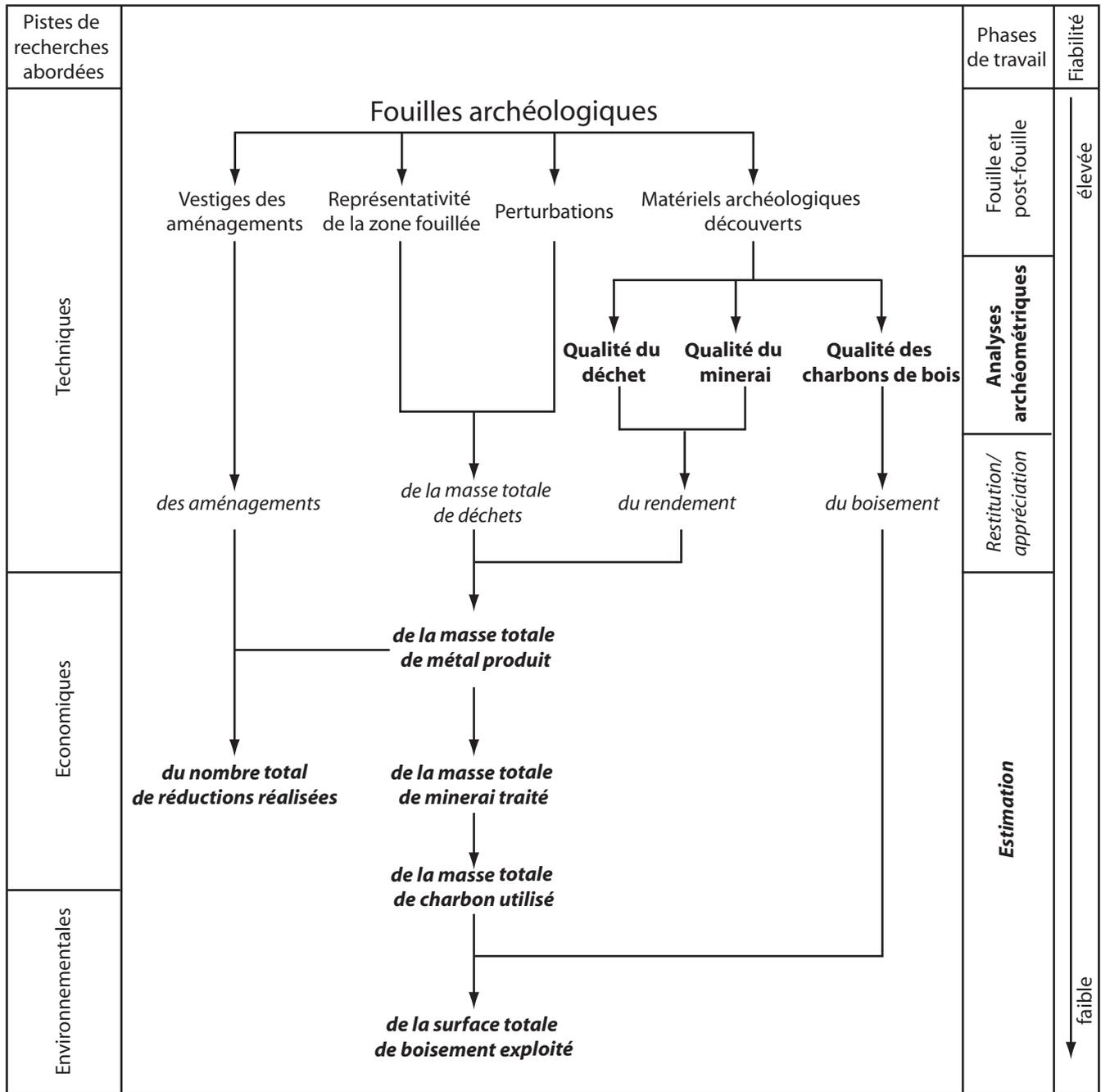


Fig. 36 : diagramme des estimations sidérurgiques.

PARTIE II : LE TRAVAIL DU FER

CHAPITRE 1 : DANS LES HABITATS GROUPÉS

1. L'ÎLOT 6 D'OLBIA (HYÈRES, 83) AU DÉBUT DE LA PÉRIODE ROMAINE

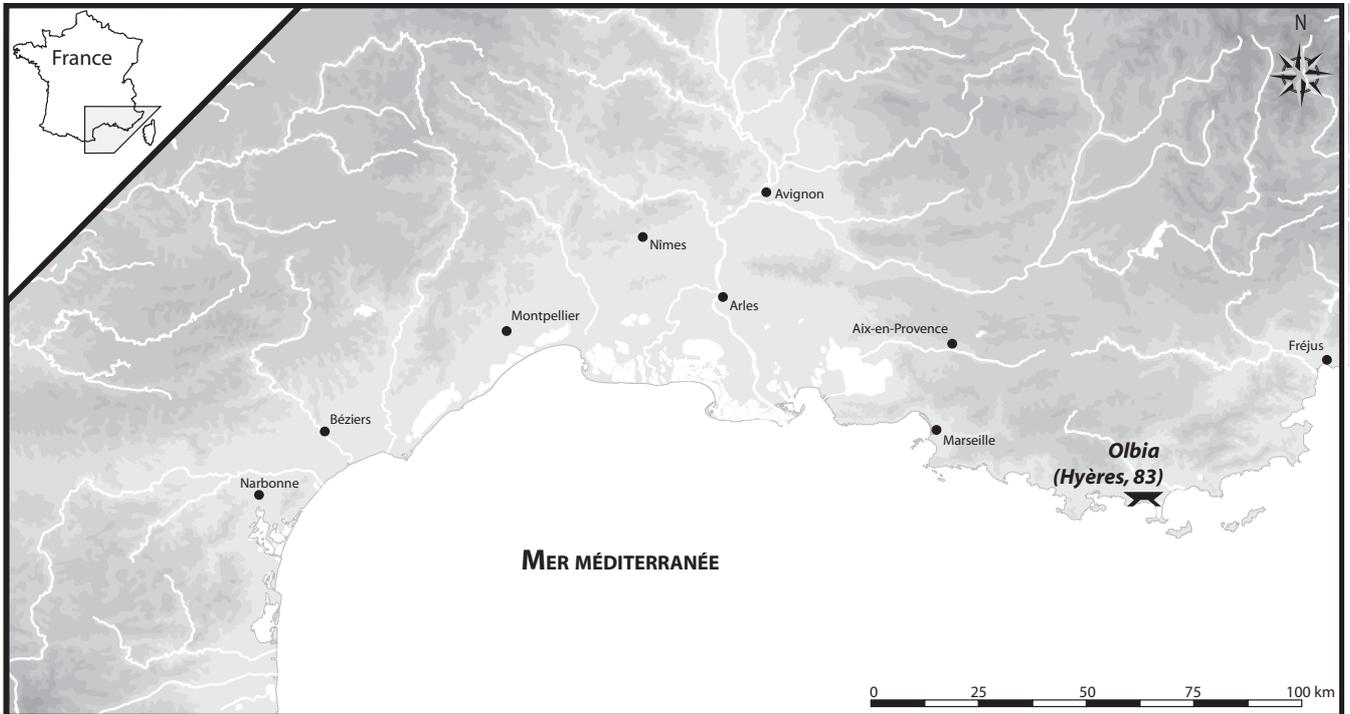


Fig. 37 : carte de localisation du site.

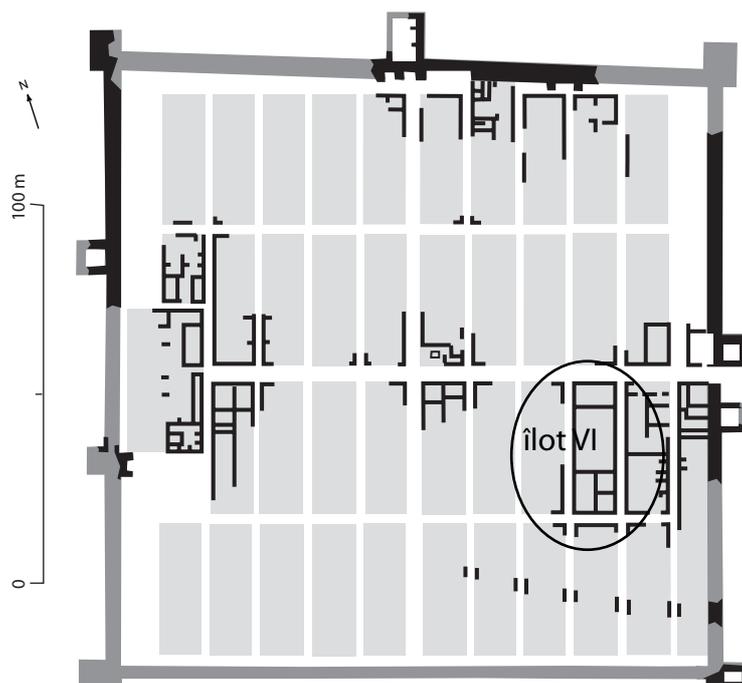


Fig. 38 : plan général du site et localisation de l'îlot 6 (d'après M. Bats).

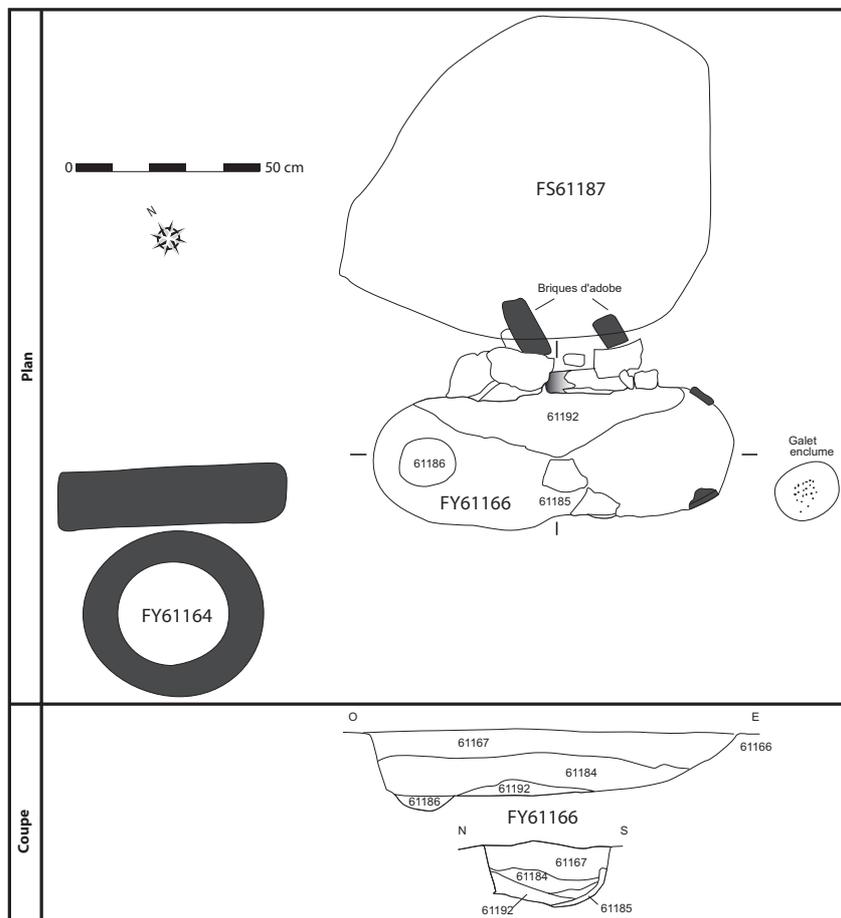


Fig. 42 : plan et coupe de l'atelier de forge romain (d'après M. Bats).



Fig. 43 : l'atelier de forge romain vu de l'ouest (d'après M. Bats).



Fig. 44 : l'enclume en galet de l'atelier de forge romain (US 61200).



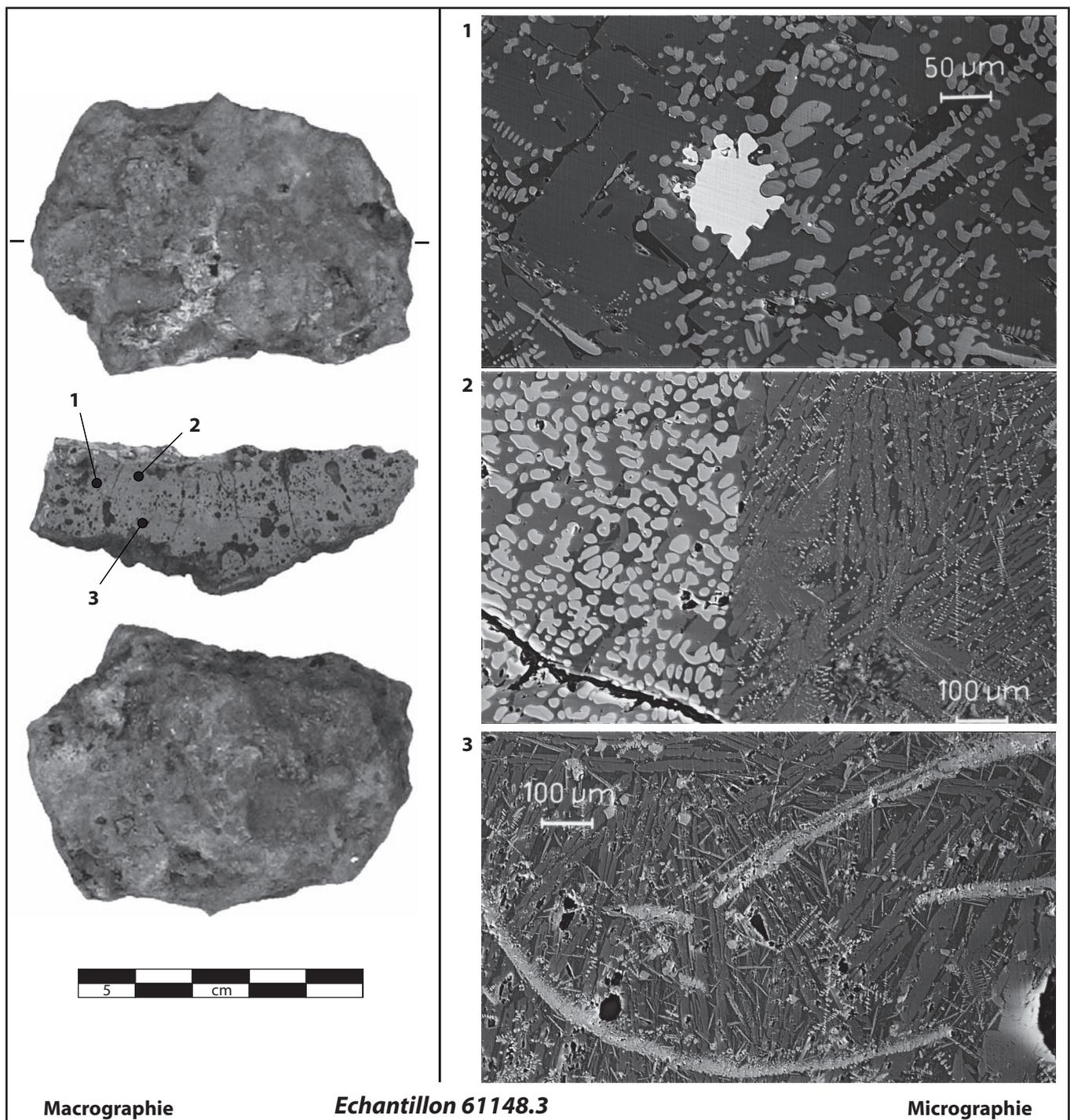
Fig. 45 : les battitures de l'atelier de forge romain (US 61192).

Secteurs		7B											7C		7D		7E		Total	
Aménagements	foyer circulaire FY61164	foyer oblong FY61166				autre				sous total	7C	7D	7E	Total						
		comb-lement	épan-dage	FS61187 soufflet au N	sous total	épan-dages localisés	dépotoir au S/W													
US	61165	61167 61186 61192	61168	61172	sous total	61155 61189	61148	sous total	61138	61143	61154									
Types	nbre : m (g)	nbre : m (g)	nbre : m (g)	nbre : m (g)	nbre : m (g)	nbre : m (g)	nbre : m (g)	nbre : m (g)	nbre : m (g)	nbre : m (g)	nbre : m (g)	nbre : m (g)	nbre : m (g)							
Scorie	en culot		6 870			6 870		9 910	15 1780	1 180			16 1960							
	informe peu dense	30 90	48 1200	23 100	89 2500	190 3890	57 340	58 530	305 4760		5 90	22 480	332 5330							
	paroi		1 10		7 100	8 110			8 110				8 110							
	battiture	130	1180	400	40	1750	5		1755				1755							
	sous total	30 220	55 3260	23 500	96 2640	204 6620	57 345	67 1440	328 8405	1 180	5 90	22 480	356 9155							
Objet en fer	tige									5 230		2 10	7 240							
	clou									1 10			1 10							
	plaque									1 10			1 10							
	ind.						5 80		5 80		5 70		10 150							
	sous total						5 80		5 80	7 250	5 70	2 10	19 410							
Total	30 220	55 3260	23 500	96 2640	204 6620	62 425	67 1440	333 8485	8 430	10 160	24 490	375 9565								

Fig. 46 : répartition, en nombre et en masse, des types de mobiliers métallurgiques dans l'atelier de forge romain.

N°	L x l x e (mm)	M (g)	Identifications	Synthèse des observations métallographiques	Interprétations
61148.1	100 x 70 x 26	180	<i>culot</i>	Matrice fayalitique homogène avec des globules de wustite et un semis épars de battitures principalement lamellaires, mais aussi globulaires et en bille. Les pertes métalliques sont rares, sous la forme de billes et parfois réoxydées à chaud.	Cycle homogène et long, réalisé à moyenne température et engendrant peu de pertes en métal et quelques pertes en oxyde. Cas typique de chauffe dans le cadre de travaux de fabrication à partir d'un métal correctement épuré.
61148.3	63 x 43 x 24	104		Matrice fayalitique homogène avec des globules et des dendrites de wustite et un semis épars de battitures principalement lamellaires et globulaires. Les pertes métalliques sont rares et souvent non réoxydées à chaud.	
61167.1	97 x 75 x 24	230		Matrice fayalitique homogène avec des globules de wustite et un semis épars de battitures lamellaires, globulaires et en bille. Les pertes métalliques sont rares et parfois non réoxydées à chaud.	
61167.2	79 x 78 x 31	178		Matrice fayalitique hétérogène avec beaucoup de globules de wustite et un semis épars de battitures globulaires et en bille. De rares fragments métalliques sont réoxydés à chaud.	

Fig. 47 : bilan répertorié des analyses métallographiques.



Macrographie

Echantillon 61148.3

Micrographie

1 : bille de métal éclatée non réoxydée dans une matrice fayalitique à pavés où se développent des dendrites de wustite.

2 : limite entre une très grosse battiture globulaire essentiellement constituée de globules de wustite et le bain fayalitique à lattes où se développent de très fines dendrites de wustite.

3 : battitures lamellaires très fines dans le bain fayalitique à lattes.

Fig. 48 : observations métallographiques du culot de forge 61148.3.

2. LUNEL-VIEL (34) AU MILIEU DU II^E SIÈCLE

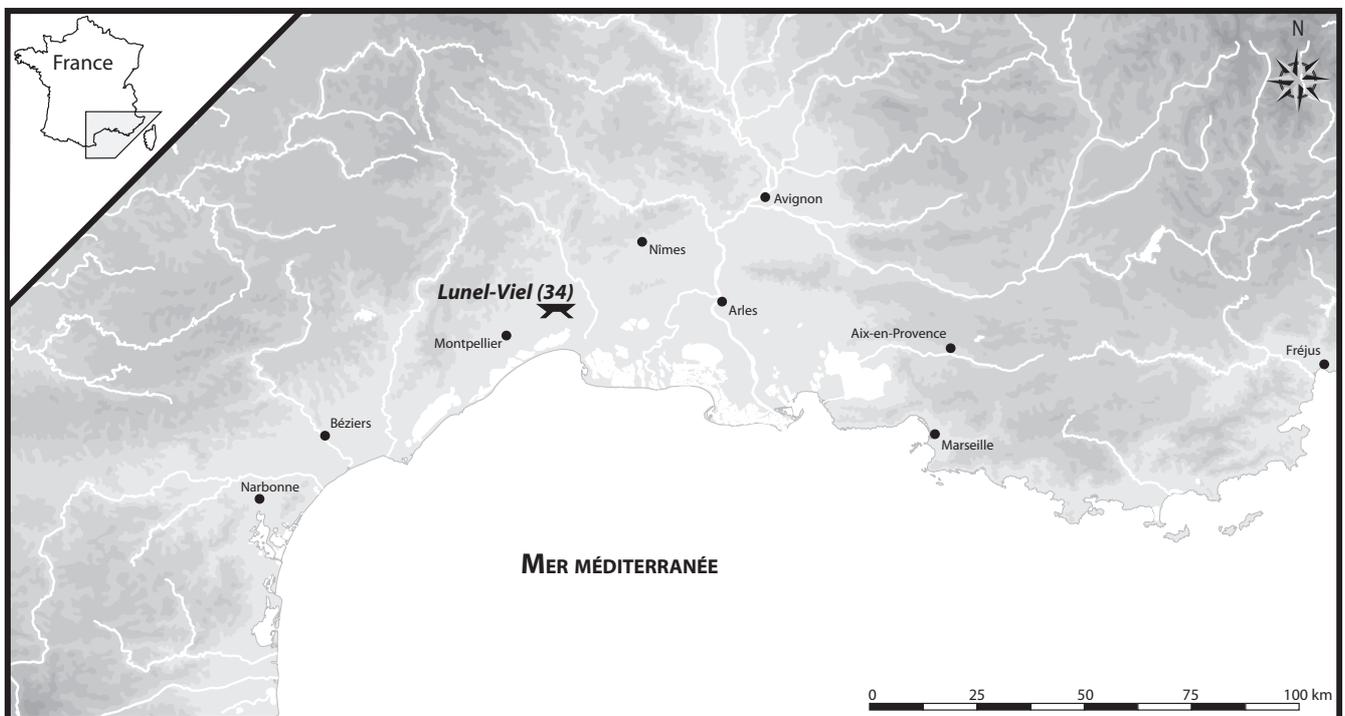


Fig. 49 : carte de localisation du site.

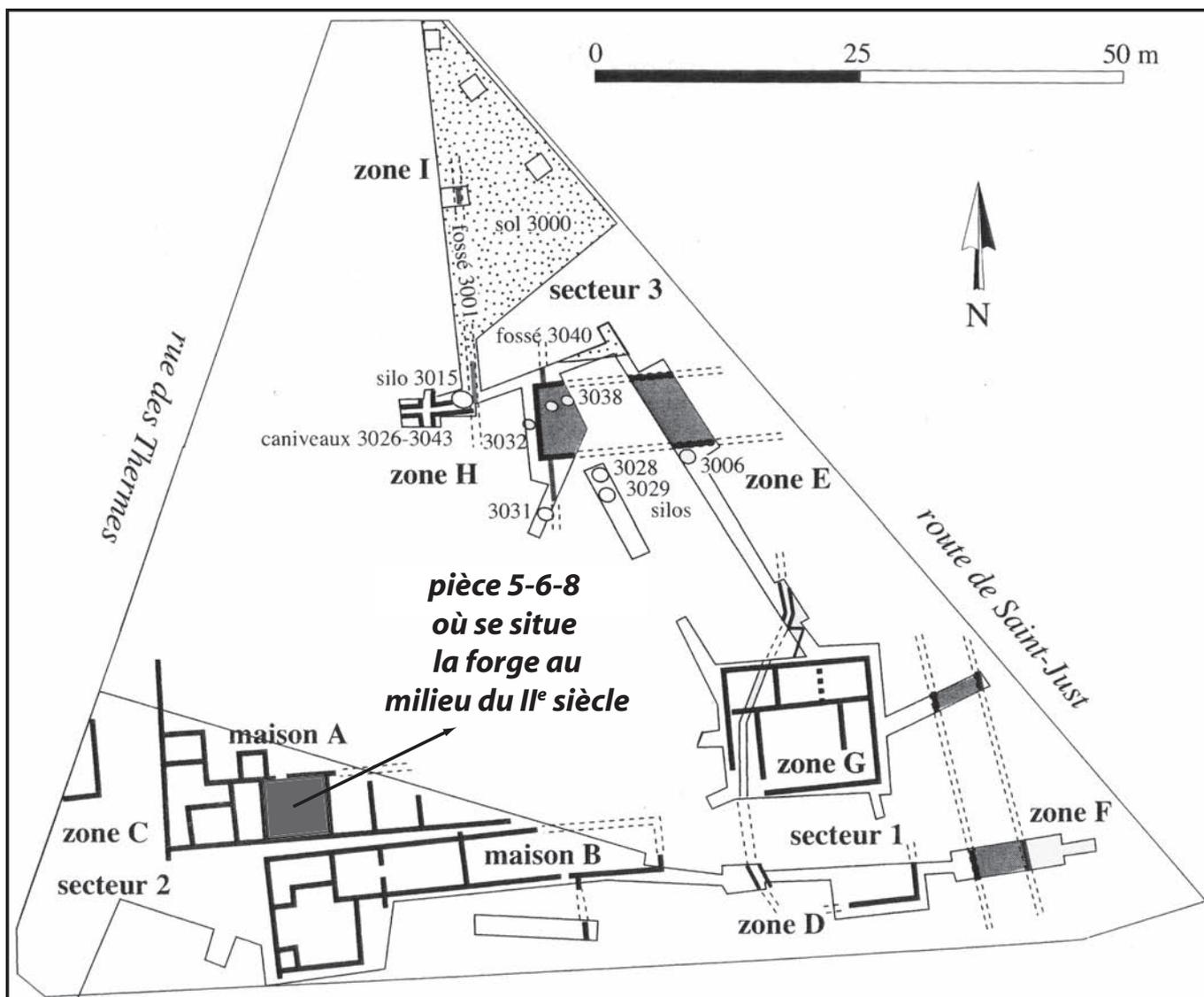


Fig. 50 : plan général du quartier central et localisation de la pièce 5-6-8 dans la maison A (d'après C. Raynaud).

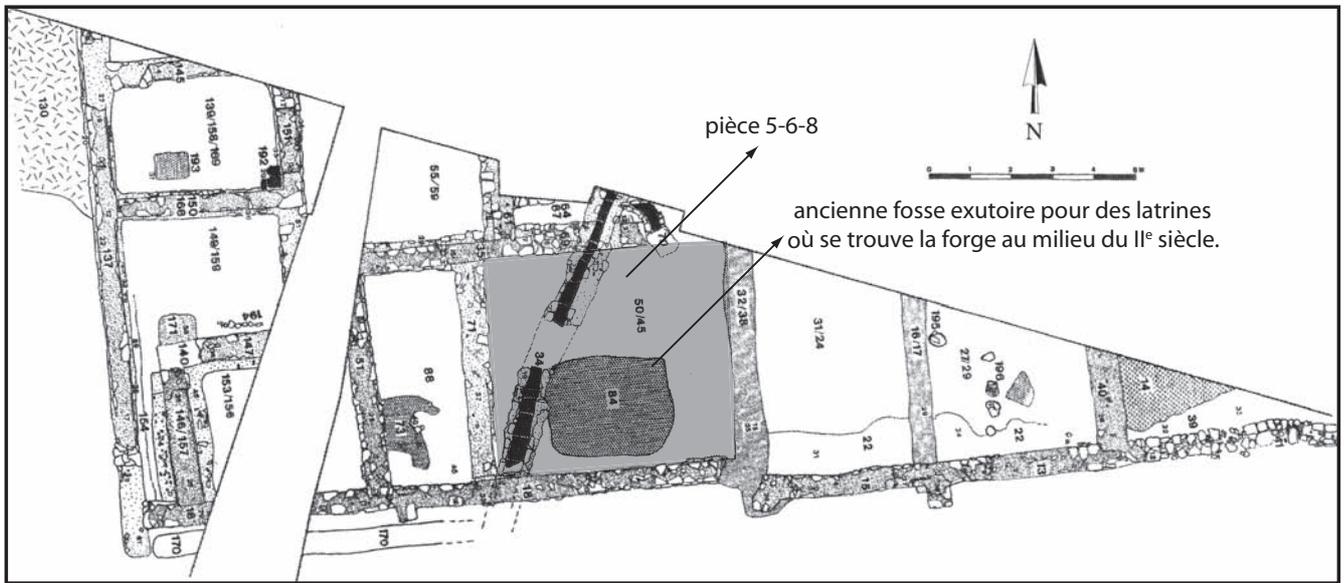


Fig. 51 : plan détaillé de la maison A (d'après C. Raynaud).

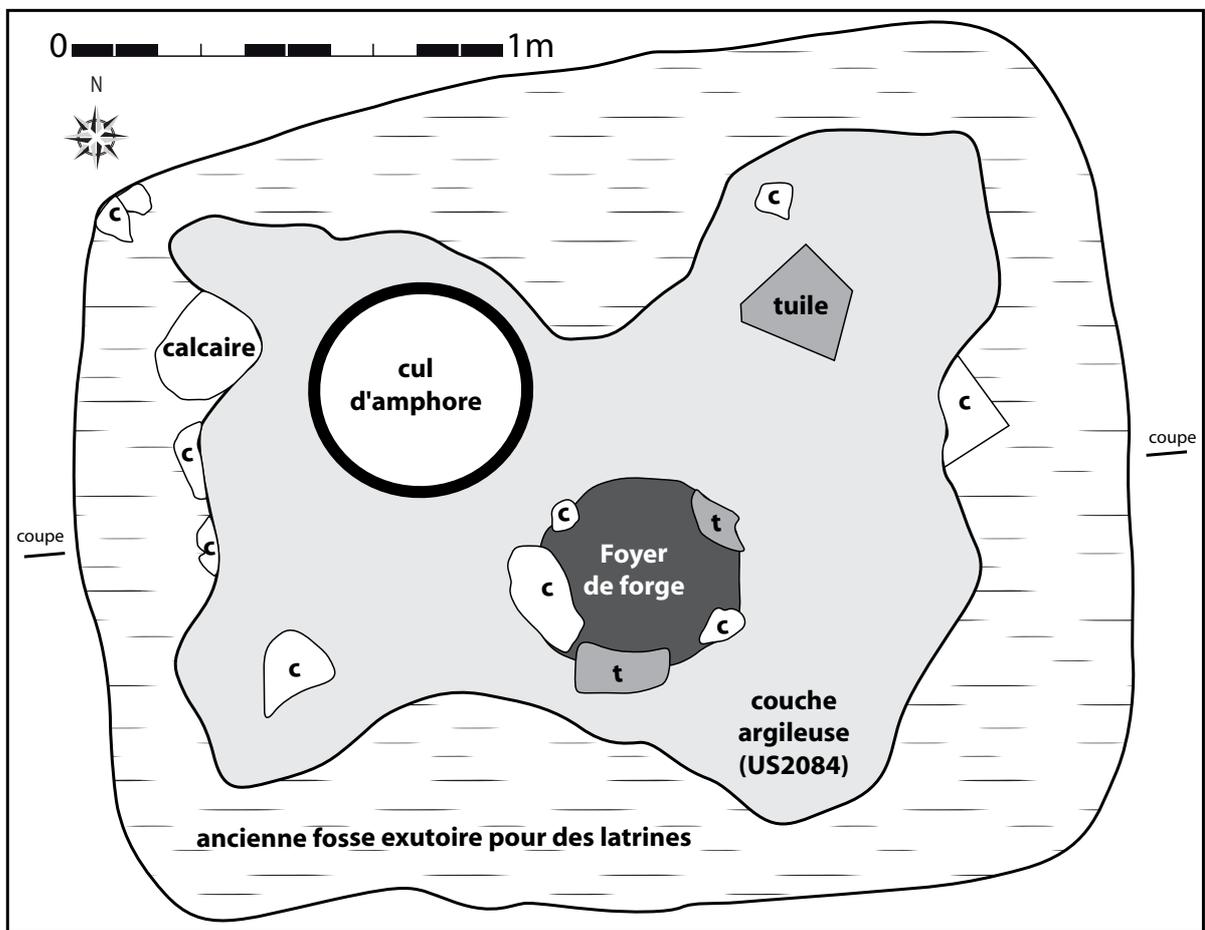


Fig. 52 : plan détaillé de l'atelier de forge (d'après C. Raynaud).

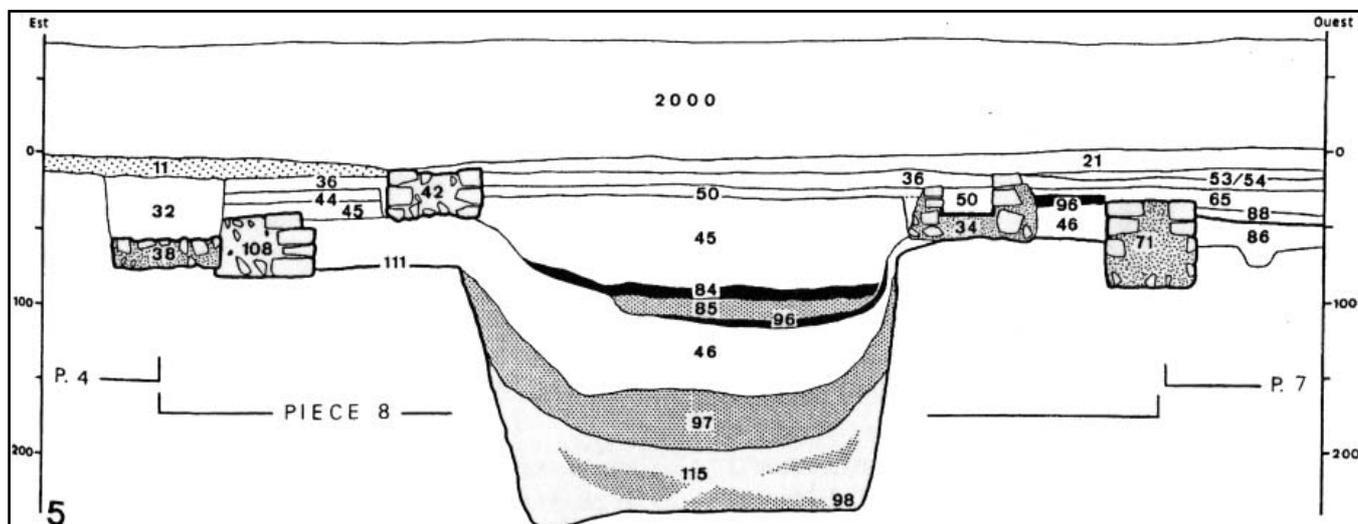


Fig. 53 : coupe de l'atelier de forge (d'après C. Raynaud).

Localisation		Pièce 5-6-8, maison A							
Datation		phase IIIb (milieu du IIe siècle)							
Etat		1er		2e		Total			
US		2085		2045					
Interprétation		occupation		occupation/ abandon					
Types		nbr	m (g)	nbr	m (g)	nbr	m(g)		
Alliages ferreux	scories	en culot		8	980	59	8200	67	9180
		informes moyennement denses		17	660	343	11800	360	12460
		coulées peu denses		9	235	331	5690	340	5925
		parois		3	100	67	1550	70	1650
		parois avec tuyère				5	240	5	240
		<i>sous total</i>		<i>37</i>	<i>1975</i>	<i>805</i>	<i>27480</i>	842	29455
	objets	demi-produits				2	770	2	770
		outils				4	670	4	670
		clous		15	270	9	180	24	450
		tiges		17	250	14	270	31	520
		plaques		18	420	41	1540	59	1960
		chutes		4	100	11	350	15	450
		chutes oxydées		380	100	227	2150	607	2250
	<i>sous total</i>		<i>434</i>	<i>1140</i>	<i>308</i>	<i>5930</i>	742	7070	
autres métaux	plomb				14	515	14	515	
	alliages cuivreux		4	75	4	40	8	115	
total		475	3190	1131	33965	1606	37155		

Fig. 54 : répartition, en nombre et en masse, des types de mobiliers métallurgiques dans l'atelier de forge.

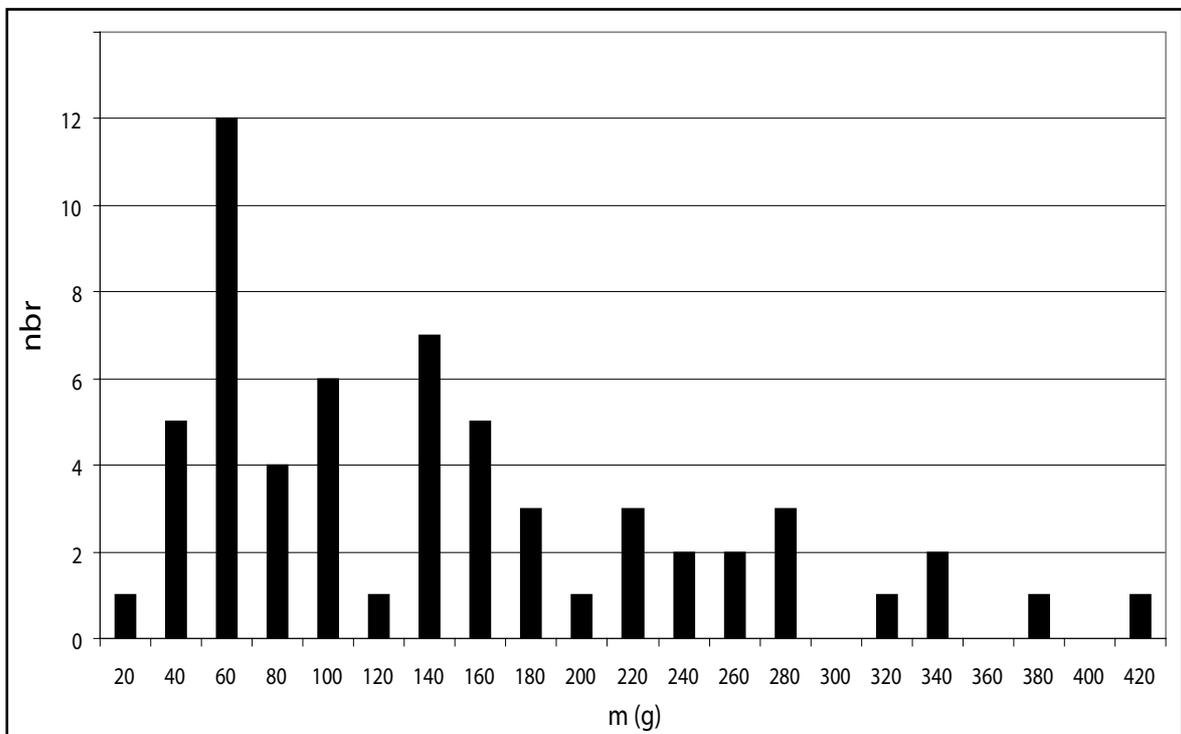
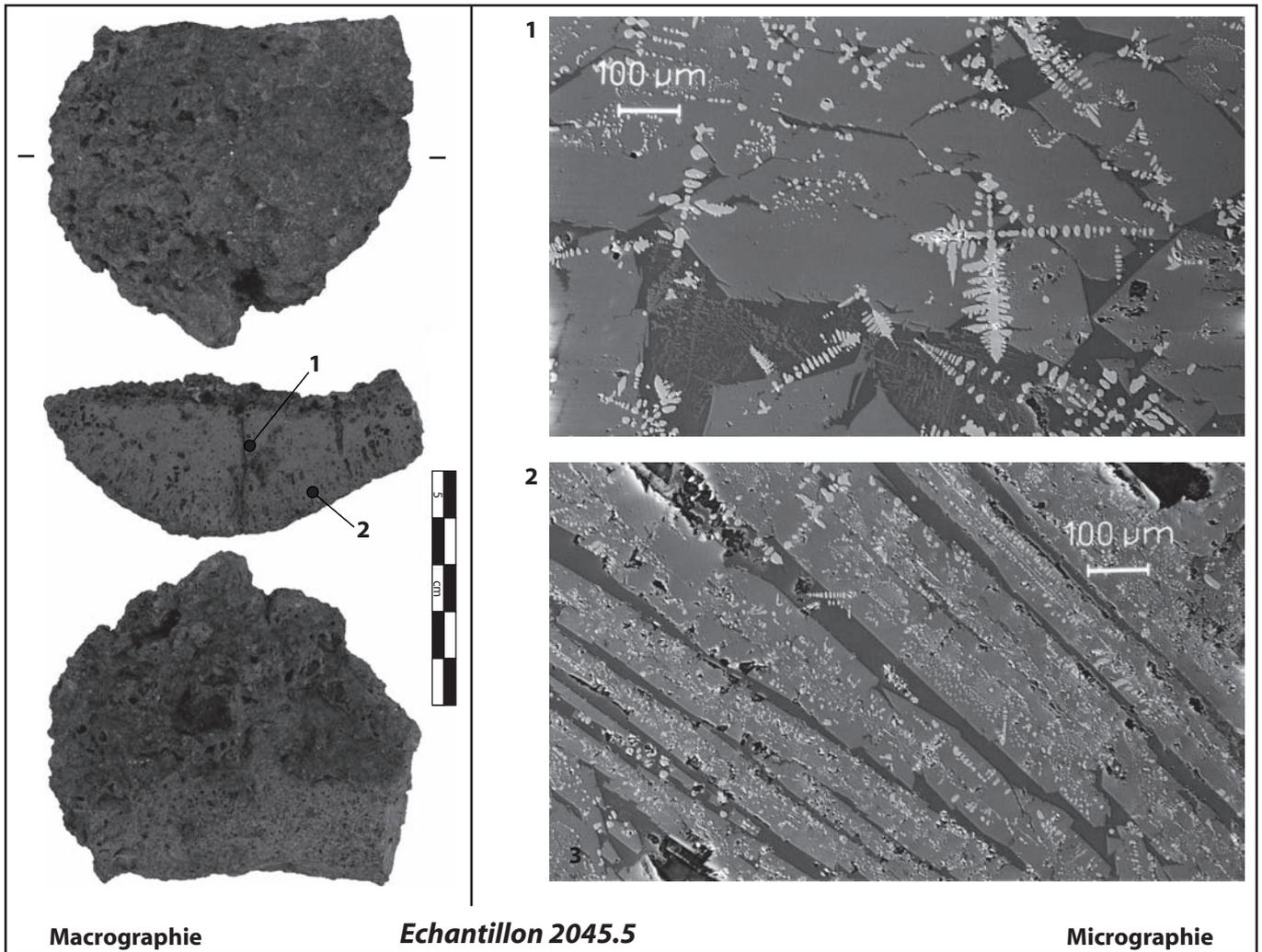


Fig. 55 : distribution, par classes de masse, des culots de l'atelier de forge.

N°	L x l x e (mm)	M (g)	Identifications	Synthèse des observations métallographiques	Interprétations
2045.1	122 x 68 x 45	330	culot	Matrice fayalitique homogène, parfois stratifiée, possédant beaucoup de wustites sous les formes globulaire et dendritique ainsi qu'un semis épars de billes et de fragments de métal non réoxydés (atmosphère réductrice ou en anaérobie). Quelques battitures globulaires sont visibles; elles sont parfois très grosses.	Cycles de chauffe homogènes, typiques de phases de forgeage parfaitement maîtrisées et avancées dans la chaîne opératoire.
2045.2	109 x 96 x 37	402			
2045.4	134 x 79 x 35	322			
2085.2	100 x 95 x 62	364			
2085.3	75 x 56 x 30	140			
2045.3	82 x 64 x 33	210		Matrice fayalitique homogène très fortement chargée en globules et en dendrites de wustite, mais sans aucune perte métallique. En revanche, de nombreuses battitures globulaires, parfois très grosses (1 mm) et plus ou moins dissoutes, se trouvent dans le bain scoriacé.	
2045.6	74 x 59 x 35	274			
2045.5	74 x 65 x 25	204		Matrice fayalitique à lattes et à pavés pratiquement pure. Il n'existe que quelques îlots où se développent des dendrites et des globules de wustite. De très rares billes ou fragments métalliques non réoxydés se retrouvent dans le bain comme quelques battitures billes ou globulaires (atmosphère réductrice ou en anaérobie).	
2085.1	97 x 80 x 50	340	Matrice siliceuse formée d'agrégats d'argile et de silice avec de rares zones silicatées composées de fayalite pure exempte de wustite. Cet ensemble est parsemé d'un semis épars de fragments et de billes non réoxydés (atmosphère réductrice ou en anaérobie).		
2045.7	92 x 80 x 34	144			
2045.8	180 x 28 x 28	736		demi-produit	Barre de section carrée principalement ferritique dont une extrémité a été tranchée à chaud. Issue d'un fragment de loupe, elle est correctement épurée, mais son agglomération n'est pas totalement terminée : il reste encore de très nombreuses porosités.
2045.14	30 x 17 x 11	32		Pièce composée de multiples feuilles essentiellement ferritiques et correctement épurées soudées les unes sur les autres (quelques unes sont à 0,1 % de C). Une des extrémités a été tranchée à chaud.	Fragment de demi-produit probablement fabriqué sur place à partir de fines feuilles essentiellement ferritiques. Il pose le problème du recyclage ou de la fabrication de demi-produits spécifiques.
2045.12	79 x 15 x 16	64	outil tranchant	Tige biseautée d'une extrémité à l'autre. Entièrement aciérée à 0,6-0,7 % de C, elle est trempée sur les deux tiers de sa longueur depuis le tranchant. Elle est formée à partir d'un assemblage complexe de feuilles notamment liées par une soudure en gueule de loup, elle-même consolidée par l'apposition de deux feuilles de part et d'autre. L'épuration et l'agglomération de l'ensemble sont remarquables.	Ciseau possédant des qualités mécaniques remarquables parfaitement adaptées à la fonction de l'objet.
2045.13	55 x 24 x 18	66		Large biseau formé d'une feuille essentiellement ferritique repliée et soudée sur elle-même. Quelques zones cémentées existent en périphérie et le long des soudures. La propreté inclusionnaire de la pièce est moyenne.	Outil tranchant ayant des qualités mécaniques peu adaptées à son emploi.
2045.10	36 x 26 x 26	54	autre outil	Masse biconique essentiellement ferritique, dont uniquement la pointe effilée est légèrement cémentée. Issu d'un fragment de loupe, cet objet possède une qualité d'épuration exceptionnelle.	Plomb de chantier ?
2045.9	68 x 67 x 26	490	outil ?	Épaisse masse carrée percée d'un trou au centre (9 mm). Mi-ferritique, mi-aciérée (entre 0,3 et 0,7 % de C), elle est entièrement trempée et issue d'un unique fragment de loupe qui a bénéficié d'une épuration et d'un compactage très soignés. Aucun écrouissage n'est visible.	La qualité des travaux effectués sur cette masse ferreuse, dont la forme est par ailleurs particulière, permet de considérer cet objet comme une pièce spécifique avec une fonction indéterminée.
2045.11	55 x 19 x 17	74	chute	Issue d'un fragment de loupe, cette petite masse ferritique est très correctement épurée et possède une face cémentée à 0,3-0,4 % de C.	Chute de forge soulignant la pratique de la cémentation.

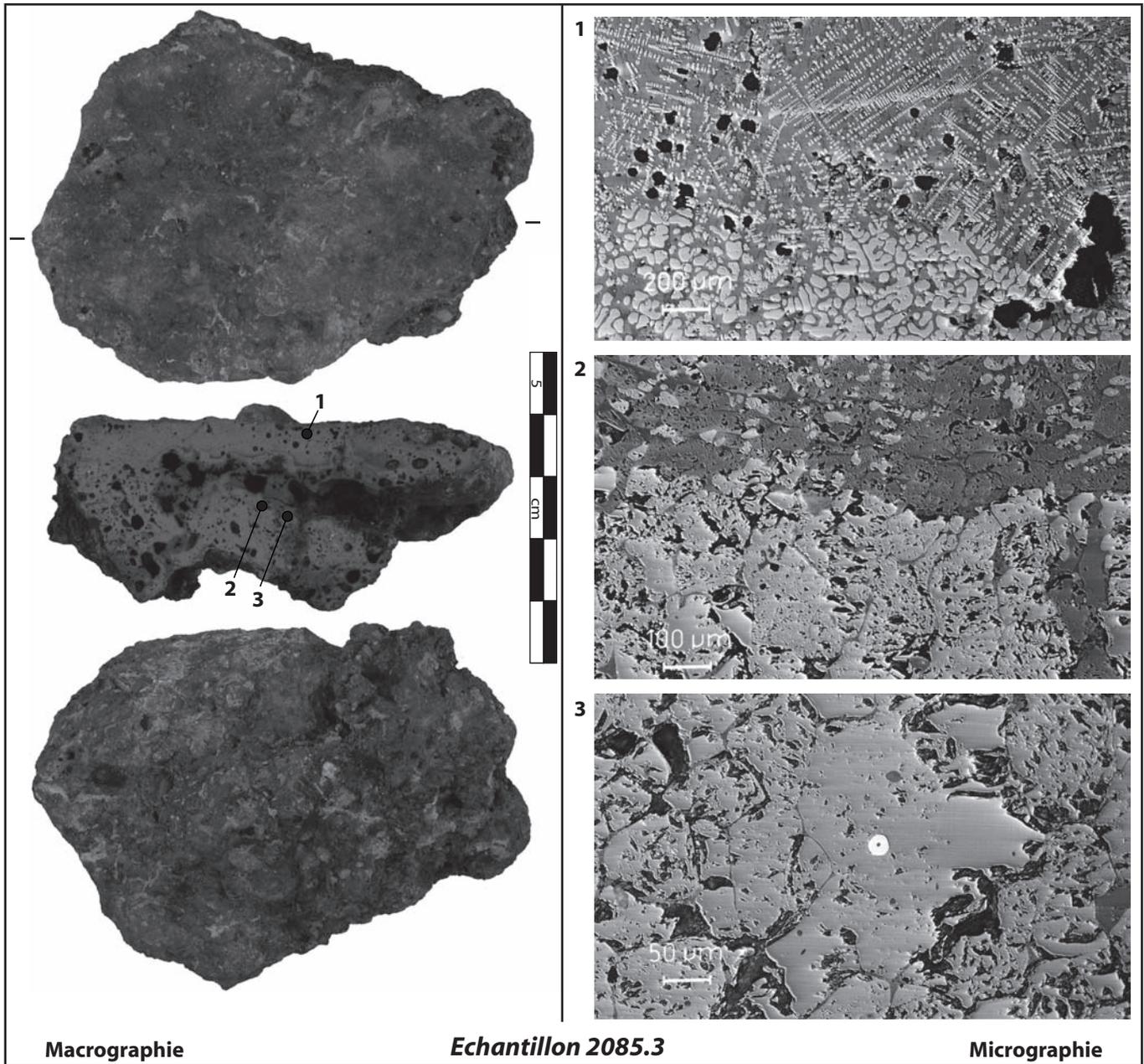
Fig. 56 : bilan répertorié des analyses métallographiques.



1 : matrice fayalitique à pavés avec quelques rares et fines dendrites de muscovite.

2 : matrice fayalitique à lattes avec quelques rares et fines dendrites de muscovite.

Fig. 57 : observations métallographiques du culot de forge 2045.5.



- 1 : limite entre une battiture globulaire et le bain fayalitique qui comporte de nombreuses dendrites de wustite.
 2 : limite entre une battiture globulaire et le bain fayalitique.
 3 : une des rares billes de métal avec une impureté au milieu

Fig. 58 : observations métallographiques du culot de forge 2085.3.

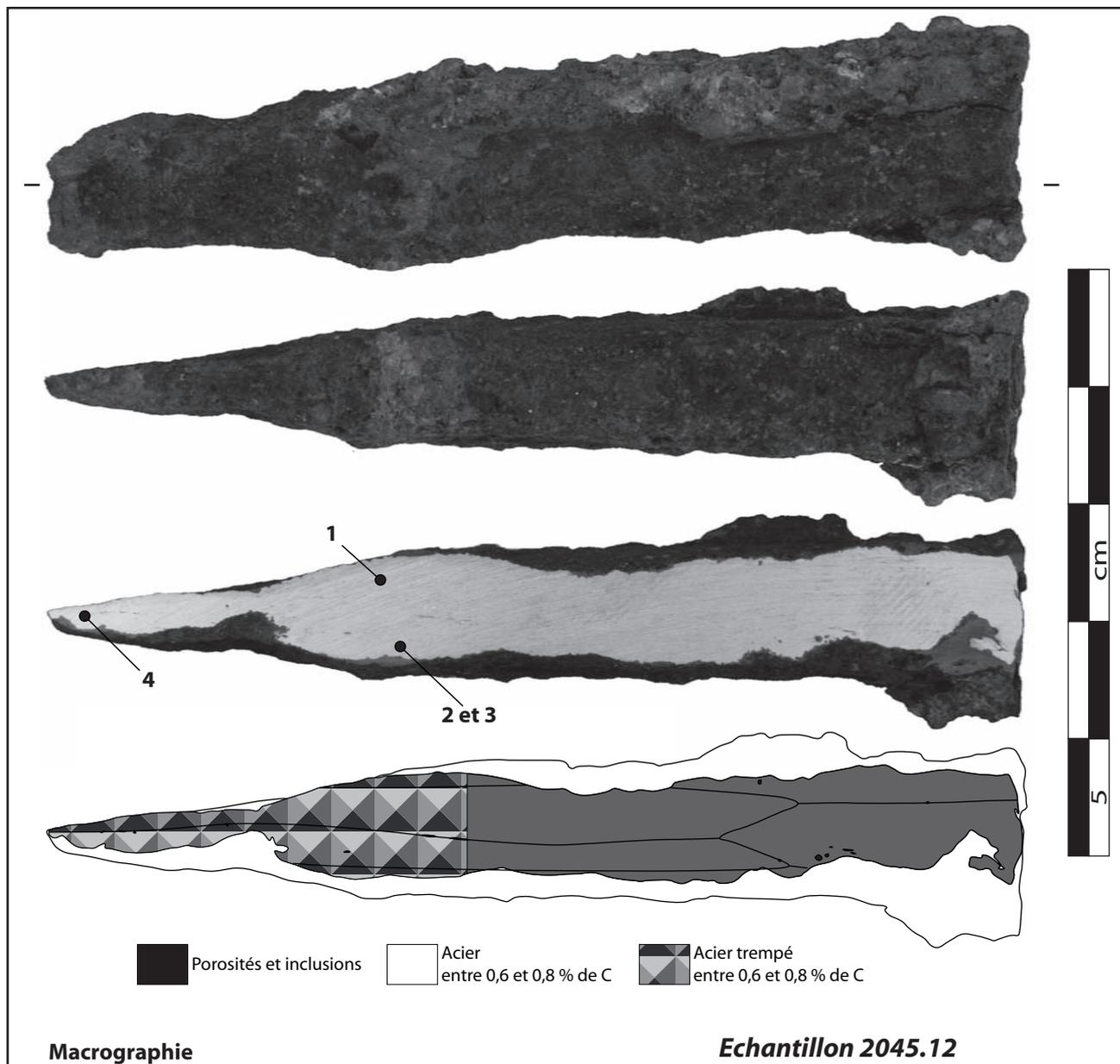
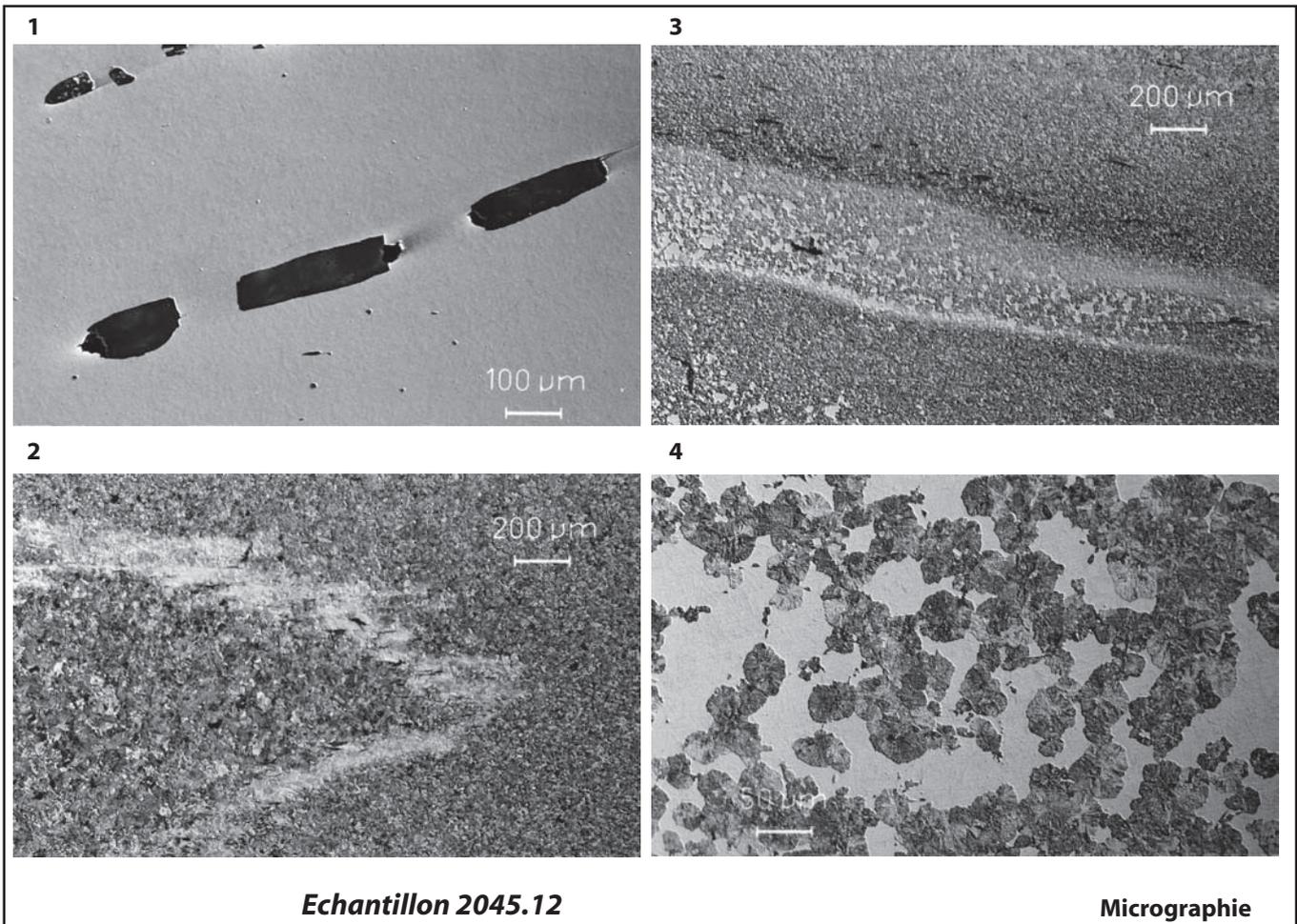


Fig. 59/1 : observations métallographiques de l'outil tranchant 2045.12 (macrographie).



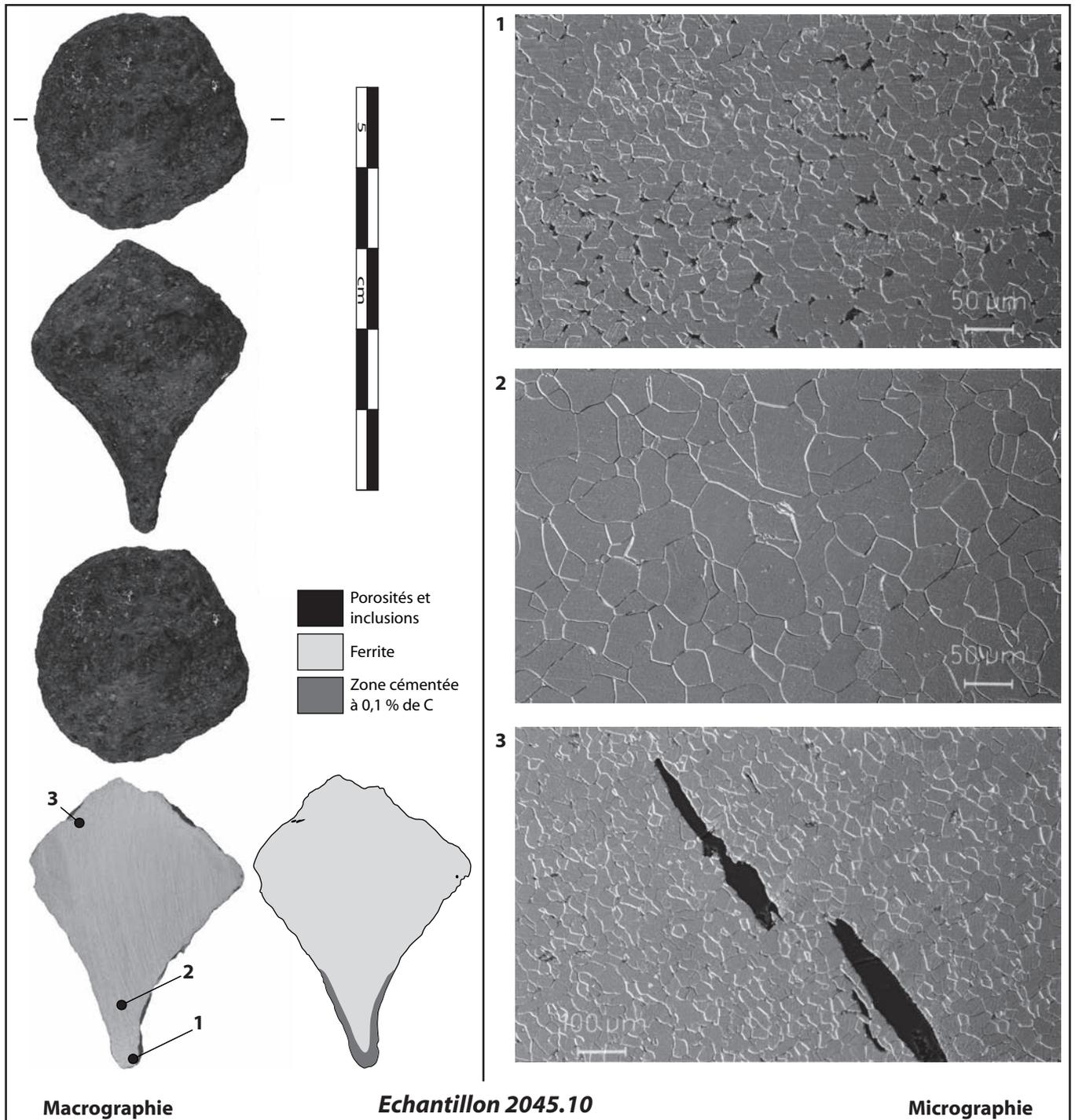
1 : avant l'attaque au Nital, inclusions amorphes, angulaires et alignées qui témoignent de l'existence d'une soudure réalisée avec la technique du jet de sable.

2 : après l'attaque au Nital, soudure en gueule de loup dans un acier trempé entre 0,7 et 0,8 de C.

3 : après l'attaque au Nital, soudure de corroyage dans un acier trempé entre 0,7 et 0,8 de C.

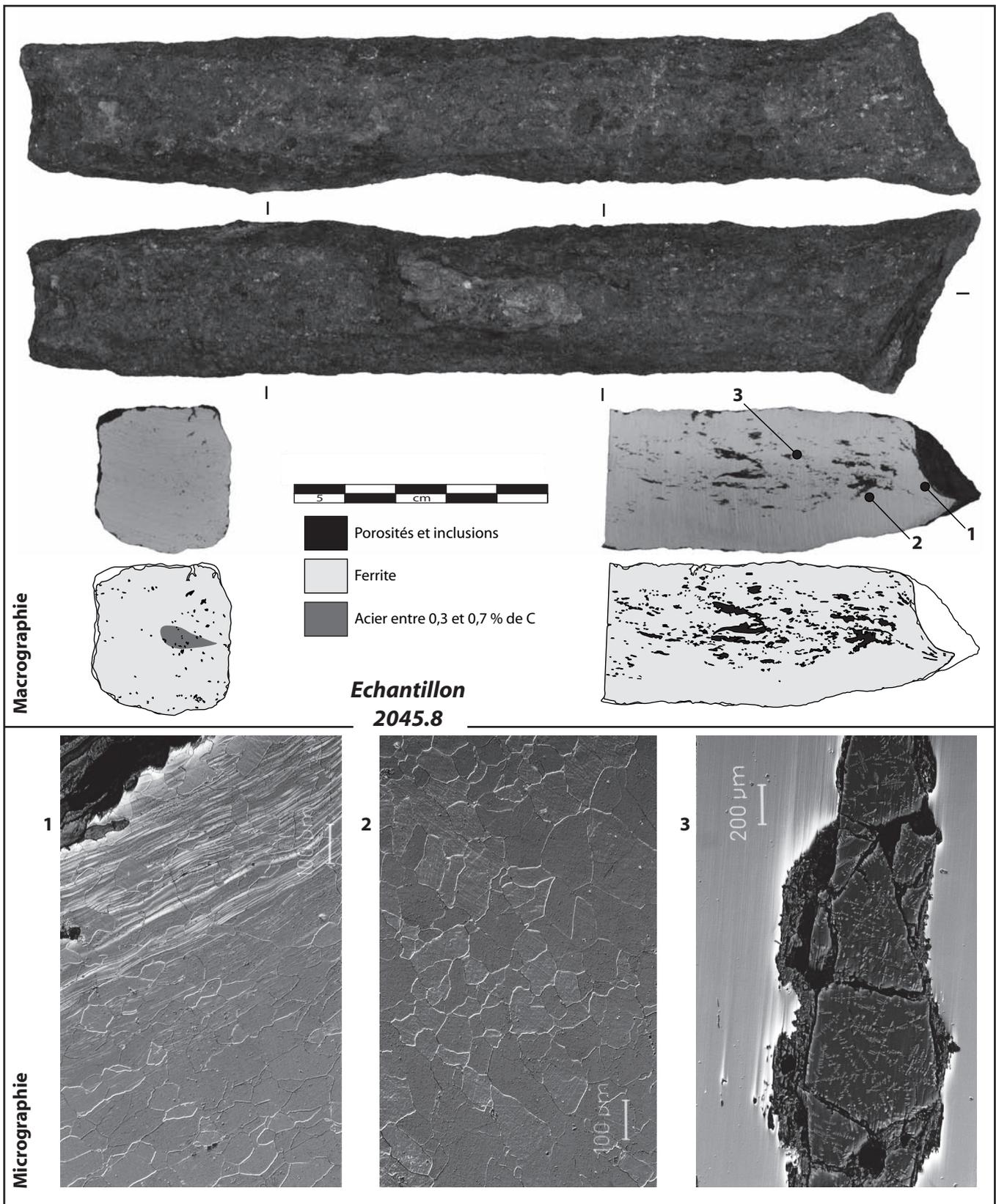
3 : après l'attaque au Nital, acier trempé entre 0,7 et 0,8 % de C (troostite, martensite et bainite).

Fig. 59/2 : observations métallographiques de l'outil tranchant 2045.12 (micrographie).



- 1 : après l'attaque au Nital, zone cémentée composée d'un acier à très petits grains à 0,1 % de C.
 2 : après l'attaque au Nital, ferrite équiaxe à petits grains.
 3 : après l'attaque au Nital, ferrite équiaxe à petits grains avec quelques unes des rares inclusions amorphes.

Fig. 60 : observations métallographiques du probable plomb de chantier 2045.10.



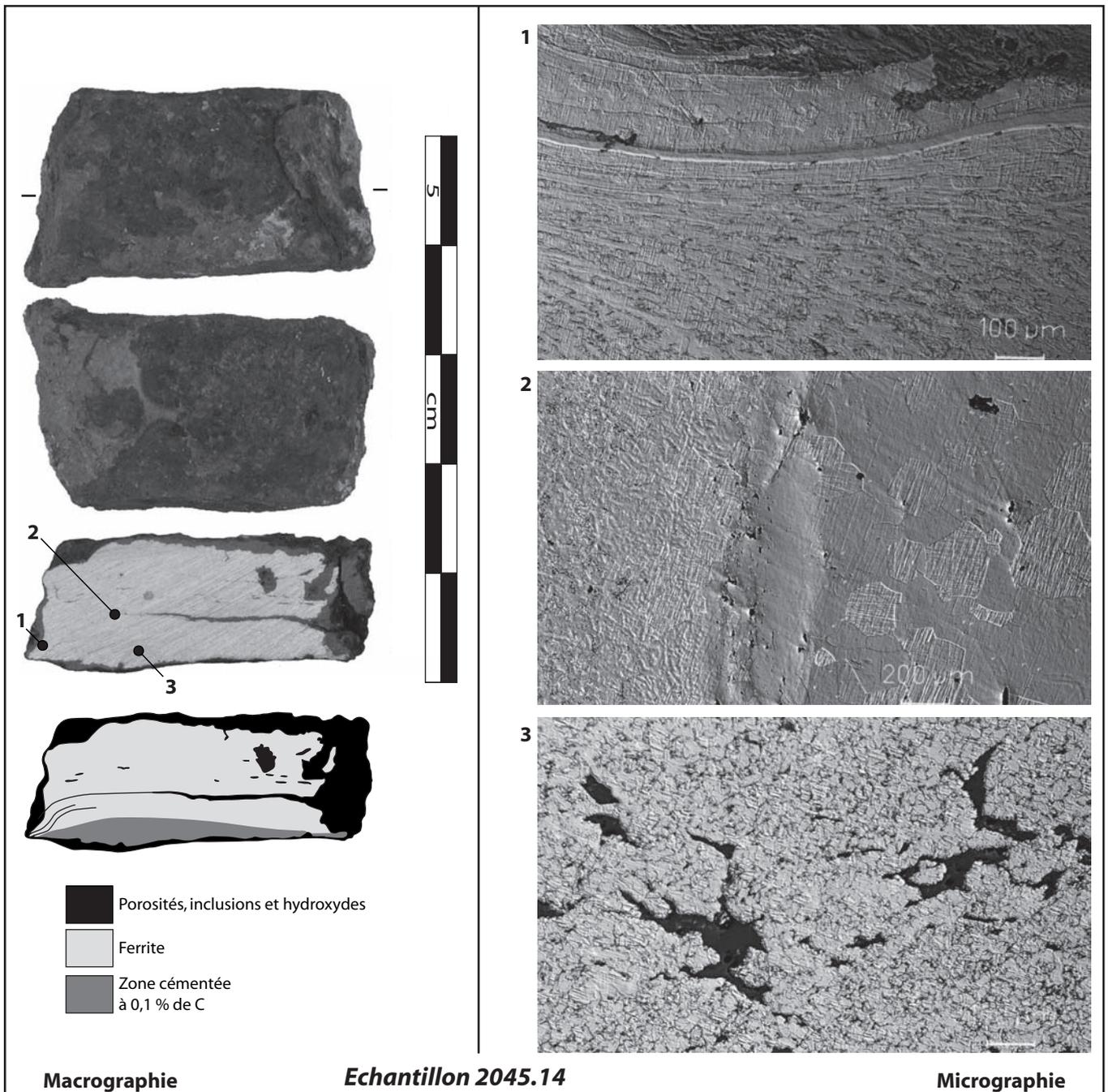
**Echantillon
2045.8**

1 : après l'attaque au Nital, reliquat d'un écrouissage dans de la ferrite légèrement recristallisée, ce qui témoigne d'un tranchage à chaud.

2 : après l'attaque au Nital, ferrite équiaxe caractéristique de l'ensemble de la section.

3 : avant l'attaque au Nital, inclusion fayalitique avec des dendrites de wustite qui a été fragmentée probablement à la suite d'un martelage à froid.

Fig. 61 : observations métallographiques du demi-produit 2045.8.



1 : après l'attaque au Nital, important écrouissage d'une structure ferritique qui témoigne d'un tranchage à basse température.

2 : après l'attaque au Nital, soudure entre une feuille ferritique à gros grains et une feuille ferritique à petits grains.

3 : après l'attaque au Nital, acier à 0,1 % de C avec des inclusions amorphes encore peu écrasées.

Fig. 62 : observations métallographiques du demi-produit 2045.14.

3. LA STATION ROUTIÈRE D'AMBRUSSUM (VILLETTELLE, 34) AU HAUT-EMPIRE

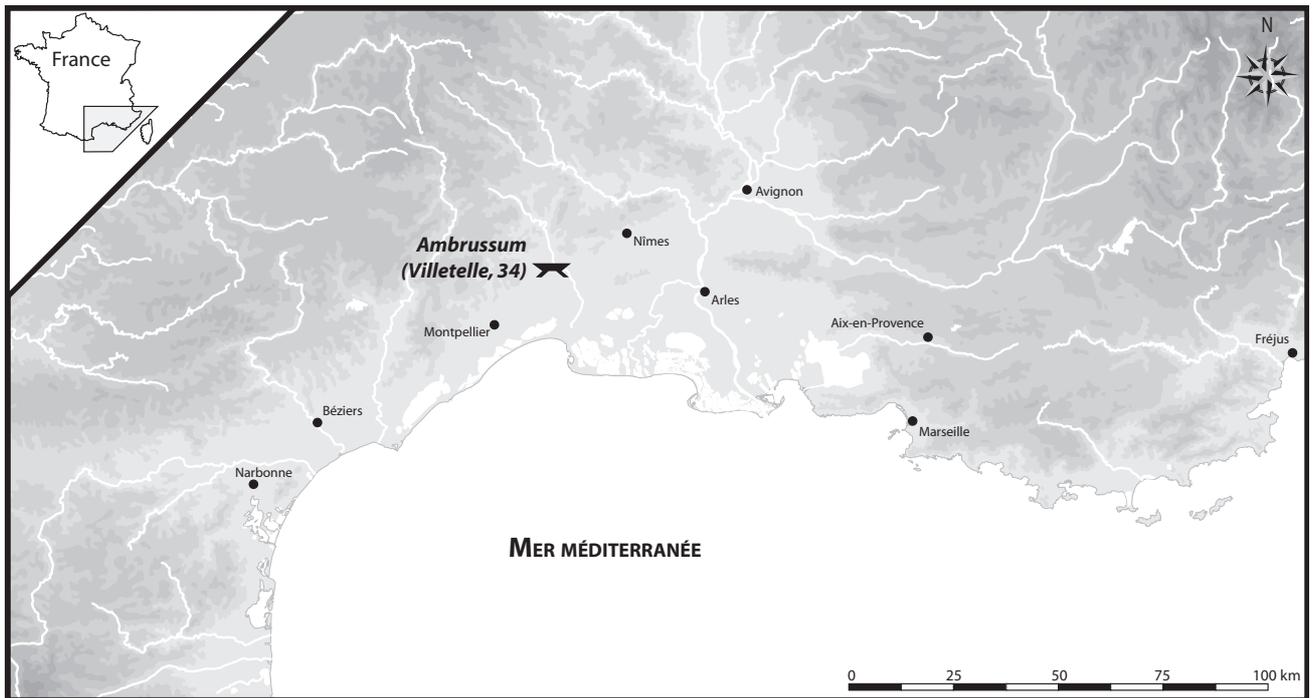


Fig. 63 : carte de localisation du site.

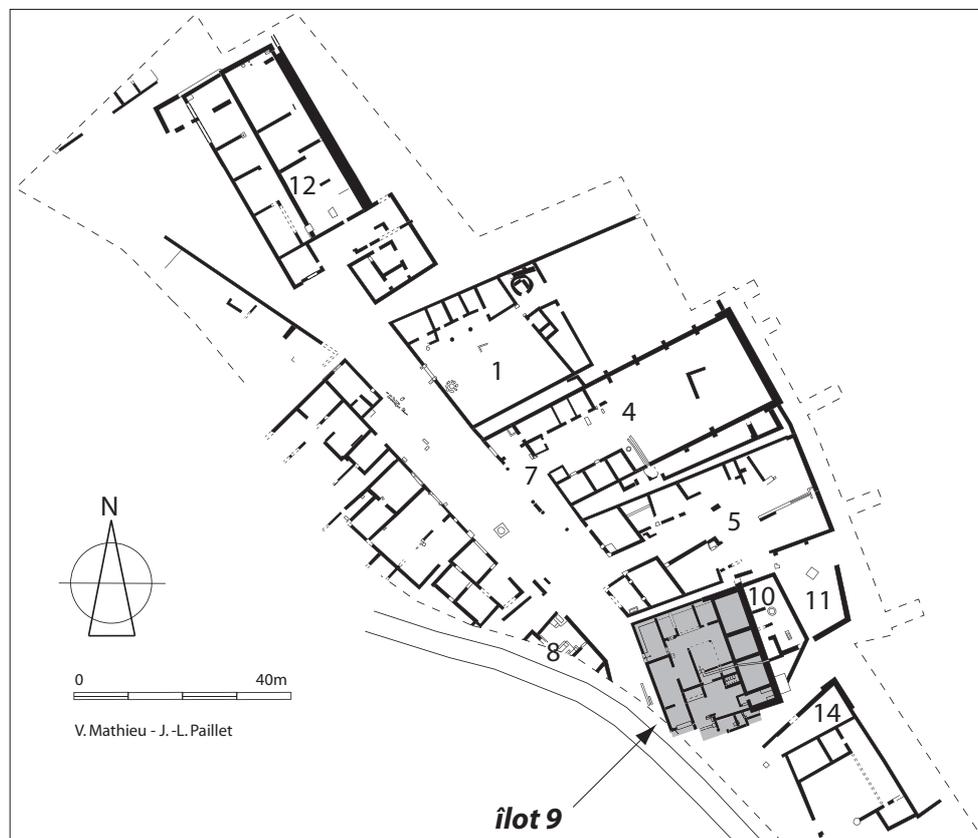


Fig. 64 : plan général du site et localisation de l'îlot 9 (d'après V. Mathieu et J.-L. Paillet).

Types de mobilier métallurgique et ferreux		Etats										
		D		C		B		A		Total		
		25-50 de n. è.		50-75 de n. è.		75-100 de n. è.		125-175 de n. è.				
		nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	
Scorie	en culot	5	600	77	9340	3	570	12	1840	97	12350	
	informe	39	580	445	5880	9	330	289	3740	782	10530	
	battiture			X				X				
	<i>sous total</i>	44	1180	522	15220	12	900	301	5580	879	22880	
Objet	habillement	1	50							1	50	
	clou de chaussure	45	150			14	20	46	40	105	210	
	militaire	1	40			3	550	9	1050	11	1390	
	couteau	2	60			6	180	3	160	11	400	
	Outillage	bois			1	200			2	1030	3	1330
		agriculture							1	1040	1	1040
		élevage							1	160	1	160
		indéterminé					3	350	1	650	4	1000
		<i>sous total</i>			1	200	3	350	5	2880	9	3530
	Construction	clou	162	2112	195	2442	347	5676	439	5440	1142	15770
		tige	219	2220	108	1330	279	2270	391	4700	1000	10570
		crochet					4	500	4	490	8	990
		chaîne							3	270	3	270
		serrure	1	70	1	160	2	130	3	100	7	460
		anneau	2	60			3	110	4	230	9	400
		autres			1	160	5	2940	2	510	8	3610
		<i>sous total</i>	384	4462	305	4092	640	11626	846	11740	2177	32070
	Char	fragment de bandage	1	400	5	1190			2	460	8	2050
		autres éléments de char	1	70	1	30	3	1220	4	280	9	1600
		<i>sous total</i>	2	470	6	1220	3	1220	6	740	17	3650
		demi-produit	1	570	1	170					3	760
		plaque massive	2	300	1	140	4	450	6	540	13	1430
		plaque fine	9	190	61	1730	25	600	33	1680	128	4200
	indéterminé	38	630	144	1930	149	2860	224	3800	555	9220	
	<i>sous total</i>	485	6922	519	9482	847	17856	1179	22650	3030	56910	
	Total	529	8102	1041	24702	859	18756	1480	28230	3909	79790	

Fig. 65 : répartition par périodes, en nombre et en masse, des types de mobiliers métallurgiques et ferreux de l'ilot.

Destinations fonctionnelles du mobilier métallique non-ferreux	Etats					
	D	C	B	A	ind.	Total
en bronze						
parure	2	0	2	3	0	7
toilette	1	0	1	0	0	2
vaisselle	0	0	2	1	0	3
outil de mesure	0	0	0	1	0	1
domestique	0	0	3	6	2	11
clou	4	4	11	16	2	37
militaire	0	0	0	1	0	1
harnachement	3	4	3	3	2	8
char	0	1	0	0	0	1
cloche	0	0	0	1	1	2
divers	2	9	9	18	4	48
Total	11	18	31	50	11	121
en plomb						
domestique	1	0	0	4	0	5
pêche	0	0	0	1	0	1
divers	0	1	3	4	0	8
indéterminé	0	0	2	0	0	2
Total	1	1	5	9	0	16

Fig. 66 : répartition par périodes, en nombre, des objets en bronze et en plomb de l'ilot.



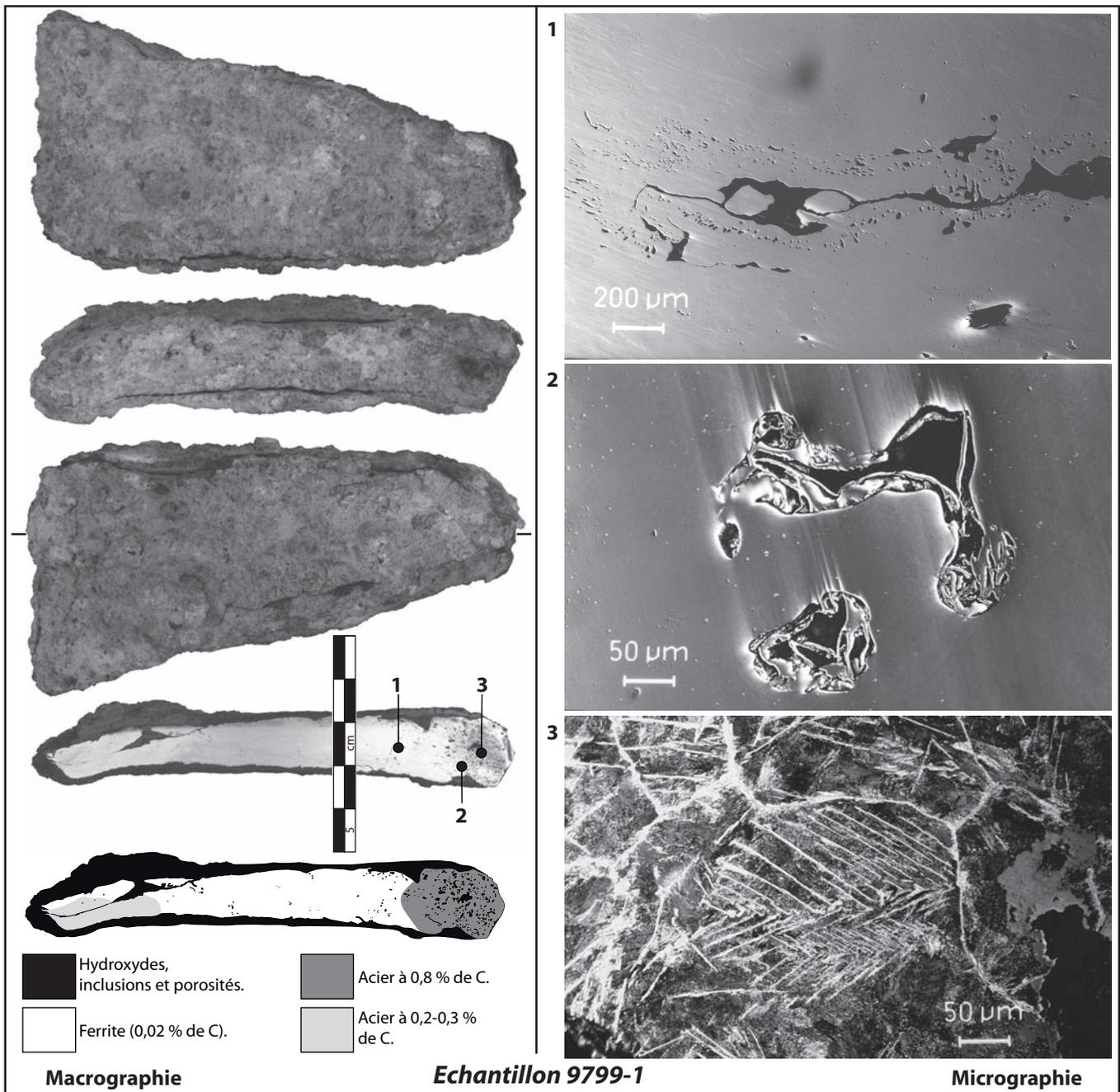
Fig. 67 : plan général de l'îlot (d'après J.-L. Fiches, Y. Manniez, V. Mathieu).

Types de mobilier métallurgique et ferreux		Secteurs																	
		1	2	5	6	7	8	9	10	11	12	13	19	20	21	22	23	28	Total
Scorie	en culot	1										1			1		2		5
	informe						1		2	5		9		1	13	7	1	39	
	battiture																		
	sous total	1					1		2	5		10		2	13	9	1	44	
Objet	clou	1		3	2	4	15	30	3	57	4	17	17	3		6		162	
	tige	2					41	47	4	44	4	10	24	3	12	28		219	
	frgt de bandage						1 (404g)											1	
	demi-produit										1 (568g)							1	
	plaque massive					1 (80g)						1 (157g)						2	
	plaque fine		2		1		1				3		1					8	
	autres							1 anneau 1 bout d'épée 1 lame 45 clous de chaussure		1 crochet 1 boucle de ceinture 1 clavette		1 clef 1 anneau			1 soie			54	
	ind. et petit						4		3	5	1	16		3	6			38	
	sous total	3	2	3	3	5	62	125	10	109	13	46	42	1	9	19	34	485	
	Total	4	2	3	3	5	63	125	12	114	13	56	42	1	11	32	43	1	529

Fig. 68 : répartition spatiale, en nombre, des types de mobiliers métallurgiques dans l'ilot.

Con- texte	N°	Prove- nance	L x l x e (mm)	M (g)	Identi- fications	Synthèse des observations métallographiques	Interprétations
atelier probablement localisé dans la cour sud	9504-1	8	118 x 55 x 20	404	fragment de bandage	Plaque convexe formée d'au moins quatre feuilles essentiellement ferritiques. A une extrémité, elle possède un biseau cémenté et écroui. L'autre extrémité est munie d'un œil central. Tout le pourtour est enrobé de scories et de charbons de bois.	Fragment de bandage préparé de manière à être soudé, du côté biseauté, et fixé avec un rivet, à l'autre extrémité.
	9799-1	12	225 x 50 x 23	568	demi- produit	Masse de fer brute possédant une partie ferritique et légèrement aciérée (0,2-0,3% de C) plutôt correctement compactée et, par endroit, écrouie. Une autre partie est composée d'acier eutectoïde à 0,8% de C renfermant encore beaucoup de porosités, d'inclusions et de replis, dont la morphologie indique un martelage intense. Tout le pourtour est enrobé de scories et de charbons de bois.	Demi-produit abandonné alors qu'il était en cours d'épuration et de compactage.

Fig. 69 : bilan répertorié des analyses métallographiques.

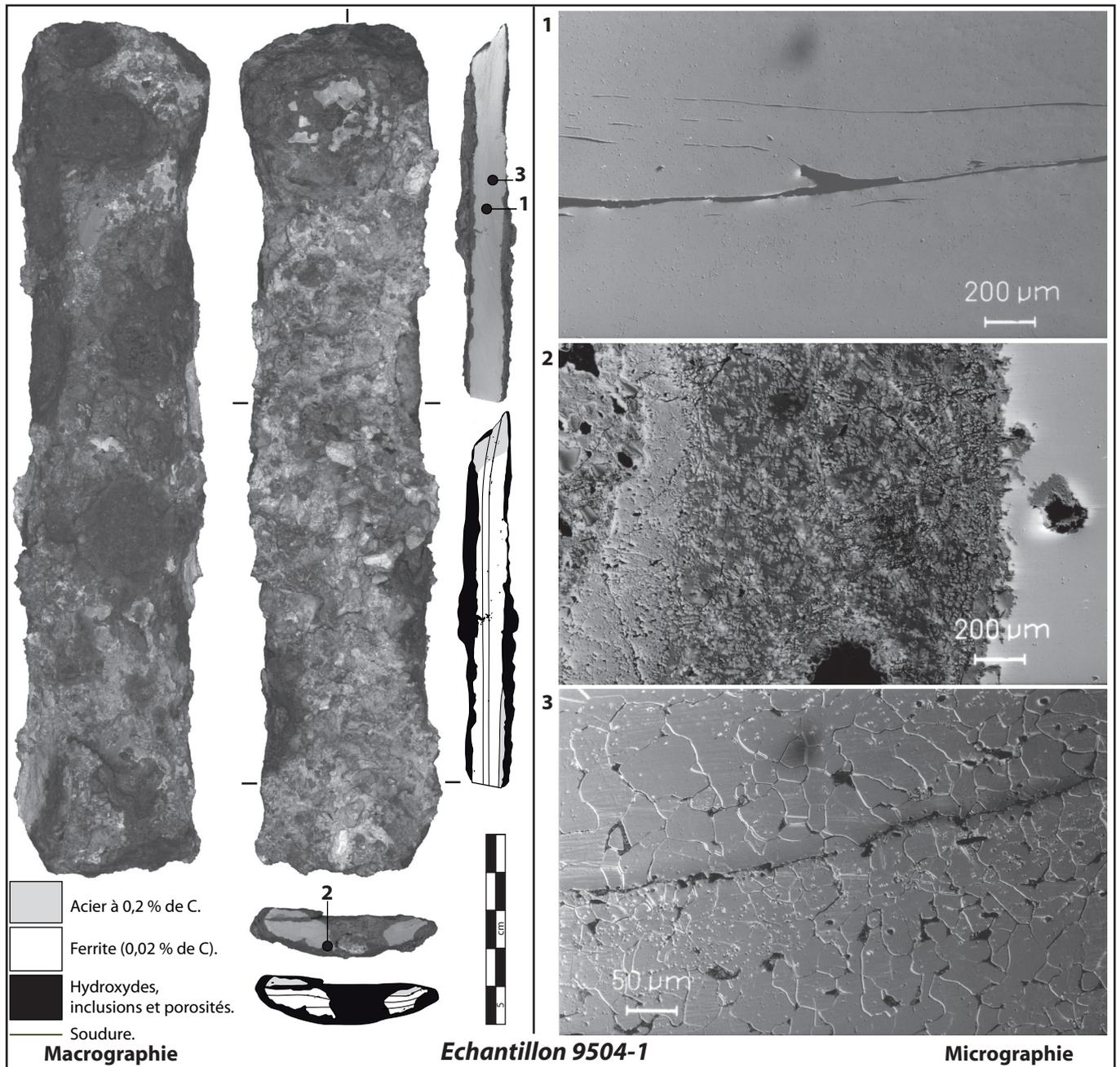


1 : avant l'attaque au Nital, chapelet d'inclusions amorphes plus ou moins écrasées, vestiges du processus de réduction.

2 : avant l'attaque au Nital, très gros repli, reliquat de la phase d'agglomération.

3 : après l'attaque au Nital, acier à 0,9 % de C, qualifié d'hyperentectoïde.

Fig. 70 : observations métallographiques du demi-produit 9799.1.

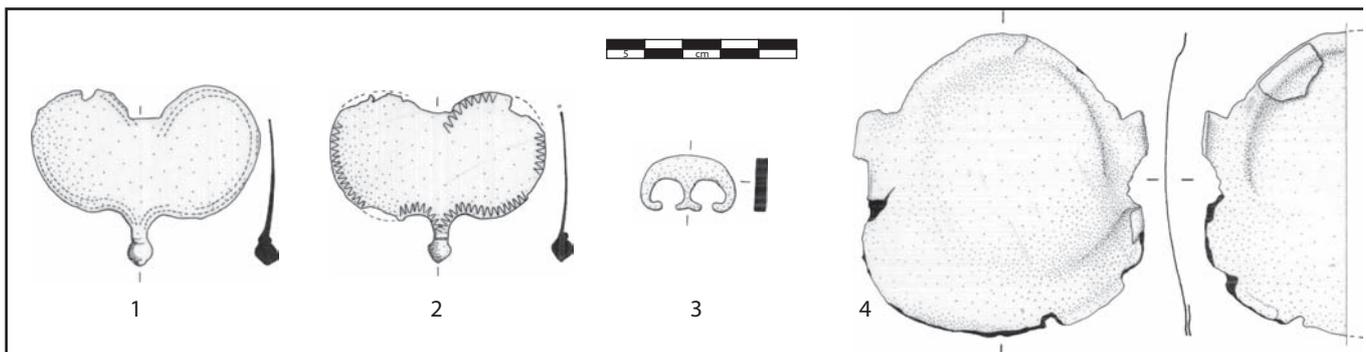


1 : avant l'attaque au Nital, inclusions amorphes très écrasées le long de lignes de soudure.

2 : avant l'attaque au Nital, contre le métal, nappage de scorie (matrice fayalitique avec des dendrites et des globules de wustite) contenant les vestiges d'une battiture globulaire.

3 : après l'attaque au Nital, soudure entre deux feuilles ferritiques.

Fig. 71 : observations métallographiques du fragment de bandage de roue 9504.1.



1 et 2 : pendants de harnais en bronze.

3 : élément de harnais en bronze.

4 : deux tôles en alliage ferreux embouties.

Fig. 72 : mobiliers de harnachement et autres (dessin J. Chevalier).

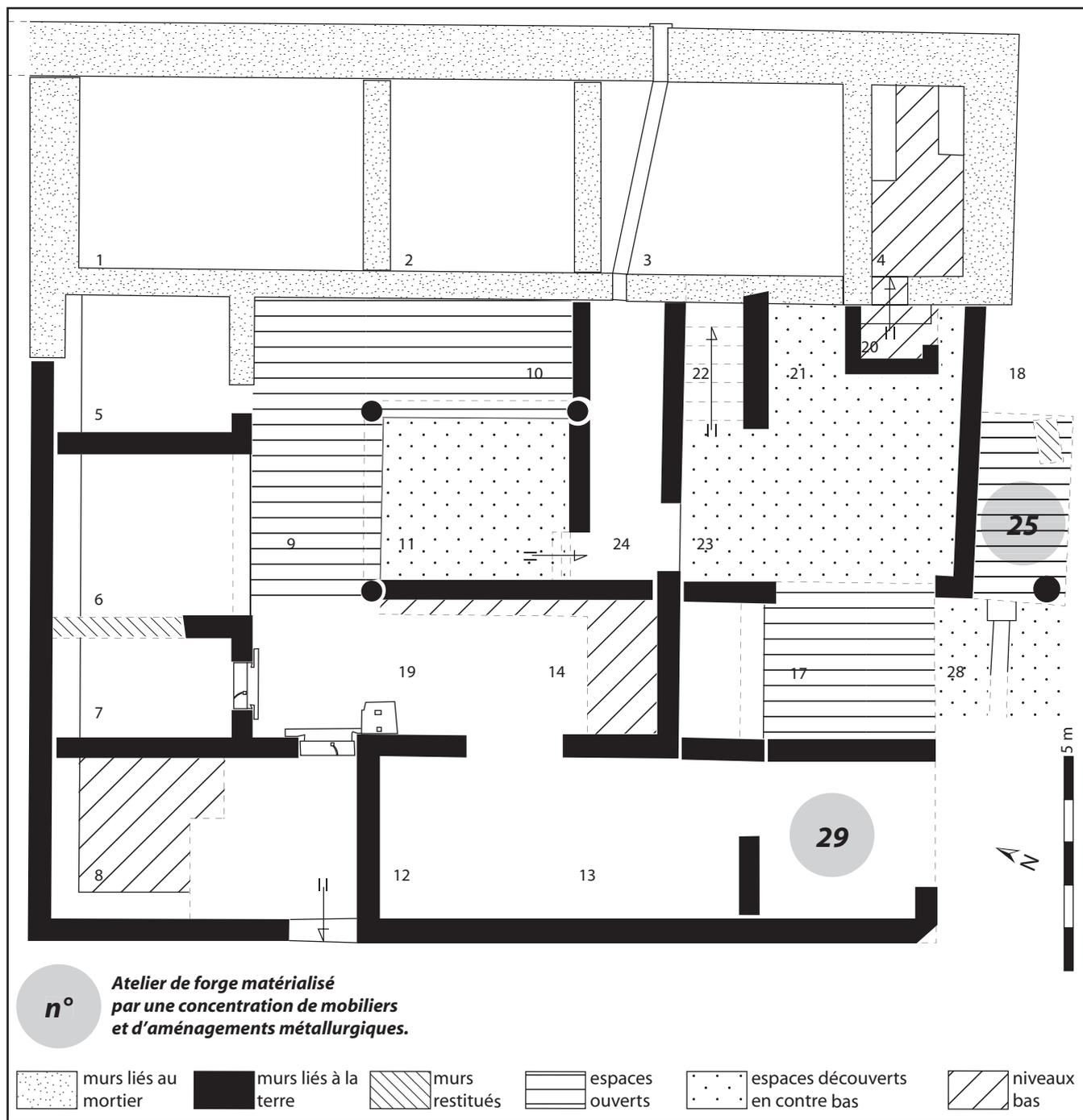


Fig. 73 : plan général de l'ilot et localisation des espaces métallurgiques (d'après J.-L. Fiches, Y. Manniez, V. Mathieu).

Types de mobilier métallurgique et ferreux		Secteurs																			
		4	5	8	9	10	11	12	13	15	17	19	20	21	22	23	25	28	29	Total	
Scoreie	en culot							5		1						3		68	77		
	informe	1		2				1	22			44				24	4	347	445		
	battiture															X		X			
	sous total	1		2				1	27		1		44			27	4	415	522		
Objet	clou	2	3	33	8	2	19	12	11	7	35	12	13	1	6		17	7	7	195	
	tige		4	18	15		11	13	1	6	13	9			6		6	5	1	108	
	frgt de bandage																		5 (1191g)	5	
	demi-produit																		1 (173g)	1	
	plaque massive								1 (138g)												1
	plaque fine			1				2	1							5			52 (232g)	61	
	autres		1 herminette	1 volubilis												1 élément de serrure				1 pieu	4
	ind. et petit		6		12	1	8	2	1		25	8				1		1	79	144	
	sous total	2	14	53	35	3	38	29	15	13	73	29	13	1	13	1	28	13	146	519	
	Total	3	14	55	35	3	38	30	42	13	74	29	57	1	13	1	55	17	561	1041	

Fig. 74 : répartition spatiale, en nombre, des types de mobiliers métallurgiques dans l'îlot.



Fig. 75 : tas de scories localisé dans l'angle sud-ouest de l'atelier de forge principal, installé dans la pièce 29 (cliché J.-L. Fiches).

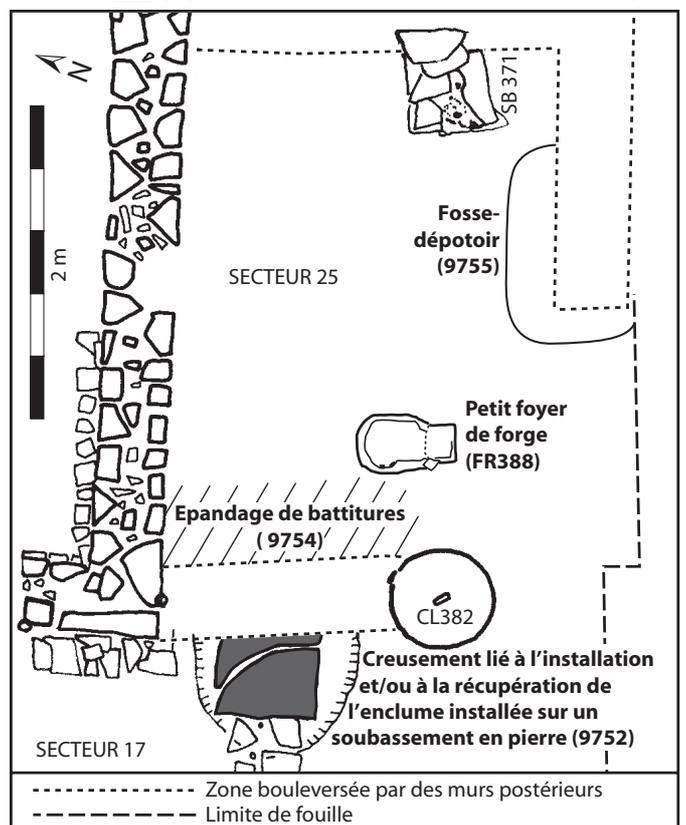


Fig. 76 : plan détaillé de l'espace 25, où se trouve le foyer de forge d'appoint FR388 (d'après J.-L. Fiches, Y. Manniez, V. Mathieu).

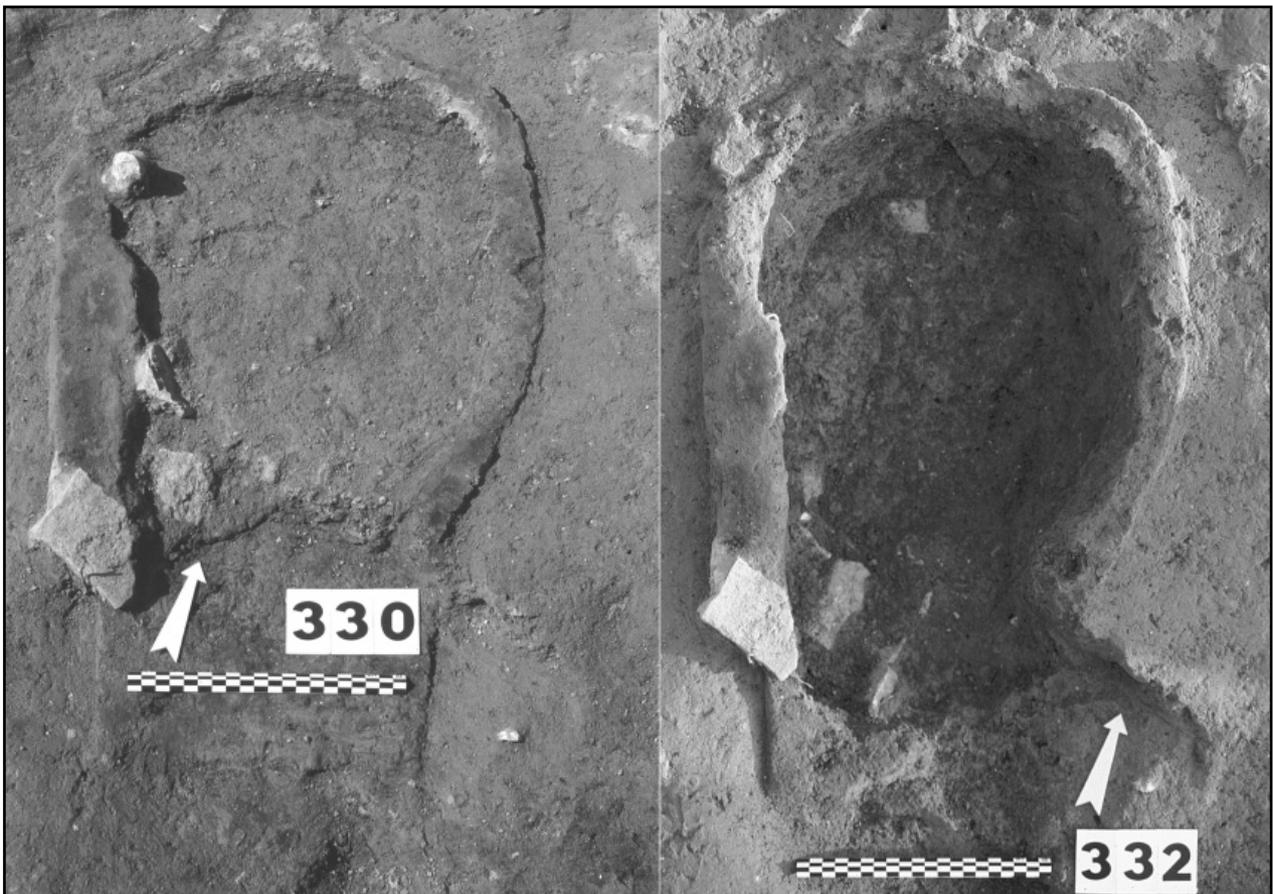


Fig. 77 : foyer de forge d'appoint (FR388) creusé dans la cour sud, au sein de l'espace 25 (cliché Y. Manniez).

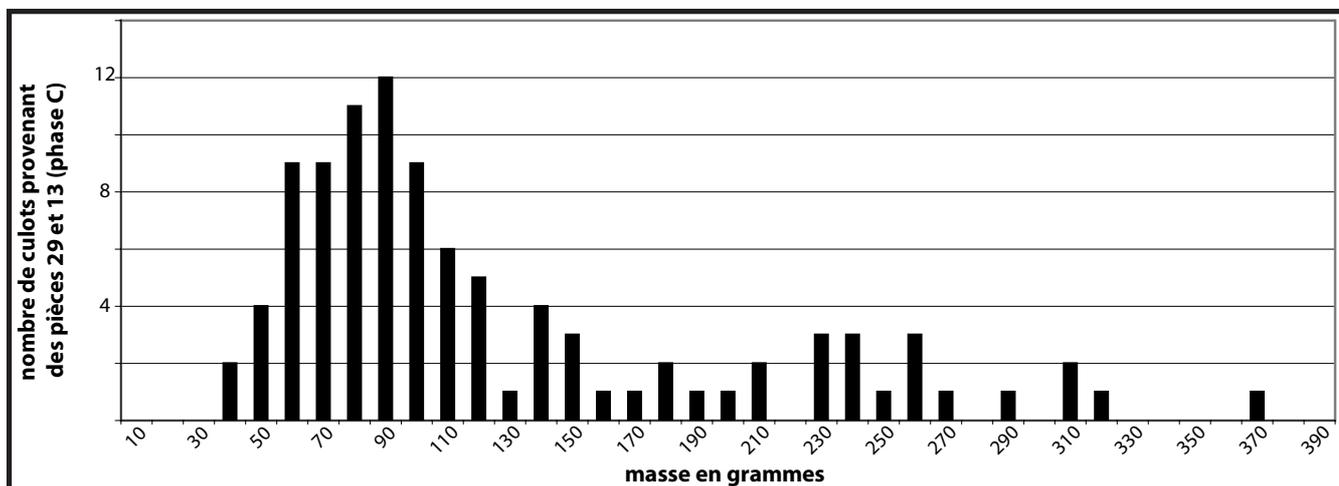
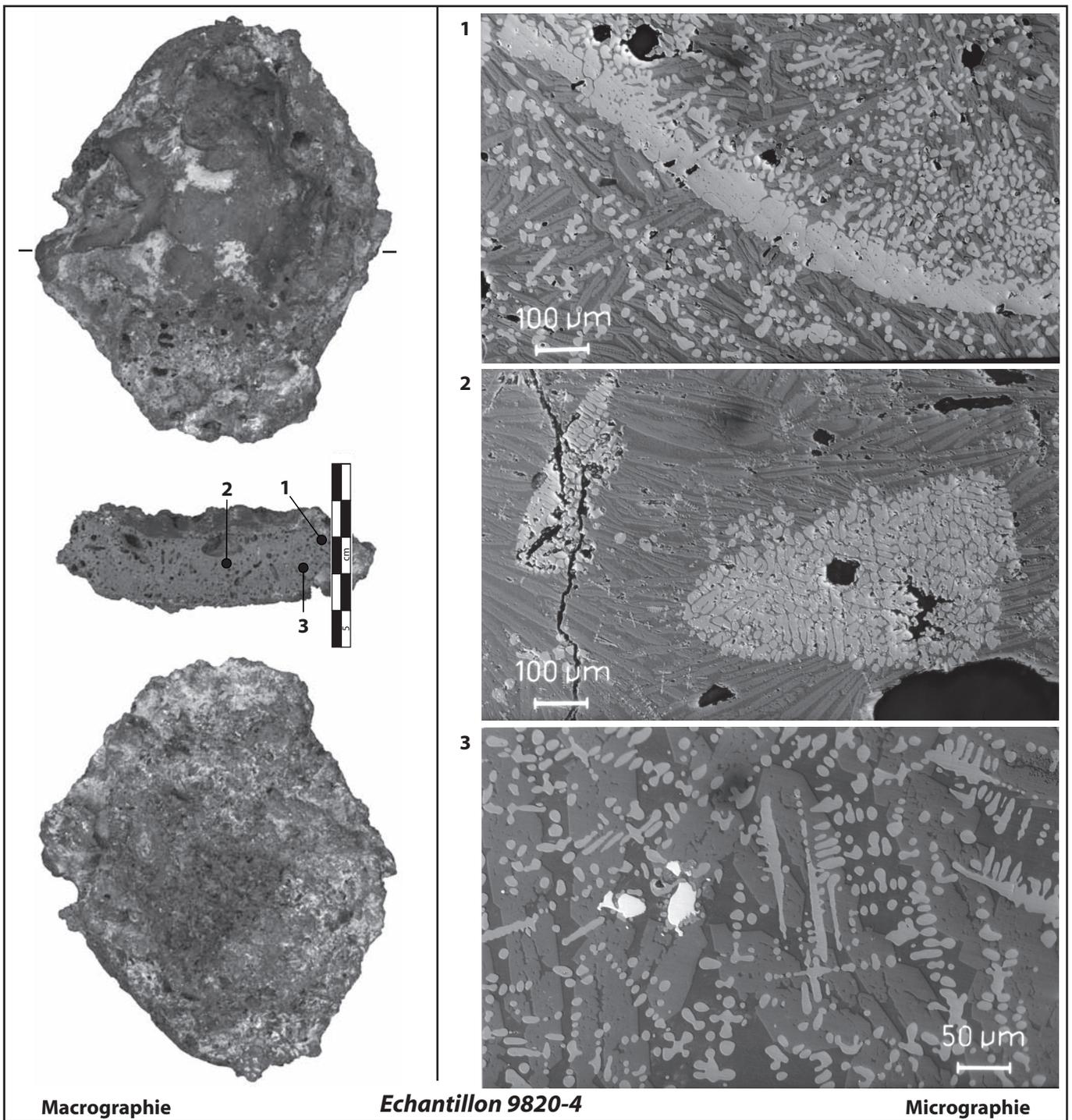


Fig. 78 : distribution, par classes de masse, des culots de l'atelier de forge principal, installé dans la pièce 29.

Contexte	N°	Provenance	L x l x e (mm)	M (g)	Identifications	Synthèse des observations métallographiques	Interprétations
atelier d'appoint de la cour sud, espace 25	9754-1	25	58 x 48 x 24	78	<i>culot</i>	Matrice localement fibreuse. Le reste est composé d'une matrice fayalitique très homogène (matières végétales et minérales) contenant des globules de wustite issus de battitures, essentiellement globulaires. Les pertes métalliques, parfois réoxydées, sont négligeables.	Petits cycles de chauffe parfois accompagnés d'ajouts importants, faisant référence à des travaux de finition.
	9754-2		59 x 55 x 23	73	<i>culot double</i>	Matrice fayalitique très homogène contenant des globules et des dendrites de wustite issus de battitures, essentiellement globulaires. Les pertes métalliques, parfois réoxydées, sont négligeables.	
atelier de forge principal abrité dans la pièce 29	9770-1	13	73 x 70 x 30	195	<i>culot</i>	Matrice fayalitique homogène et poreuse contenant des globules de wustite principalement issus de nombreuses battitures, essentiellement globulaires. Les pertes en métal sont très rares, petites et légèrement réoxydées.	Forgeage réalisé à moyenne température avec de faibles amplitudes : travaux homogènes essentiellement tournés vers la chauffe d'objets plutôt massifs, limitant ainsi les pertes au feu.
	9820-1	29	108 x 100 x 32	275			
	9773-1	13	97 x 90 x 27	230	<i>culot double</i>	Matrice fayalitique homogène et poreuse contenant des dendrites de wustite principalement issues des nombreuses battitures, essentiellement globulaires. Les pertes en métal sont très rares, petites et légèrement réoxydées.	
	9820-3	29	100 x 80 x 25	208	<i>culot</i>	La morphologie et l'observation macrographique de la section présentent des caractères identiques aux autres culots analysés des pièces 29 et 13. Pour ces raisons, il n'y a pas eu d'observation à l'échelle micrographique.	
	9820-4		100 x 85 x 30	264			
	9820-2		80 x 80 x 25	253			
	9820-5		75 x 72 x 35	133			
	9820-6		100 x 81 x 32	254			
	9820-7		91 x 86 x 20	159			
	9820-8		83 x 80 x 60	182			
	9797-1		105 x 25 x 8	68			
	9797-3	140 x 50 x 10	182	<i>pieu</i>			
	9797-2	29	75 x 40 x 10	173	<i>demi-produit</i>	Plaque massive constituée d'un assemblage d'au moins six feuilles soudées les unes sur les autres. Seule l'une d'elles, placée au milieu, est aciérée à 0,6-0,8% de C. Les autres sont ferritiques. L'ensemble possède une très bonne propreté inclusionnaire. Des cémentations sont visibles le long des soudures. Une des extrémités présente le faciès d'une tranche à chaud, couplé à un arrachement par torsion.	
9806-1	113 x 29 x 11		113	<i>fragment de bandage</i>	Plaque effilée vers une extrémité et possédant un œil de fixation centrale de l'autre côté. Elle est composée d'un assemblage d'au moins quatre feuilles soudées les unes sur les autres. Seule l'une d'elles, placée au milieu, est aciérée à 0,3% de C. Les autres sont ferritiques. L'ensemble possède une très bonne propreté inclusionnaire.	Fragment de bandage préparé de manière à être soudé, du côté effilé, et fixé avec un rivet, à l'autre extrémité.	

Fig. 79 : bilan répertorié des analyses métallographiques.

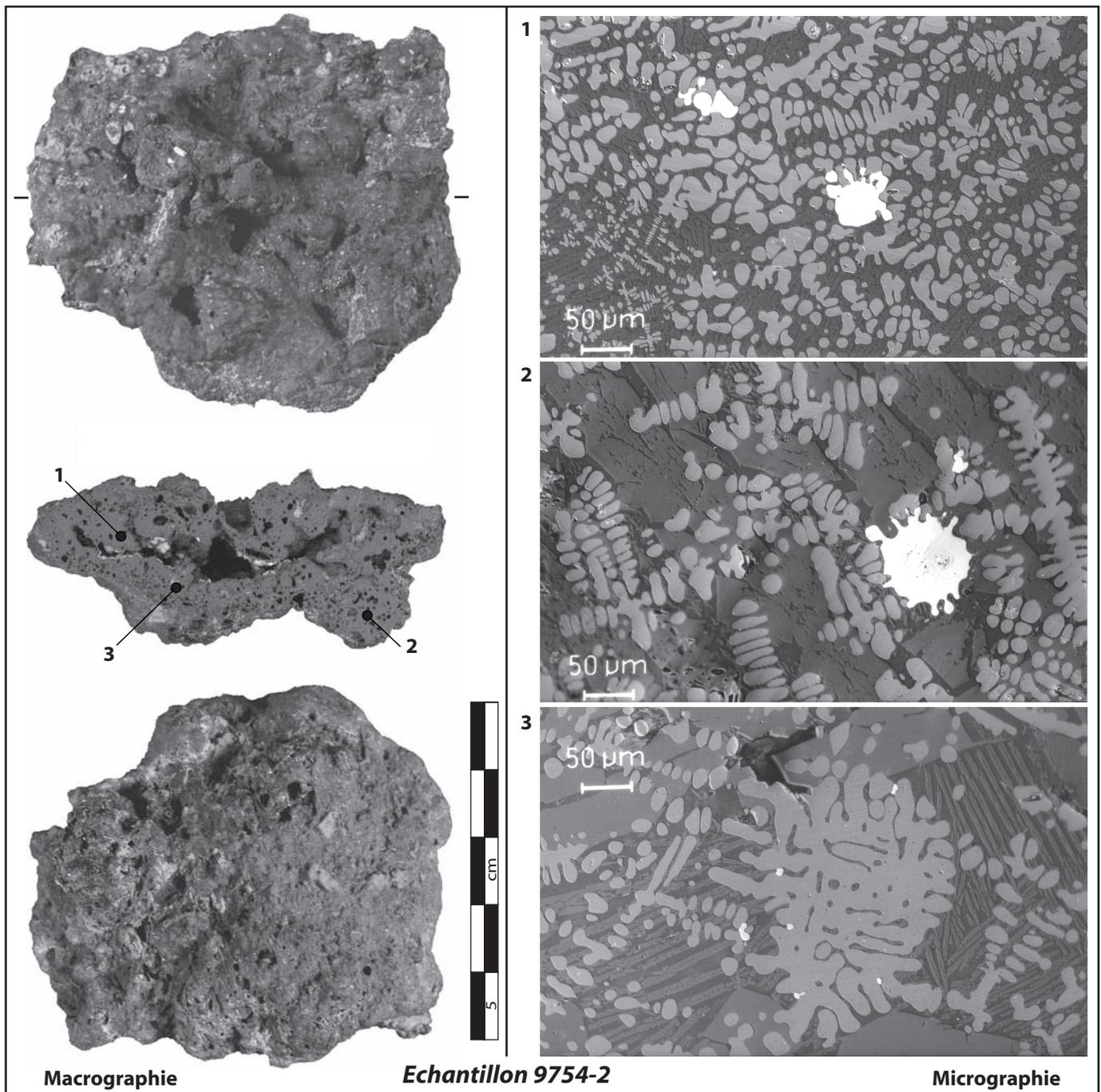


1 : battiture lamellaire dans un bain fayalitique à lattes contenant des dendrites de wustite en cours de formation.

2 : deux petites battitures globulaires dans un bain fayalitique à lattes.

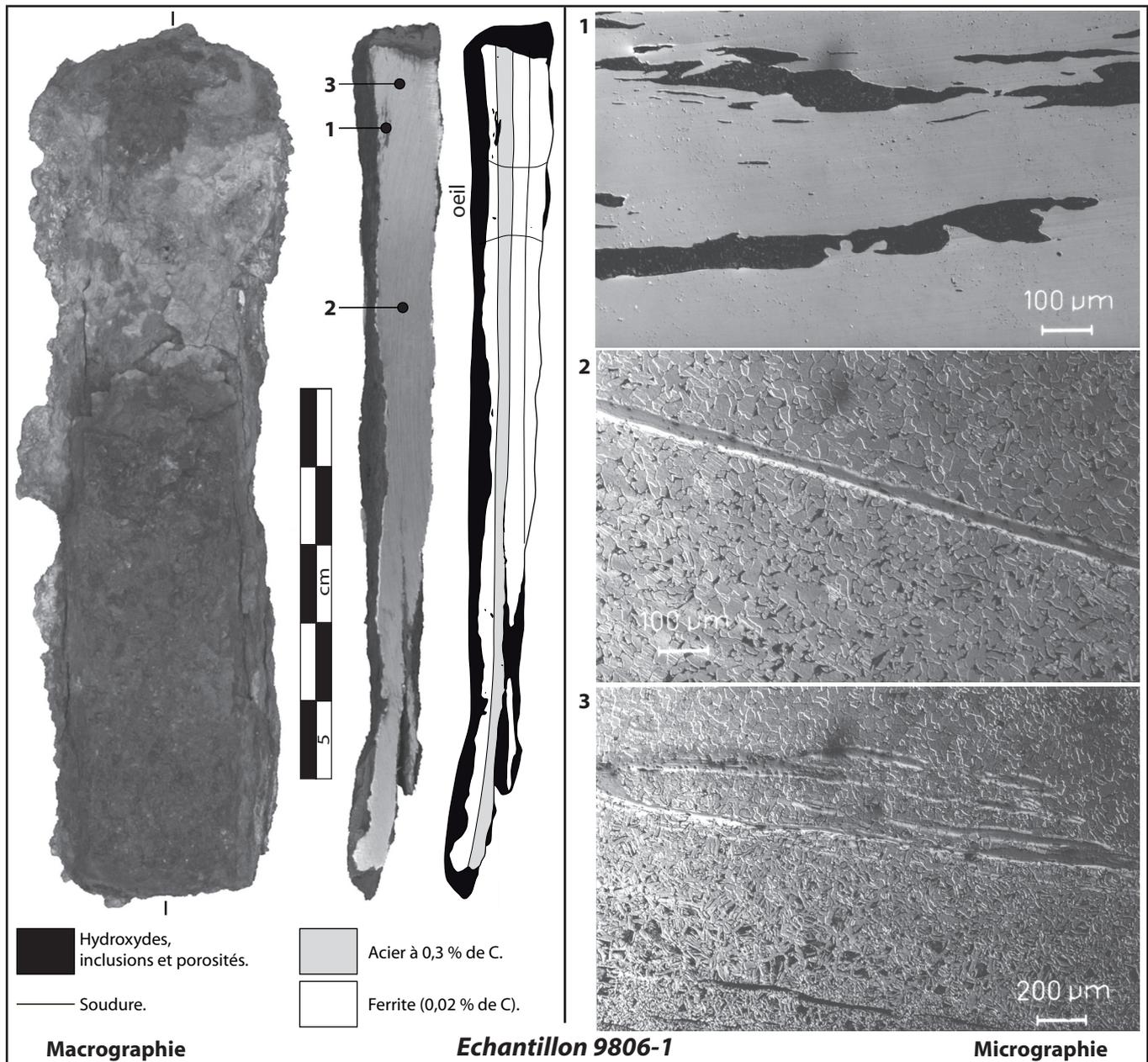
3 : petites pertes métalliques en cours de réoxydation dans un bain fayalitique à lattes contenant des dendrites de wustite en cours de formation.

Fig. 80 : observations métallographiques du culot de forge 9820.4.



1 : bille de métal légèrement réoxydée à chaud dans une matrice fayalitique à lattes avec des globules et des dendrites de wustite.
 2 : bille de métal dans une matrice fayalitique à lattes avec des dendrites de wustite.
 3 : battiture bille et quelques très petites pertes métalliques dans une matrice fayalitique à lattes avec des dendrites de wustite

Fig. 81 : observations métallographiques du culot de forge 9754.2.

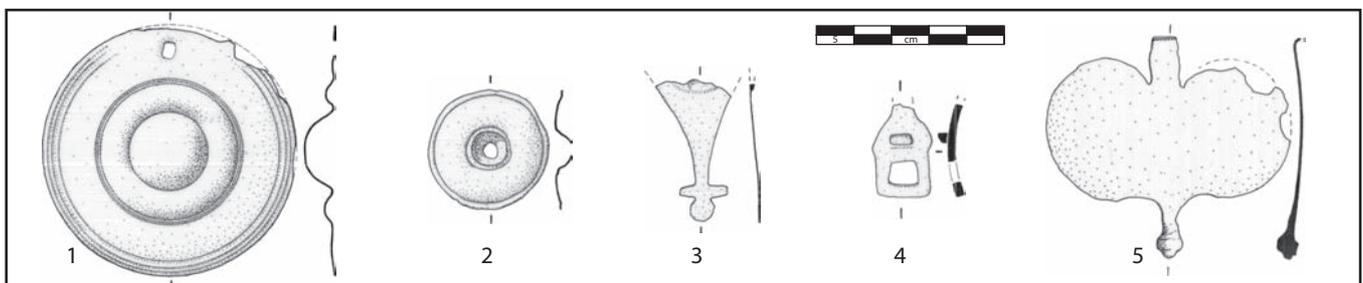


1 : avant l'attaque au Nital, zone avec une mauvaise propreté inclusionnaire où persistent des inclusions fayalitiques – avec des globules de wustite – aux formes écrasées, encore largement ouvertes.

2 : après l'attaque au Nital, soudures, de très belle facture, entre une feuille à 0,1% de C et une autre à 0,3 % de C.

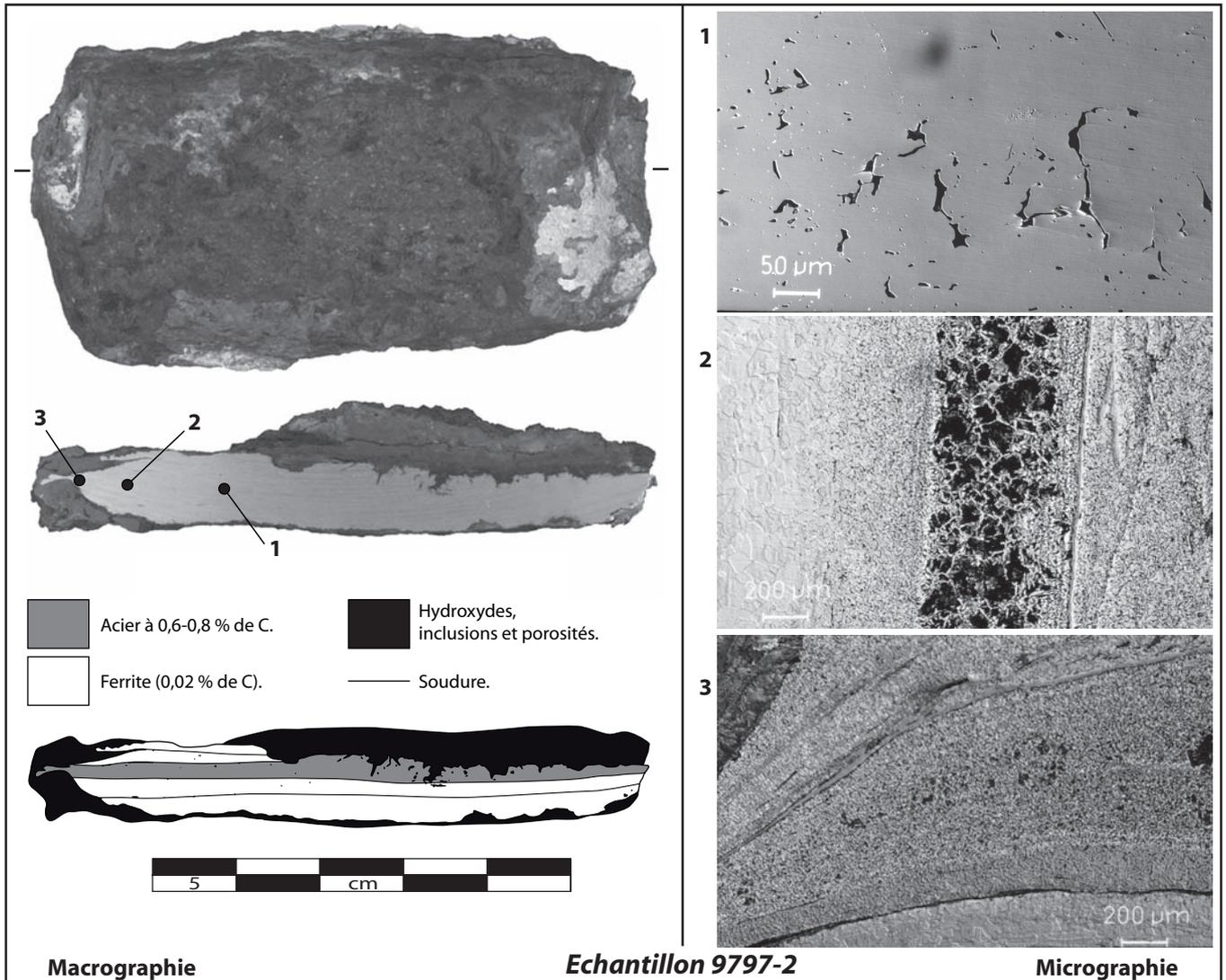
3 : après l'attaque au Nital, zone de soudure entre une feuille ferritique et une autre à 0,3-0,4 % de C

Fig. 82 : observations métallographiques du fragment de bandage de roue 9806.1.



- 1 et 2 : tôles de bronze décorées.
 3 : décor de harnais en bronze.
 4 : élément de harnais en bronze.
 5 : pendant de harnais en bronze.

Fig. 83 : mobiliers de harnachement et autres (dessin J. Chevalier).



1 : avant l'attaque au Nital, inclusions amorphes aux multiples faciès d'écrasements et décobésions inter-granulaires dues aux chocs du martelage.

2 : après l'attaque au Nital, zone de soudure entre une feuille aciérée à 0,5-0,6 % de C et deux feuilles ferritiques.

3 : après l'attaque au Nital, multiples soudures de corroyage entre des feuilles plus ou moins carburées, toutes déformées à chaud.

Fig. 84 : observations métallographiques du demi-produit 9797.2.

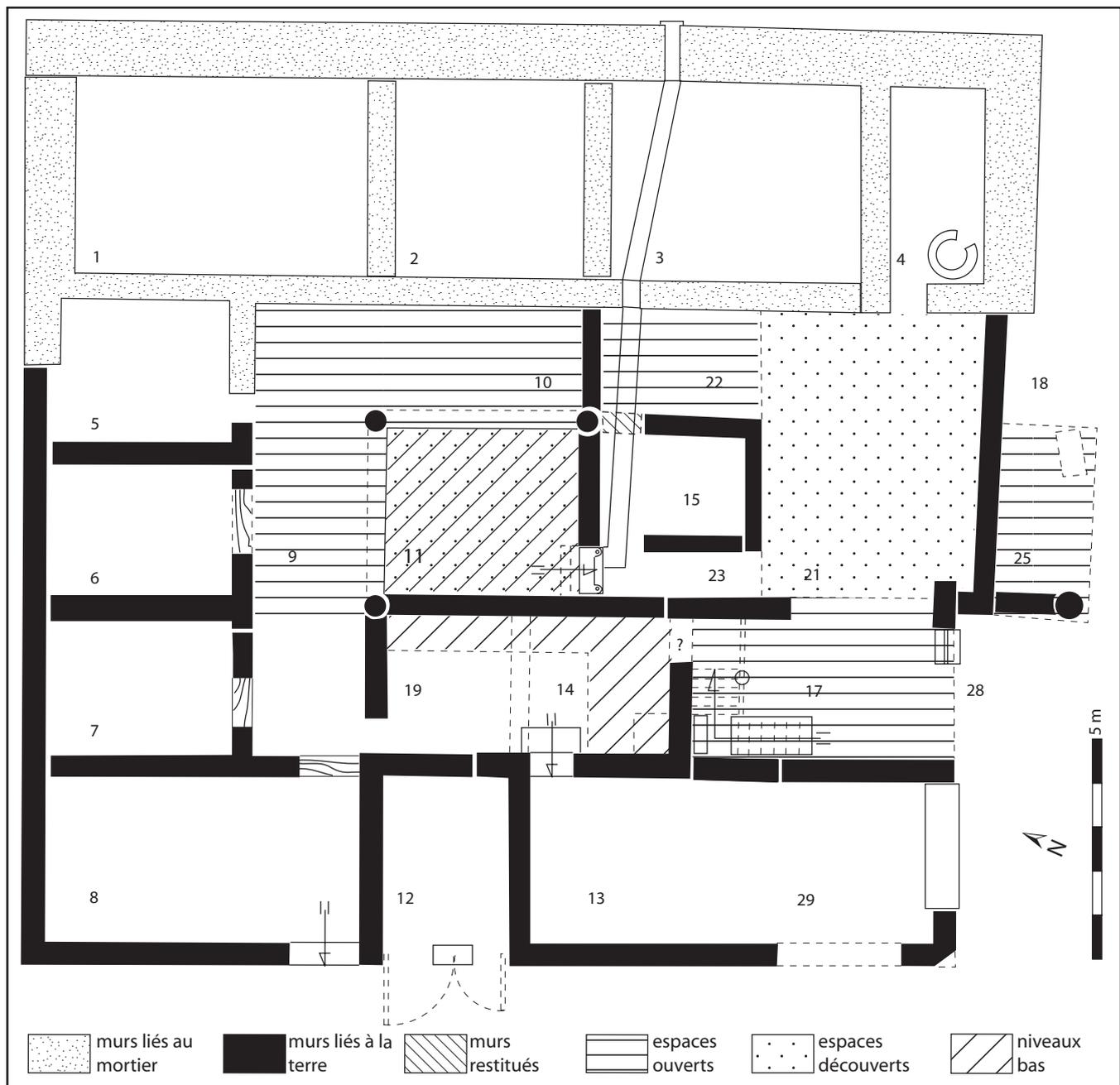
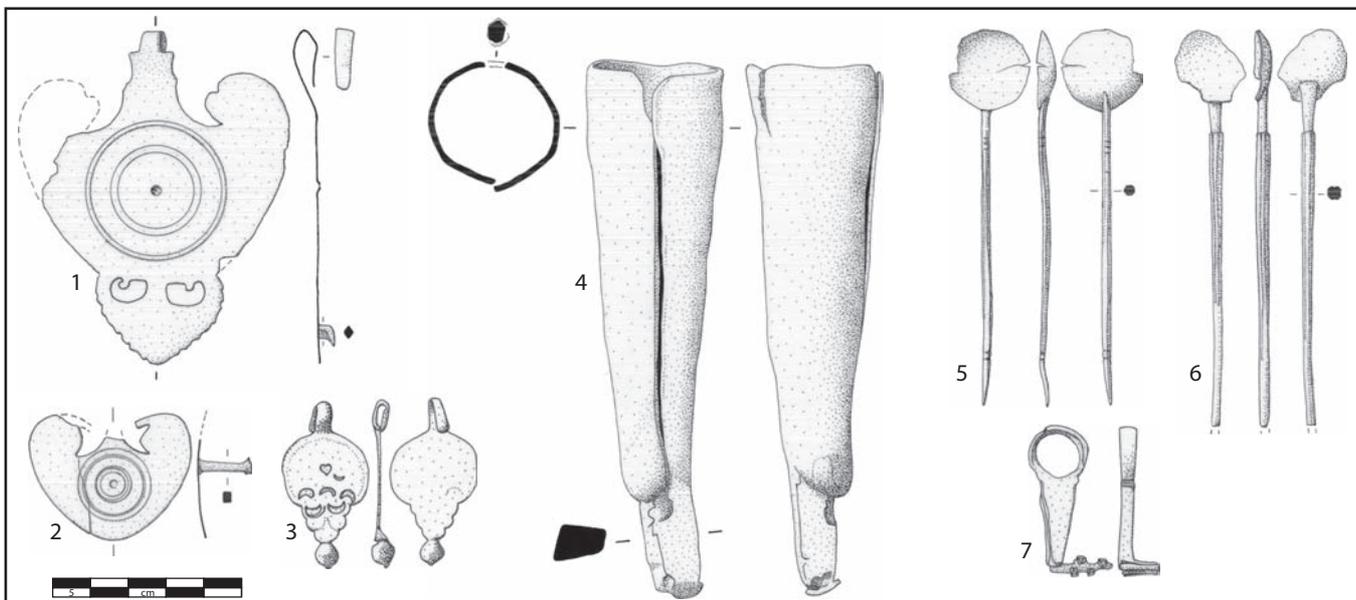


Fig. 85 : plan général de l'îlot (d'après J.-L. Fiches, Y. Manniez, V. Mathieu).

Types de mobilier métallurgique et ferreux		Secteurs																	Total			
		4	6	7	8	9	11	12	13	14	15	17	18	19	21	25	27	28		29		
Scorie	en culot						1								2						3	
	informe						1			1		1							6		9	
	battiture																					
	sous total						2			1		1			2				6		12	
Objet	clou	6	21	80	9	90	65	2	4	6	12	1	4	8	21	7	3	2	6		347	
	tige	3	16	34	11	90	65	2	10	3	7	3	3	5	1	9	5	4	9		280	
	plaque massive					4 (445g)															4	
	plaque fine		1	3		3	14					1			1	1		1			25	
	autres	1 piton 1 clef 1 talon de lance	2 crochets 1 anneau 2 lames 1 talon de lance 1 piton 2 grosses clavettes 1 pêne 1 cerclage de tonneau	1 lame 2 stylets 1 outil avec soie 1 piton 1 fiche d'huissierie 2 anneaux 2 crochets 1 volubis																		42
	ind. et petit	1	24			54	9		2					1	6		8				44	149
	sous total	10	65	137	20	249	164	4	16	9	19	5	8	19	23	25	8	7	59		847	
Total	10	65	137	20	248	176	4	16	10	19	6	8	19	25	25	8	13	59		859		

Fig. 86 : répartition spatiale, en nombre, des types de mobiliers métallurgiques dans l'îlot.



- 1 : pendant de harnais en bronze.
 2 et 3 : bouton et décor de harnais en bronze.
 4 : talon de lance en alliage ferreux.
 5 et 6 : cuillères en bronze.
 7 : clef en alliage ferreux.

Fig. 87 : mobiliers de harnachement, militaire et domestique (dessin J. Chevalier).

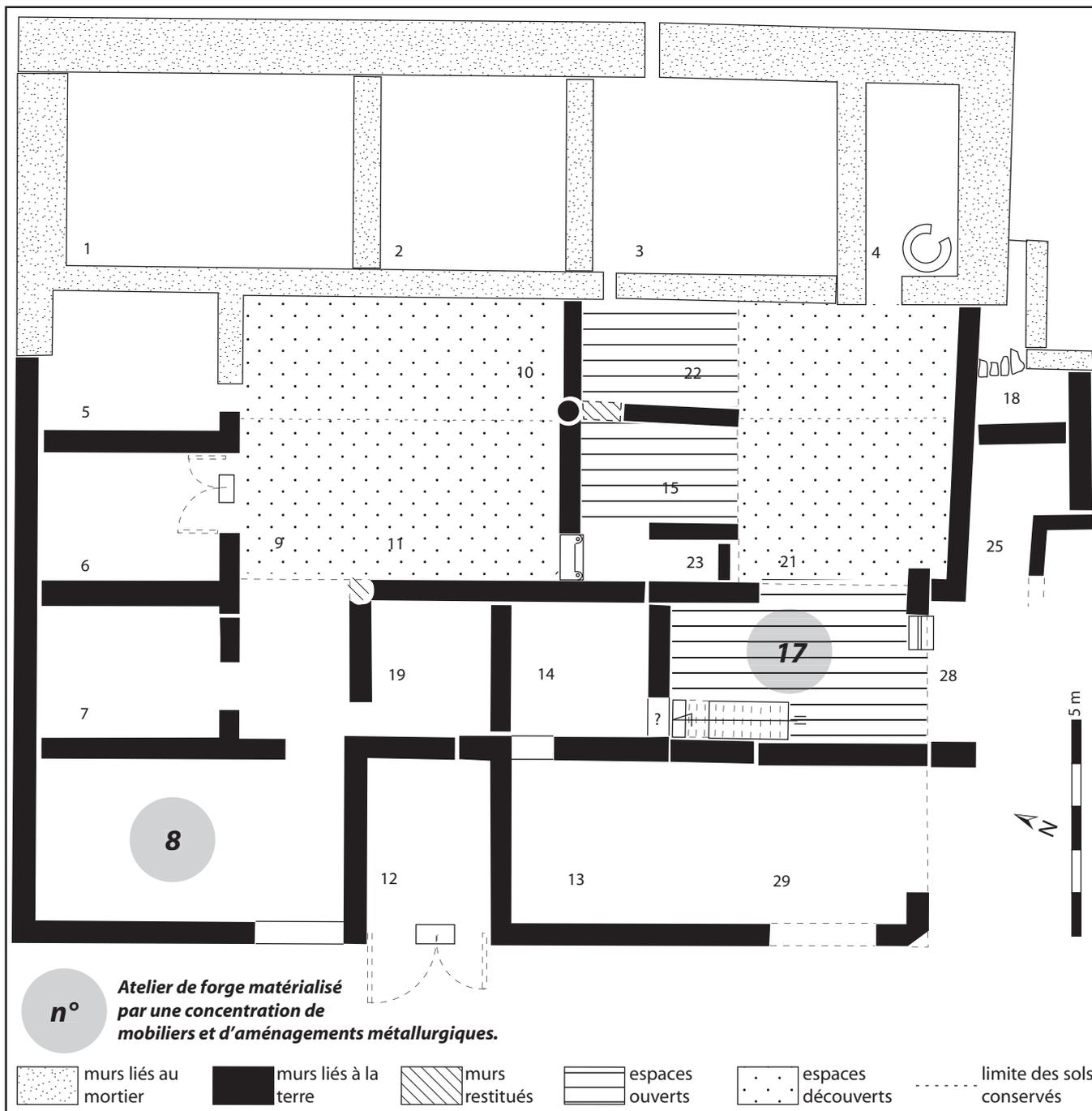


Fig. 88 : plan général de l'îlot et localisation des espaces métallurgiques (d'après J.-L. Fiches, Y. Manniez, V. Mathieu).

Types de mobilier métallurgique et ferreux		Secteurs																	Total	
		3	4	6/7	7	8	11	12	13	14	15	17	19	21	25	27	28	29		autre
Scorie	en culot			3	1	4			1			2			1					12
	informe			9		57	8					207		3	1	3		1		289
	battiture					X						X								
	sous total			12	1	61	8		1			209		3	2	3		1		301
Objet	clou	3	4	8	2	81	50	12	7	81	6	33	70	9	20	1	6	13	34	440
	tige	1	3	30		74	91	12	13	1	1	19	85	1	15	1	8	30	6	391
	frgt de bandage				1 (311g)							1 (149g)								2
	plaque massive						1 (110g)					2 (614g)	1 (110g)	1 (152g)					1 (115g)	6
	plaque fine	1		2	1	19	1					4							5	33
	autres			1 chaîne, 43 clous de chaussure	1 hache 1 herminette 1 chaîne 1 anneau 3 clous de chaussure	1 soie d'épée 1 frgt de lame d'épée 1 pointe de poignard 1 fourreau d'épée 1 rondelle 1 anneau à tige 1 anneau	1 crochet 1 sonnaille 2 agraphes	1 serpe		1 crochet	1 volubis, 1 clavette	1 pointe d'épée 3 frgts de lame d'épée 1 pointe de poignard 2 objets tranchants 1 rondelle 1 chaîne 2 serrureries 1 crochet	2 viroles				1 crochet	1 piton	1 clef	83
	ind. et petit			41		1	13		2	5	1	1	84		6	1	1	47	21	224
	sous total	5	7	125	11	182	160	25	22	88	10	72	242	11	41	3	16	96	63	1179
Total		5	7	137	13	243	168	25	23	88	10	281	242	14	43	6	16	97	63	1480

Fig. 89 : répartition spatiale, en nombre, des types de mobiliers métallurgiques dans l'îlot.

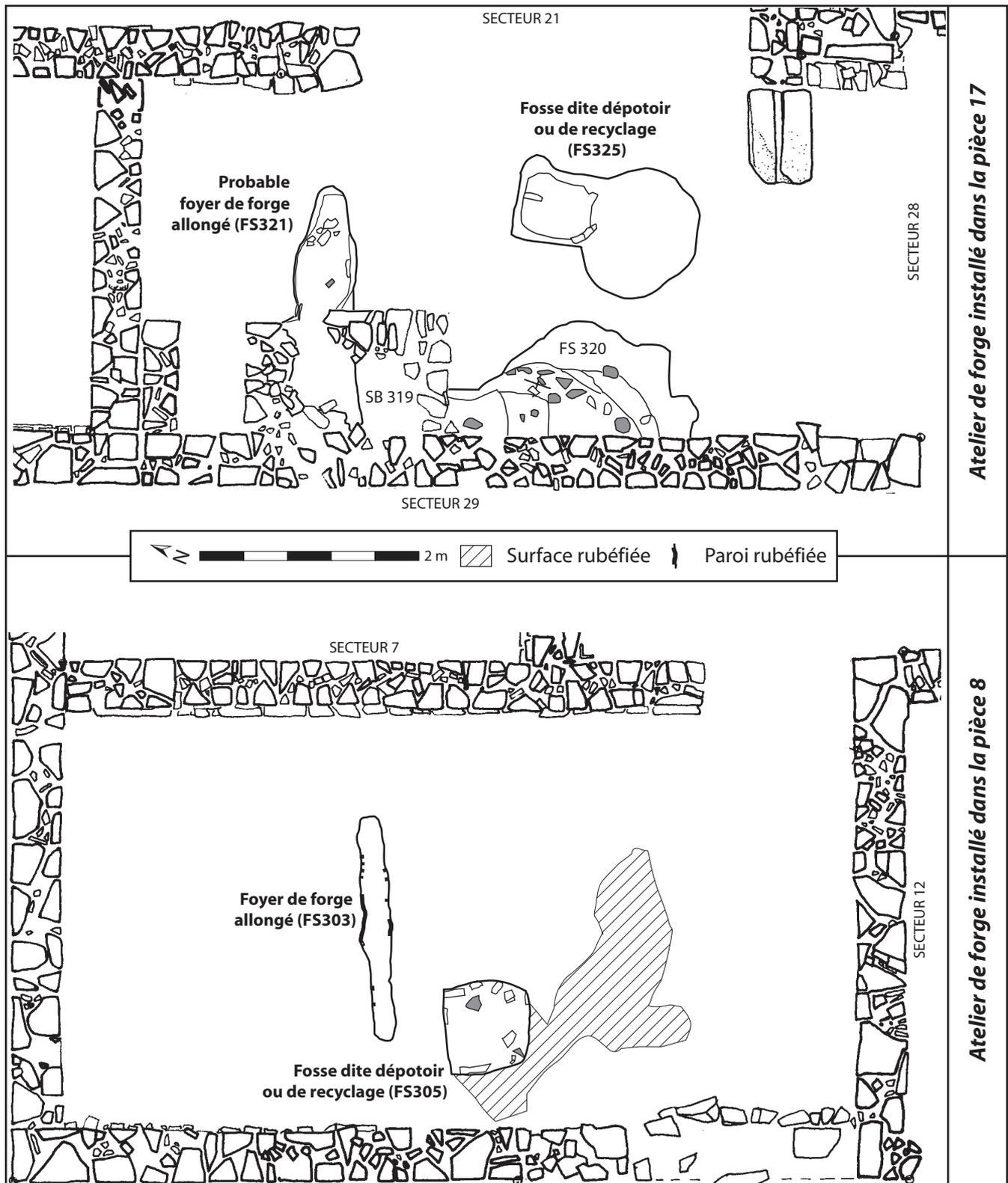
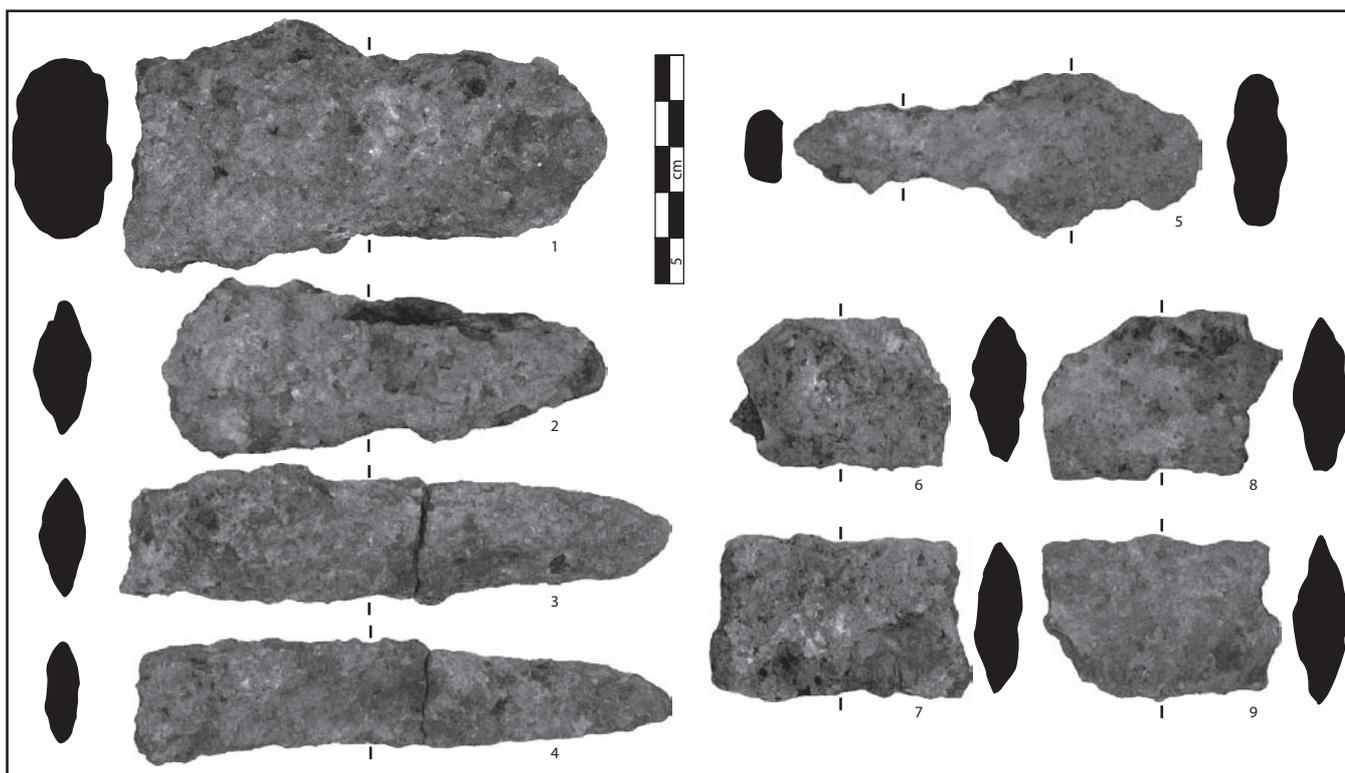
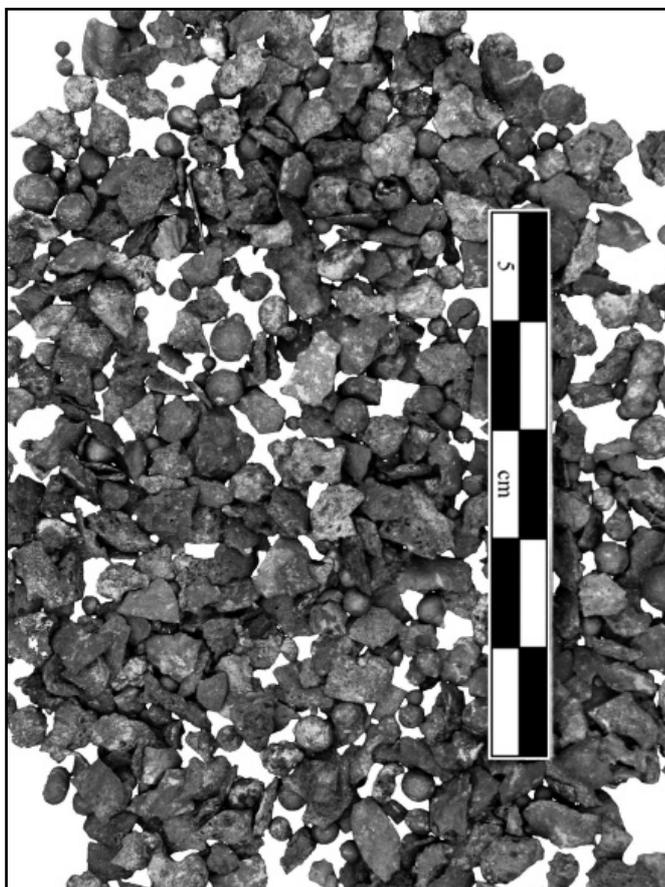


Fig. 90 : plan détaillé des pièces 8 et 17 qui regroupent l'ensemble des vestiges métallurgiques (d'après J.-L. Fiches, Y. Manniez, V. Mathieu).

Con- texte	N°	Prove- nance	L x l x e (mm)	M (g)	Identi- fications	Synthèse des observations métallographiques	Interprétations
<i>atelier de forge abrité dans la pièce 8</i>	9081-2	6/7	75 x 70 x 35	148	culot	La morphologie et l'observation macrographique de la section présentent des caractères identiques aux autres culots analysés de la pièce 6/7. Pour ces raisons, il n'y a pas eu d'observation à l'échelle micrographique.	Forgeage réalisé de moyenne à haute température, avec de faibles amplitudes : travaux homogènes essentiellement tournés vers la chauffe d'objets.
	9081-1		80 x 55 x 35	140		Matrice fayalitique homogène et poreuse contenant des globules et des dendrites de wustite principalement issus de nombreuses battitures, essentiellement globulaires. Les pertes en métal sont peu importantes, petites et légèrement réoxydées.	
	9081-3		80 x 55 x 25	167			
	9103-1	7	135 x 45 x 12	311	fragment de bandage	Plaque formée d'au moins cinq feuilles essentiellement ferritiques et très correctement épurées. Par endroit, l'ensemble est profondément cémenté. A une extrémité, elle possède un biseau. L'autre extrémité est munie d'un œil central percé à chaud à partir des deux faces.	Fragment de bandage préparé de manière à être soudé, du côté biseauté, et fixé avec un rivet, à l'autre extrémité.
	9468-1	8	50 x 50 x 6	118	rondelle	Assemblage de trois feuilles ferritiques et d'une autre aciée (0,3 % de C) en périphérie.	Rondelle dont une des faces est peut-être volontairement durcie par une feuille aciée.
<i>atelier de forge abrité dans la pièce 17</i>	9513-2	17	90 x 85 x 29	208	culot	Matrice fayalitique homogène et poreuse contenant des globules et des dendrites de wustite principalement issus de nombreuses battitures, essentiellement globulaires. Les pertes en métal sont peu importantes, petites et légèrement réoxydées.	Forgeage réalisé de moyenne à haute température, avec de faibles amplitudes : travaux homogènes essentiellement tournés vers la chauffe d'objets.
	9513-1		100 x 75 x 10	305	assemblage de tôles	Assemblage défectueux entre deux feuilles correctement compactées de natures différentes. L'une est ferritique, l'autre est aciée à 0,4 % de C. L'ensemble est enrobé de battitures lamellaires et de scories.	Loupé de forge dû à une soudure défectueuse.
	9513-3		113 x 90 x 11	202	outil plat tranchant	Assemblage par la tranche d'une fine feuille ferritique et d'une autre aciée entre 0,3 et 0,8 % de C. Le tout, très correctement épuré, reflète une grande maîtrise technique, même si la soudure est localement défectueuse.	Probablement outil fin et tranchant abandonné à cause d'une soudure défectueuse.
	9513-4		173 x 42 x 15	149	fragment de bandage	Plaque très corrodée, formée de quatre feuilles, dont une, en périphérie, est aciée à 0,5 % de carbone. Le reste est ferritique.	Fragment de bandage qui possède une surface externe aciée.
	9513-5		139 x 14 x 11	102	applique ou crochet	Assemblage de nombreuses feuilles ferritiques à la propreté inclusionnaire médiocre.	Objet pourtant en ferrite, étant très peu épuré. Le non-soin accordé à l'épuration semble donc volontaire.
	9513-6		56 x 27 x 10	20	outil tranchant	Masse brute aciée (de 0,3 à 0,6% de C) correctement épurée.	Seul objet, probablement tranchant, composé à partir d'une masse brute essentiellement aciée.

Fig. 91 : bilan répertorié des analyses métallographiques.

Fig. 92 : échantillon de battitures lamellaires et en bille provenant du comblement de la fosse dite dépotoir ou de recyclage FS325, localisée dans la pièce 17.



1 : fourreau d'épée.

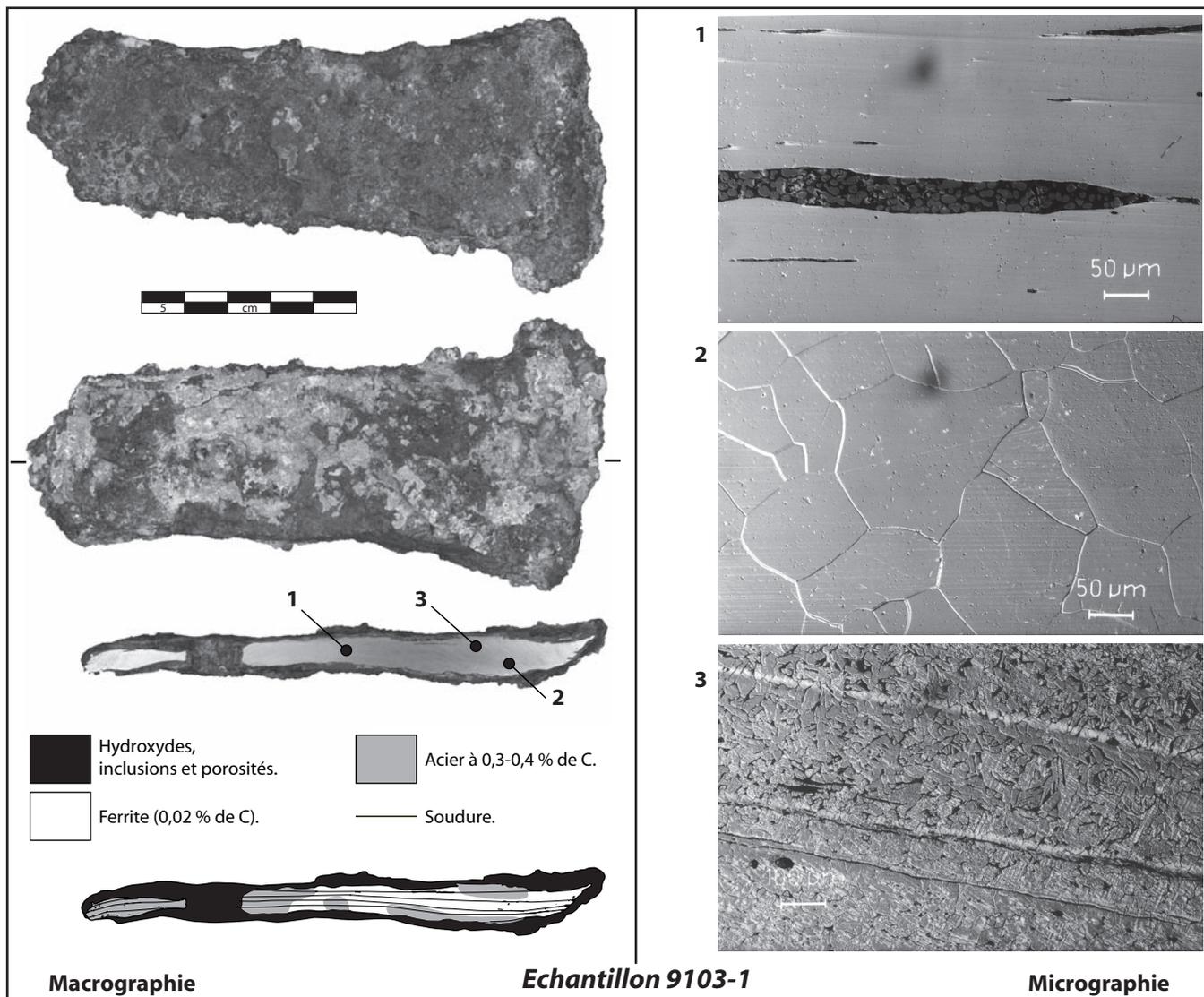
2 : partie distale d'épée.

3 et 4 : parties distales de poignard.

5 : zone de jonction entre la poignée et la lame d'une épée.

6 à 9 : lames d'épées.

Fig. 93 : fragments d'armes découverts dans le comblement des fosses métallurgiques FS305 (pièce 8) et FS325 (pièce 17).

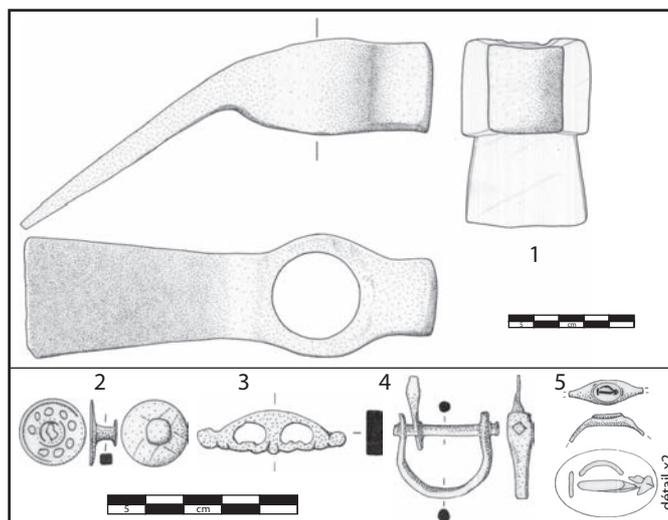


1 : avant l'attaque au Nital, alignements d'inclusions plus ou moins écrasées et remplies de fayalitique et de globules de nüstite.

2 : après l'attaque au Nital, ferrite équiaxe à 0,02 % de C.

3 : après l'attaque au Nital, trois soudures de corroyage dans une zone de cémentation matérialisée par un dégradé d'un acier à 0,1-0,2 % de C à la ferrite à 0,02 % de C.

Fig. 94 : observations métallographiques du fragment de bandage de roue 9103.1.



- 1 : herminette en alliage ferreux.
- 2 et 3 : bouton et élément de harnais en bronze.
- 4 : boucle de ceinture militaire.
- 5 : bague décorée en bronze.

Fig. 95 : mobiliers de harnachement, militaire et domestique (dessin J. Chevalier).

4. LE ROC DE PAMPELUNE (ARGELLIERS, 34) AU VI^E SIÈCLE



Fig. 96 : carte de localisation du site.

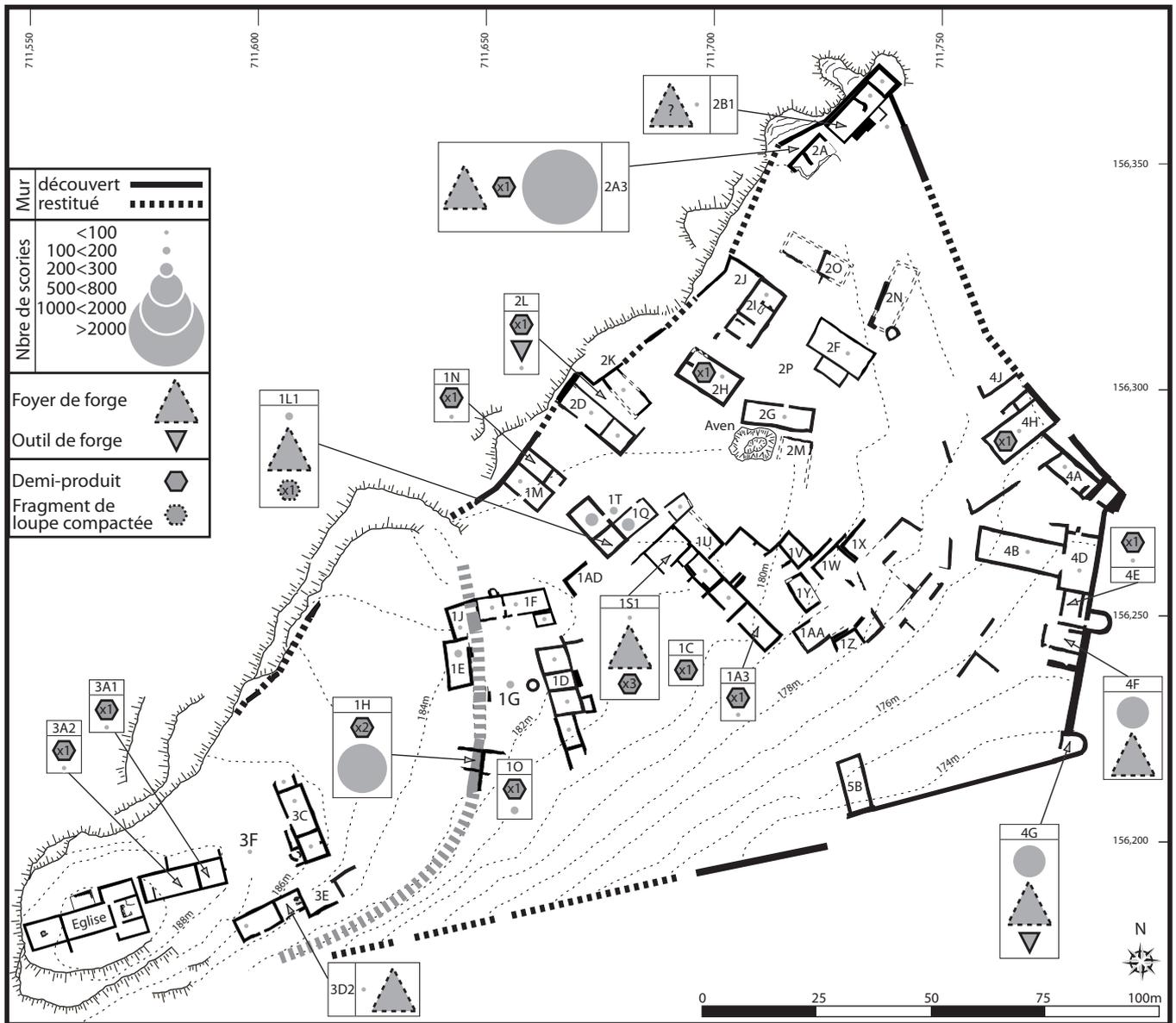


Fig. 97 : plan général du site et localisation des découvertes métallurgiques (d'après L. Schneider et G. Marchand).

Types		Quartiers												nord-oriental (N°2)									
		central (N°1)						suite															
forge du bâtiment 1L		pièce 1L1		pièce 1L2		devant (1T+1Q)		sous-total		forge temporaire du bâtiment 1S1		autres espaces		sous-total		dépotoir métallurgique 2A3		autres espaces		sous-total			
		nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)
Scores		4	495	14	1328	13	1495	31	3318	1	352	70	12601	102	16271	27	6241			27	6241	27	6241
en culot		92	1373	184	2385	329	5784	605	9542	6	142	303	11996	914	21680	1077	17700	160	9937	1237	27637	1237	27637
informes		1	10			31	535	32	545			29	181	61	726	426	5959	1	13	427	5972	427	5972
coulées		3	15	38	294	9	103	50	412			1	28	51	440	602	4450			602	4450	602	4450
peu denses		28	780			14	237	42	1017			13	584	55	1601	34	939	4	30	38	969	38	969
pseudo-gromps ou gromps		25	208	38	296	7	69	70	573	21	896	6	59	97	1528	145	1357			145	1357	145	1357
parois rubéfiées		153	2881	274	4303	403	8223	830	15407	28	1390	422	25449	1280	42246	2311	36646	165	9980	2476	46626	2476	46626
sous-total																							
demi-produits										3	269	4	381	7	650	1	101	2	448	3	549	3	549
loupes		1	190					1	190					1	190								
outils forge																							
petites plaques ouvragées		1	50													16	54						
tiges																39	172						
clous		4	25													31	256						
chutes informes		8	40					1	314							23	199						
tranchants																4	218						
autres																3	269						
sous-total		14	305					1	190	4	583	5	565	9	1024	117	1269	2	448	3	549	3	549
Total		167	3186	274	4303	403	8223	831	15597	32	1973	427	26014	1289	43270	2428	37915	167	10428	2479	47175	2479	47175
Objets Ferreux																							

Fig. 98/1 : répartition spatiale, en nombre et en masse, des types de mobiliers métallurgiques dans le site (n°1).

↑		Quartiers																																							
		sommital ou sud-occidental (N°3)										sud-oriental (N°4)																													
Types	forge du bâtiment 3D	épandages derrière le rempart-terrasse isolant le quartier sommital				autres espaces	sous-total	forge de la tour 4G	forge du bâtiment 4F	autres espaces	sous-total	Total																													
		pièce 3D1	pièce 3D2	sous-total	1E								1J	1H	sous-total																										
	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)																					
↑	suite																																								
	Scories	en culot	10	2677	1	702	13	1877	8	1428	42	5948	63	9253	22	2885	96	15517	15	1802	35	4288	26	3180	76	9270	301	47299													
		informes	22	784	39	1089	80	4622	54	1336	1065	13289	7199	19247	69	1894	1329	23014	214	2846	370	8192	155	3806	739	14844	4219	87175													
		coulées			17	204	1	10	1	28	61	561	63	599	11	118	91	921	485	3158	75	804	17	298	577	4260	1156	11879													
		peu denses									93	632	93	632			93	632									746	5522													
		pseudo-gromps ou gromps					3	246	4	280	14	600	21	1126	8	158	29	1284	26	630	44	1166	7	125	77	1921	199	5775													
		parois rubéfiées	1	50	11	86	12	136	1	22	8	107	41	353	50	67	67	685	33	145	44	433	22	263	99	841	408	4411													
		sous-total	33	3511	68	2081	101	5592	98	6777	75	3179	1316	21383	1489	31339	115	5122	1705	42053	773	8581	568	14883	227	7672	1568	31136	7029	162061											
		demi-produits									2	60	2	60	2	106	4	166										2	130	16	1495										
		loupes																												1	190										
outils de forge																														2	610	3	794								
↑	suite																																								
	Objets ferreux	petites plaques ouvragées																																							
		tiges																																							
		clous			2	11																																			
		chutes informes																																							
		tranchants			1	22																																			
		autres			1	19																																			
		sous-total			4	52						2	60	2	60	2	106	4	166																						
		Total	33	3511	72	2133	101	5592	98	6777	75	3179	1318	21443	1491	31399	117	5228	1709	42219	782	9254	568	14883	228	7727	1571	31801	7049	164540											

Fig. 98/2 : répartition spatiale, en nombre et en masse, des types de mobiliers métallurgiques dans le site (n°2).

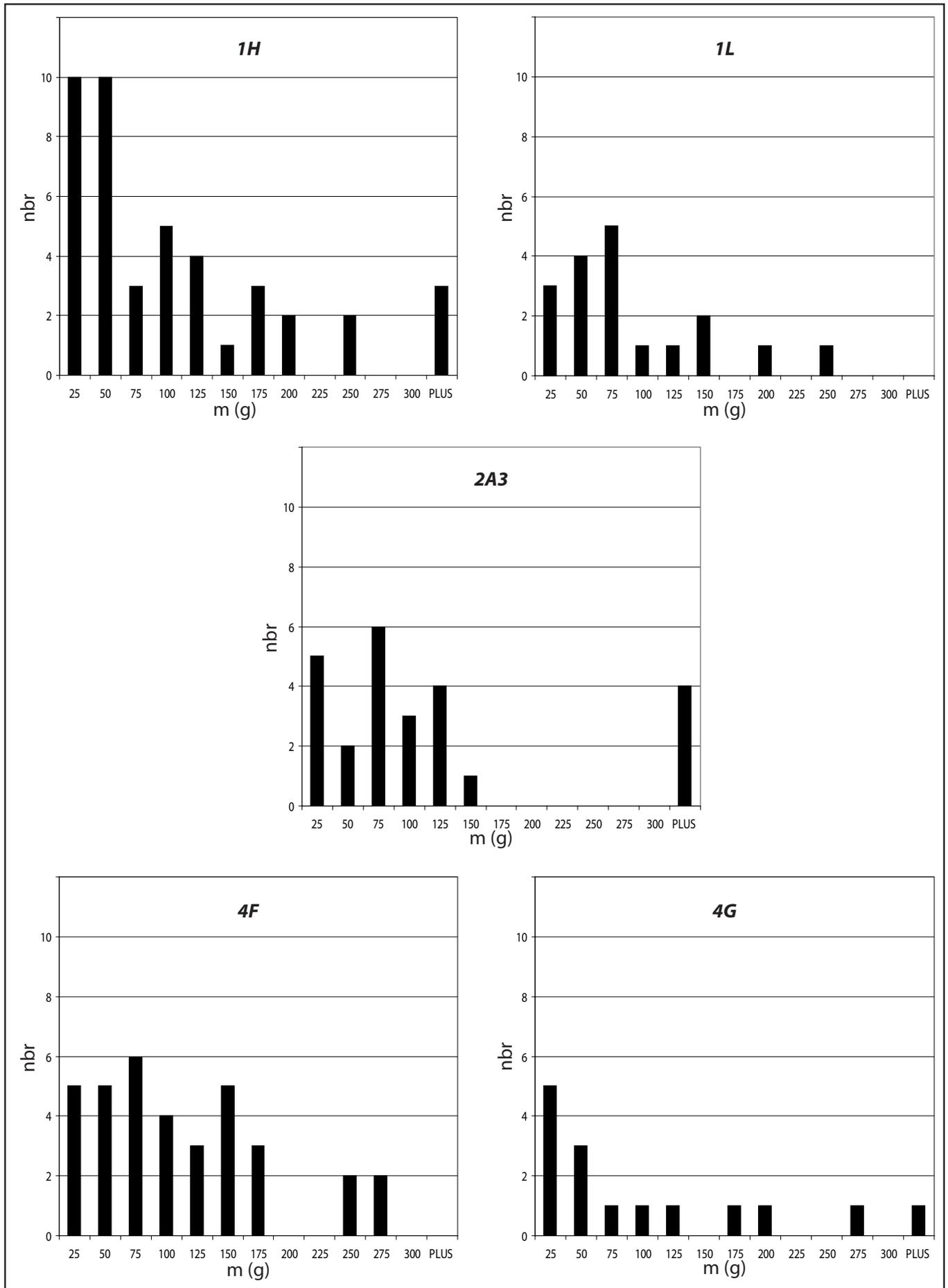


Fig. 99 : distribution, par classes de masse, des culots des différents espaces métallurgiques.

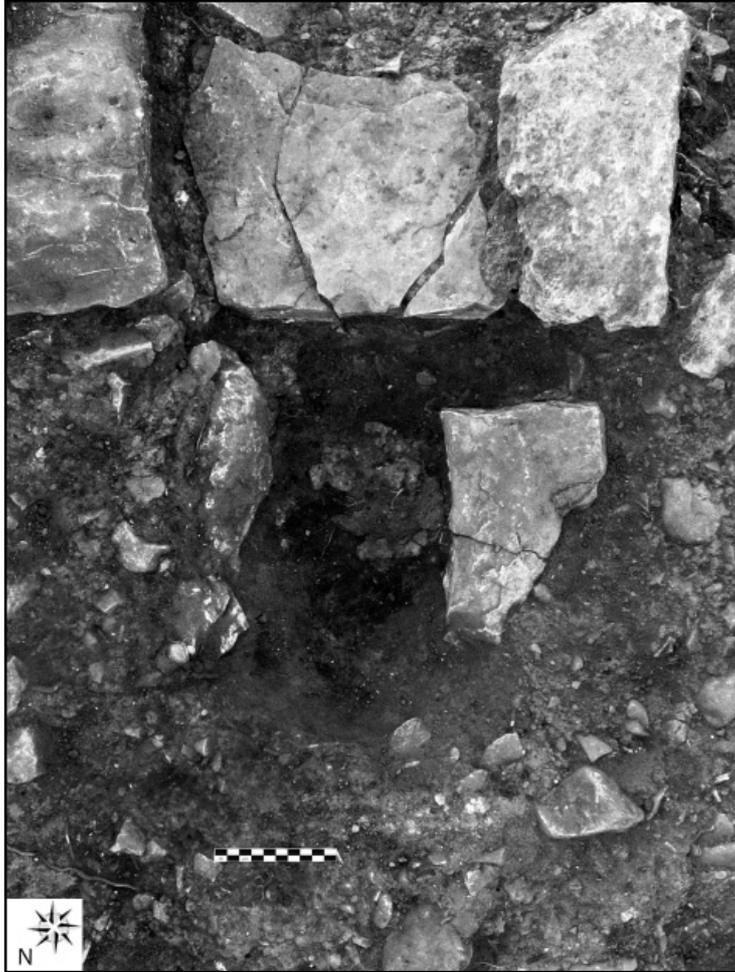


Fig. 100 : le foyer de forge temporaire établi dans les niveaux de fondation du bâtiment 1S1.

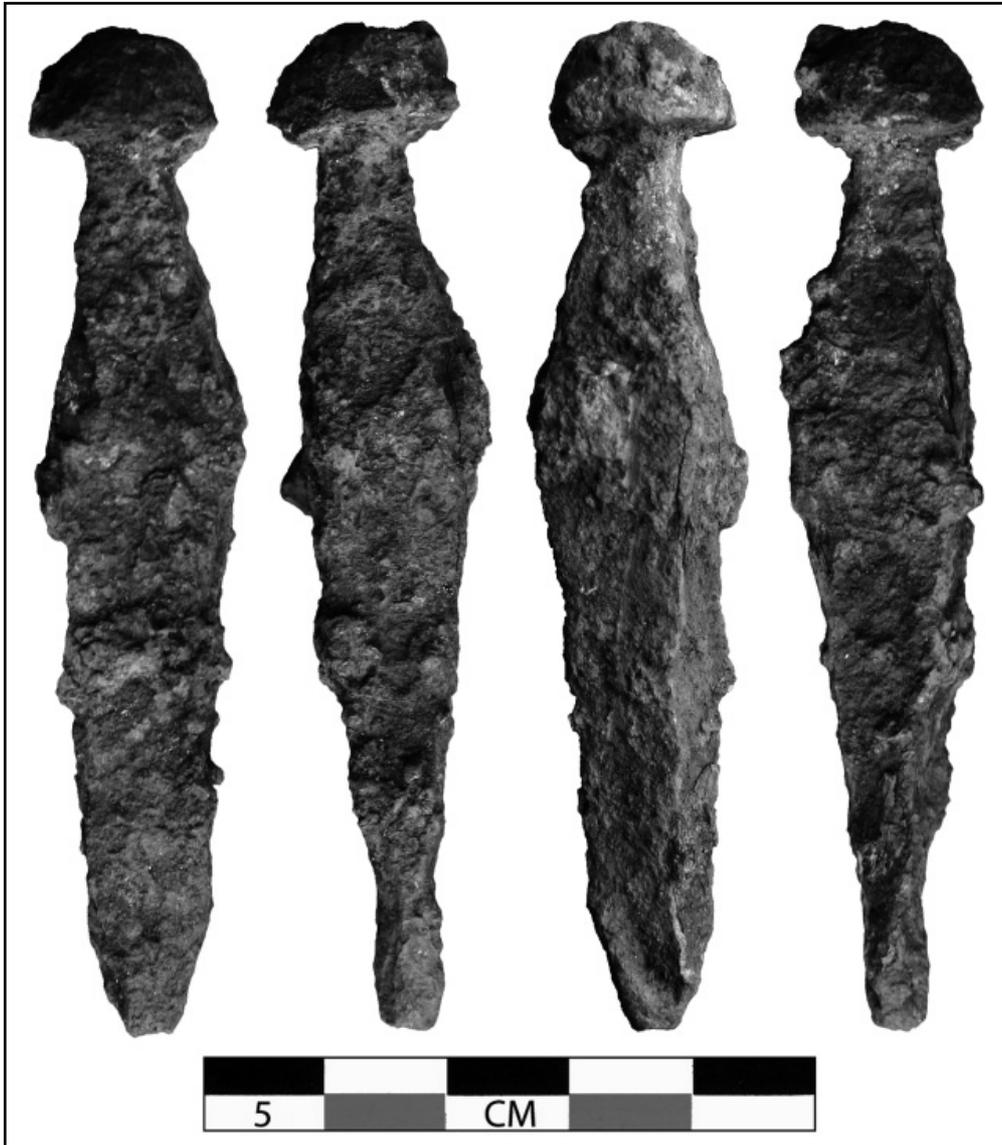


Fig. 101 : poinçon à manche biconique surmonté d'une tête mycomorphe (US4309, tour 4G).

Sec-teurs	N°	L x l x e (mm)	M (g)	Identi-fications	Synthèse des observations métallographiques	Interprétations
4G	4309.1	72 x 38 x 27	452	<i>matrice</i>	Masse métallique parallélépipédique constituée d'une structure en mille-feuille avec une succession de feuilles aciérées et d'autres ferritiques. D'une manière générale, celles ferritiques sont plus présentes dans le coeur, tandis que celles aciérées se trouvent préférentiellement en périphérie. 3 orifices coniques borgnes (fait à chaud) munissent les 2 faces principales opposées.	Matrice composée d'orifices coniques borgnes de différentes formes. Corps en acier et en ferrite permettant à la fois à la matrice de ne pas se déformer, mais aussi d'encaisser les chocs.

Fig. 102 : bilan de l'analyse métallographique de la matrice 4309.1 (tour 4G).

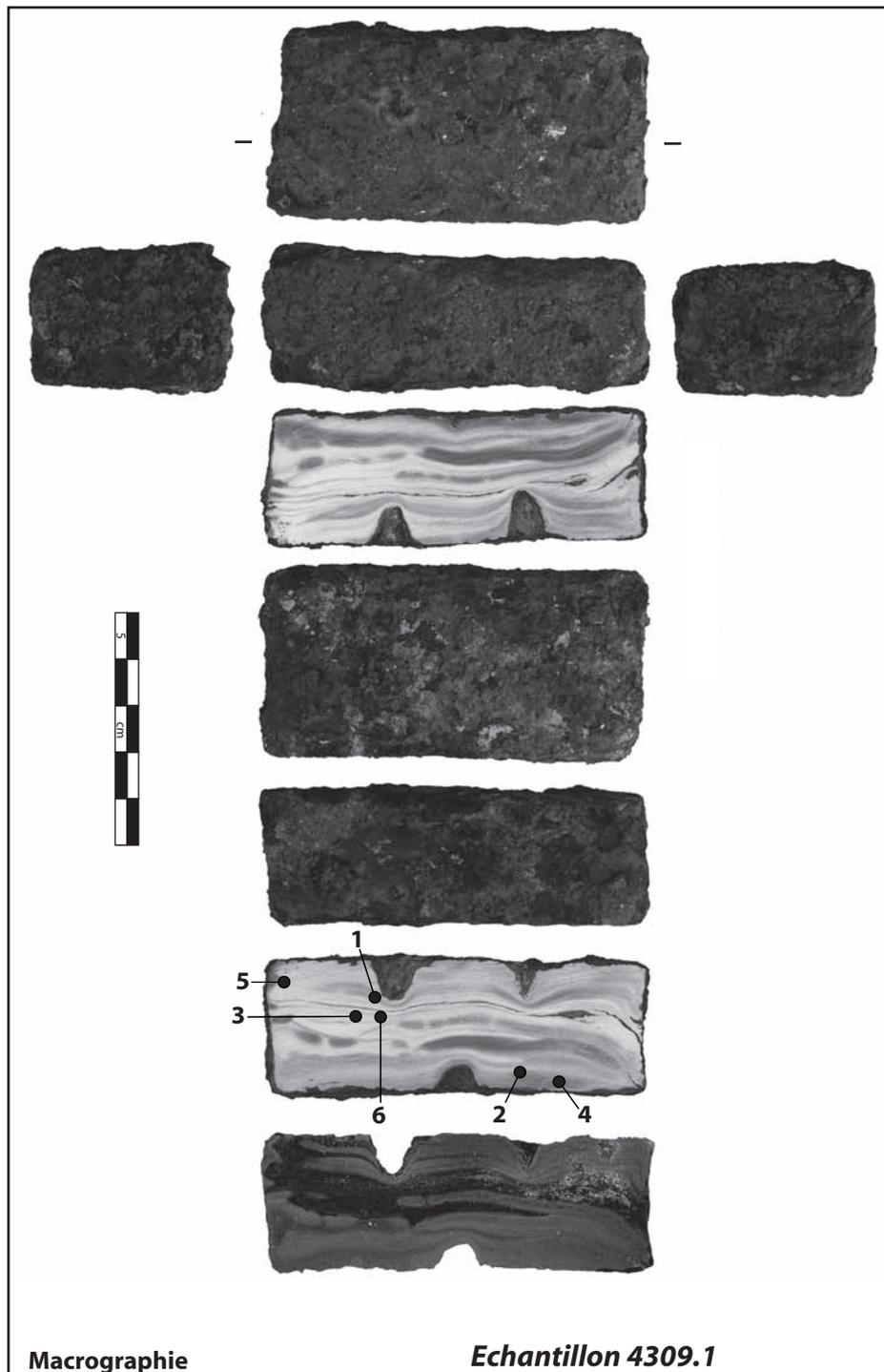
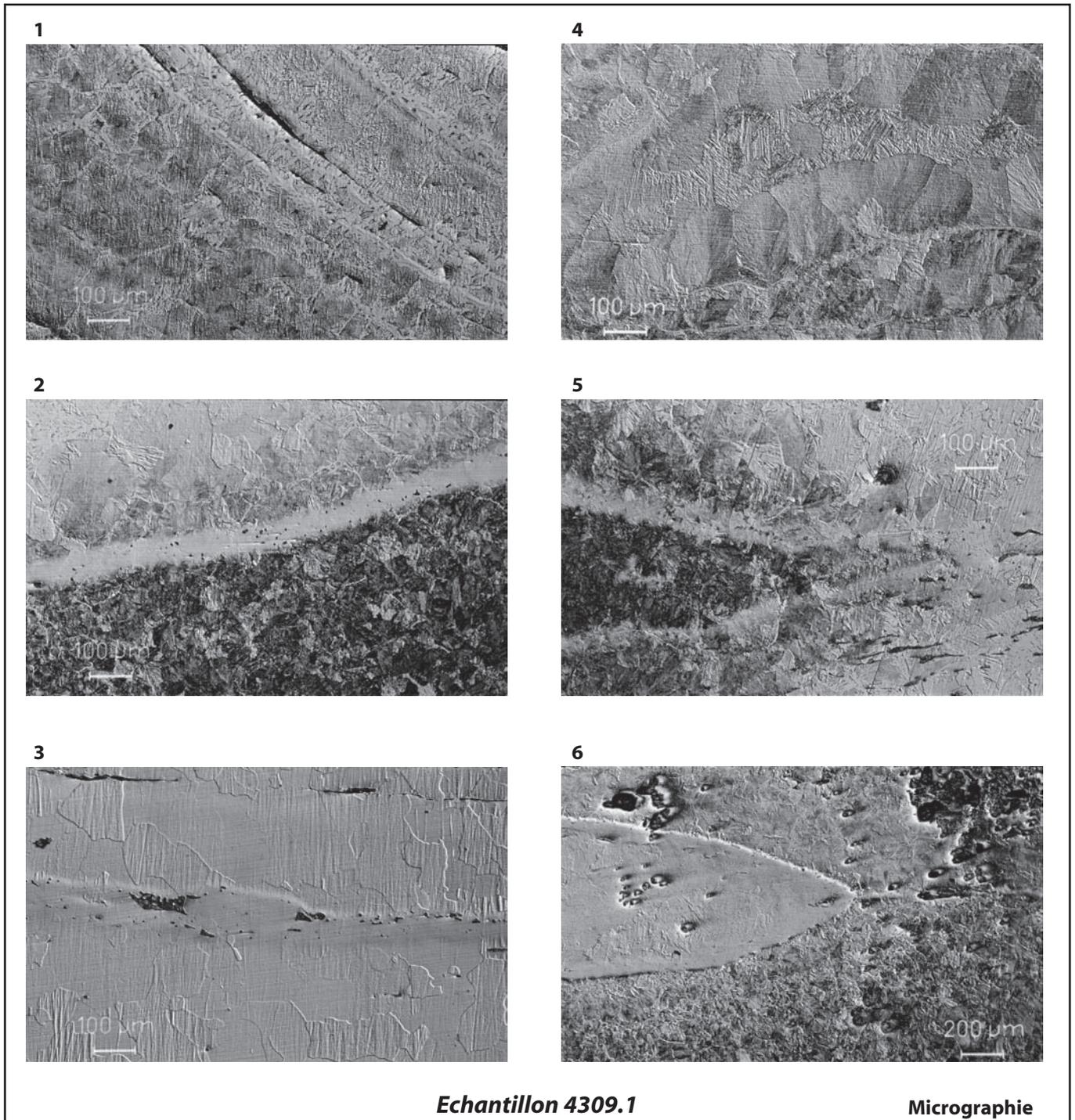


Fig. 103/1 : observations métallographiques de la matrice 4309.1 (tour 4G) (macrographie).



1 : après l'attaque au Nital, déformation du corroyage au fond d'un des orifices coniques borgnes dans un acier variant entre 0,4 et 0,5 % de C, selon les feuilles.

2 : après l'attaque au Nital, soudure entre un acier trempé à 0,7-0,8 % de C et un acier à 0,5 % de C.

3 : après l'attaque au Nital, soudure de corroyage dans une ferrite équiaxe.

4 : après l'attaque au Nital, acier trempé à 0,7-0,8 % de C (bainite nodulaire).

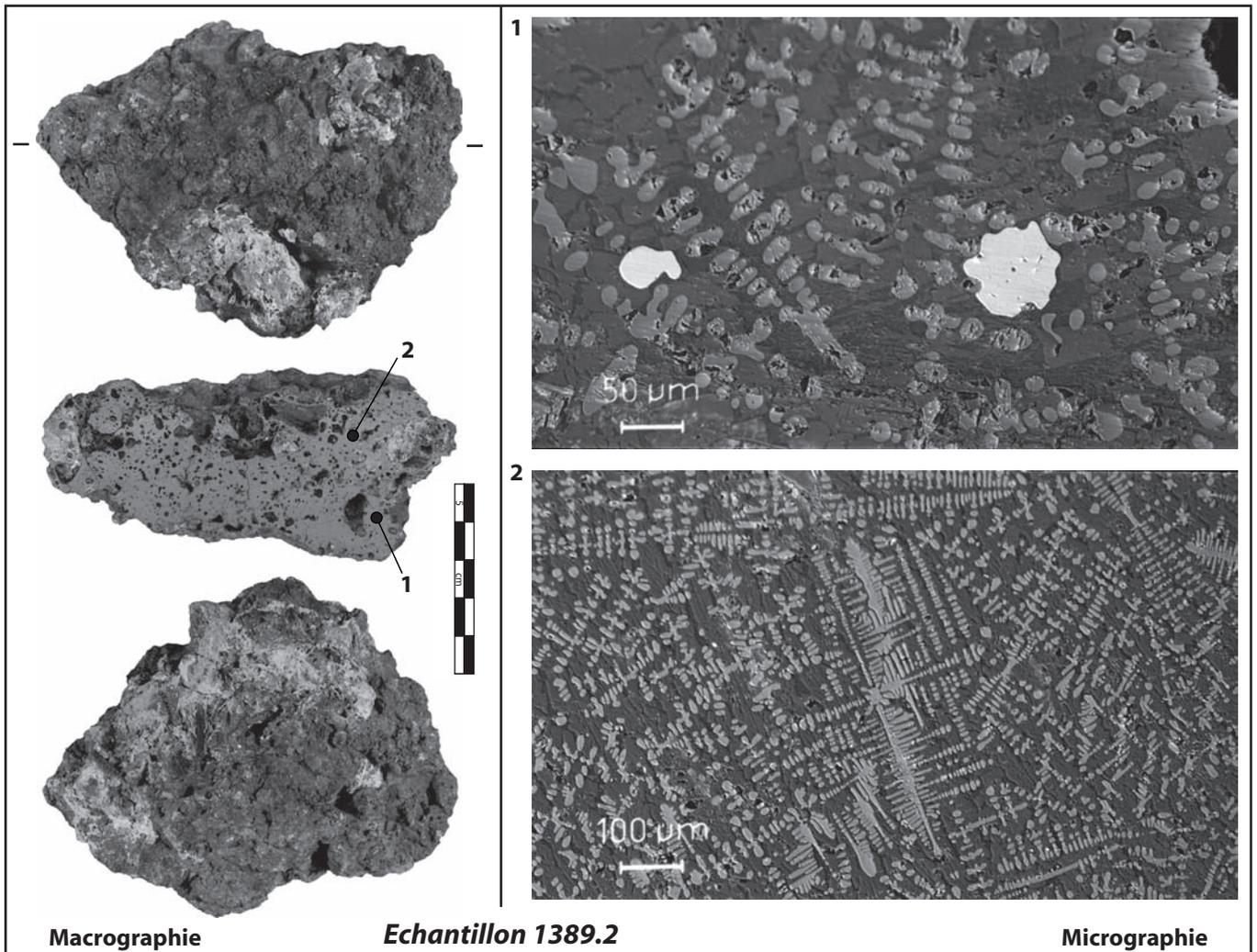
5 : après l'attaque au Nital, fantôme d'une soudure en gueule de loup entre un acier entectoïde trempé et de la ferrite.

6 : après l'attaque au Nital, soudure en gueule de loup dans un métal essentiellement ferritique corrodé.

Fig. 103/2 : observations métallographiques de la matrice 4309.1 (tour 4G) (micrographie).

Con- texte	Sec- teurs	N°	L x l x e (mm)	M (g)	Identi- fications	Synthèse des observations métallographiques	Interprétations	
<i>Forge installée dans un bâtiment du quartier sommital (3D2) et rejetant ses déchets en contrebas (1H)</i>	3D2	3348.1	120 x 100 x 55	707	culot	Matrice hétérogène constituée d'un mélange de matières organiques, siliceuses (grains de sable) et de fayalite avec des globules de wustite. De nombreuses battitures lamellaires, mais surtout de nombreux fragments métalliques sont visibles.	Cycles thermiques hétérogènes à basse température accompagnés d'importants ajouts et de nombreuses pertes en métal et en oxyde.	
		1389.1	97x 81 x 42	456		Matrice fayalitique homogène avec beaucoup de globules de wustite. De nombreuses pertes métalliques légèrement réoxydées sous des formes de billes et de fragments sont visibles à côté de battitures globulaires.	Cycles thermiques généralement homogènes à moyenne ou haute température accompagnés de très nombreuses pertes en métal (généralement ferrite parfois encore écrouie) possédant une très bonne qualité inclusionnaire. Les pertes en oxyde sont également nombreuses, sous les formes lamellaires et globulaires.	
		1389.3	79 x 62 x 31	184		Matrice fayalitique homogène avec beaucoup de globules de wustite. De nombreuses pertes métalliques légèrement réoxydées sous des formes de billes et de fragments sont visibles à côté de battitures uniquement lamellaires. Les fragments métalliques, parfois de tailles relativement importantes, possèdent une bonne qualité inclusionnaire et présentent de multiples plans de frappe et des formes anguleuses.		
	1H	1393.2	81 x 65 x 38	202		Matrice hétérogène, localement fayalitique, formée d'une structure fibreuse, contenant de nombreux fragments et billes métalliques parfois de dimensions très importantes et toujours correctement épurés. Le fantôme d'un acier à 0,2-0,3% de C est également visible. Des battitures lamellaires et globulaires sont aussi présentes en nombre.		
		1393.3	95 x 74 x 27	254		Matrice fayalitique homogène fortement chargée en globules de wustite et en fragments métalliques parfois importants, de bonne propreté inclusionnaire, avec des contours réguliers représentant des plans de frappe. Le fragment le plus important est uniquement ferritique et encore localement écroui.		
		1409.2	78 x 68 x 33	196		Matrice fayalitique hétérogène contenant des dendrites de wustite et beaucoup de billes et de filaments métalliques partiellement réoxydés. Il existe également des battitures essentiellement globulaires, mais aussi lamellaires et en bille.		
		1409.4	81 x 63 x 30	176		Matrice fayalitique homogène avec des dendrites et des globules de wustite et surtout de très nombreux filaments métalliques. Des battitures lamellaires et globulaires sont également visibles.		
		1389.2	97 x 68 x 42	362		Matrice fayalitique homogène avec beaucoup de dendrites de wustite. Les pertes métalliques, toujours non réoxydées, sont plutôt rares. Les battitures plus nombreuses sont globulaires et, plus fréquemment, lamellaires.		Cycles thermiques homogènes à haute température accompagnés de pertes essentiellement en oxyde et plus particulièrement en battitures lamellaires

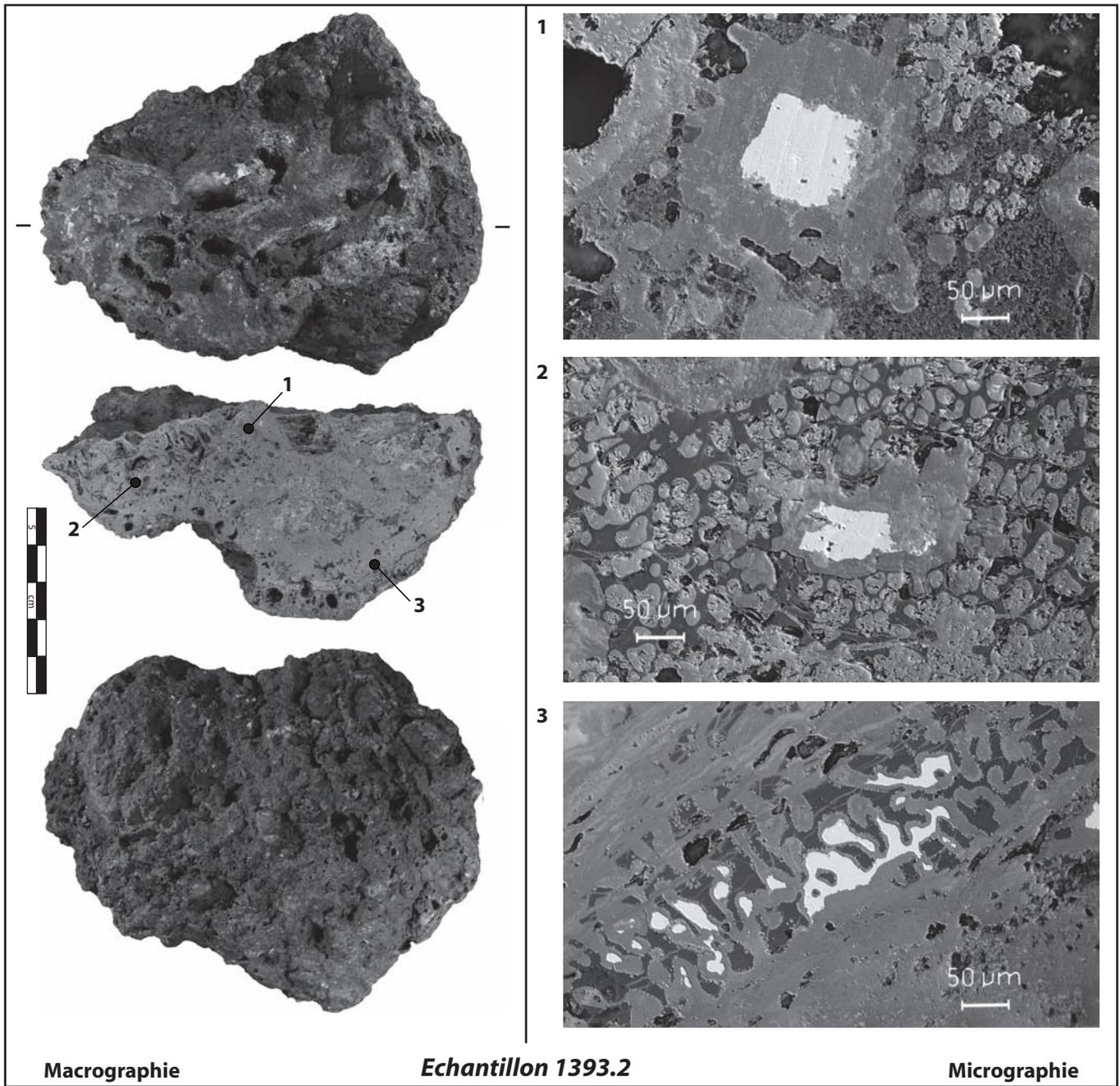
Fig. 104 : bilan répertorié des analyses métallographiques.



1 : fragment de métal non réoxydé dans une matrice fayalitique à pavés avec des dendrites de wustite.

2 : dendrites de wustite dans une matrice fayalitique à lattes.

Fig. 105 : observations métallographiques du culot de forge 1389.2 (terrasse 1H).



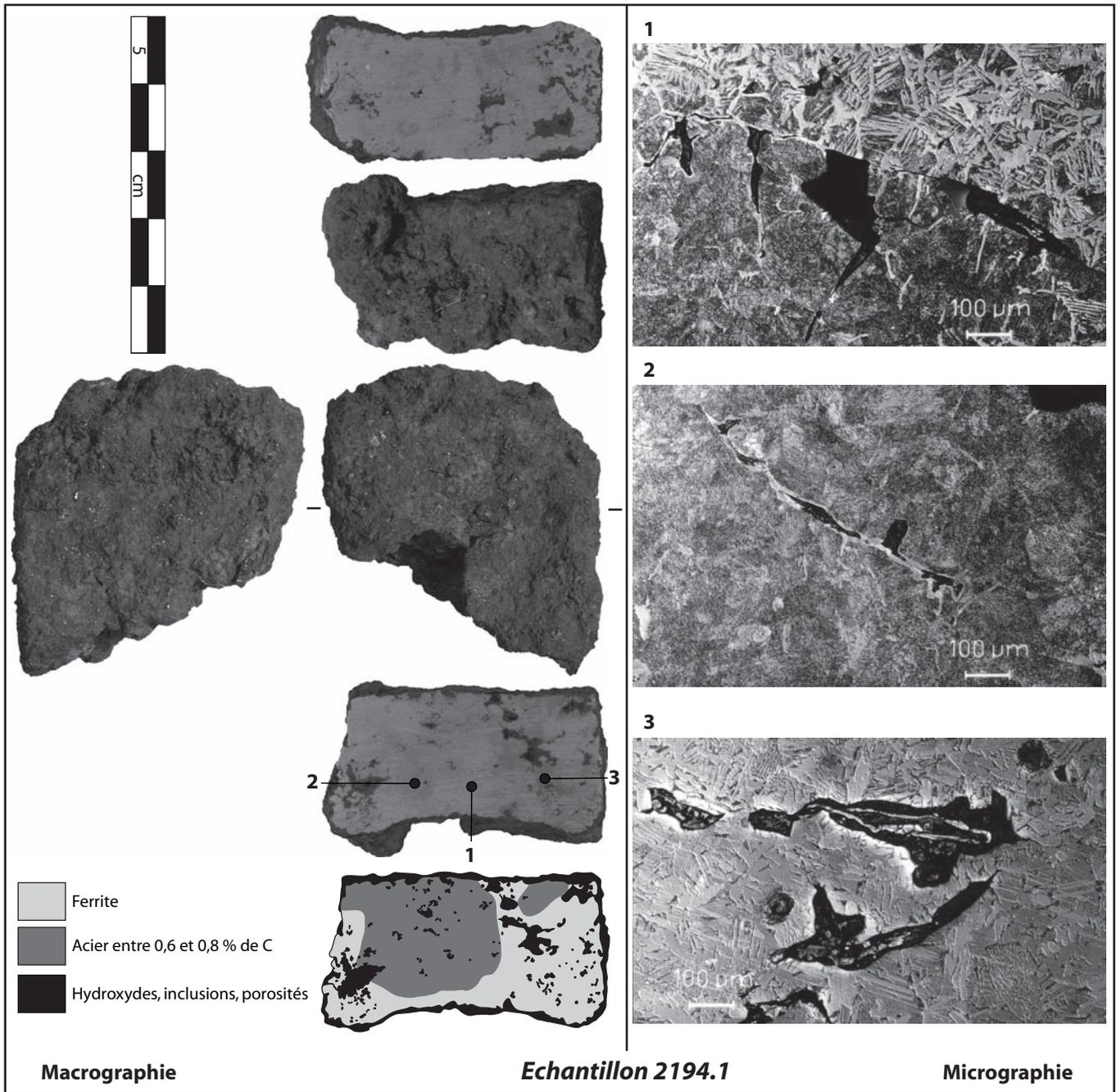
1 et 2 : fragment de métal (ferrite), présentant des plans de frappe, en cours de réoxydation dans une matrice fayalitique avec des globules de wustite.

3 : gros fragment métallique en cours d'hydroxydation.

Fig. 106 : observations métallographiques du culot de forge 1393.2 (terrasse 1H).

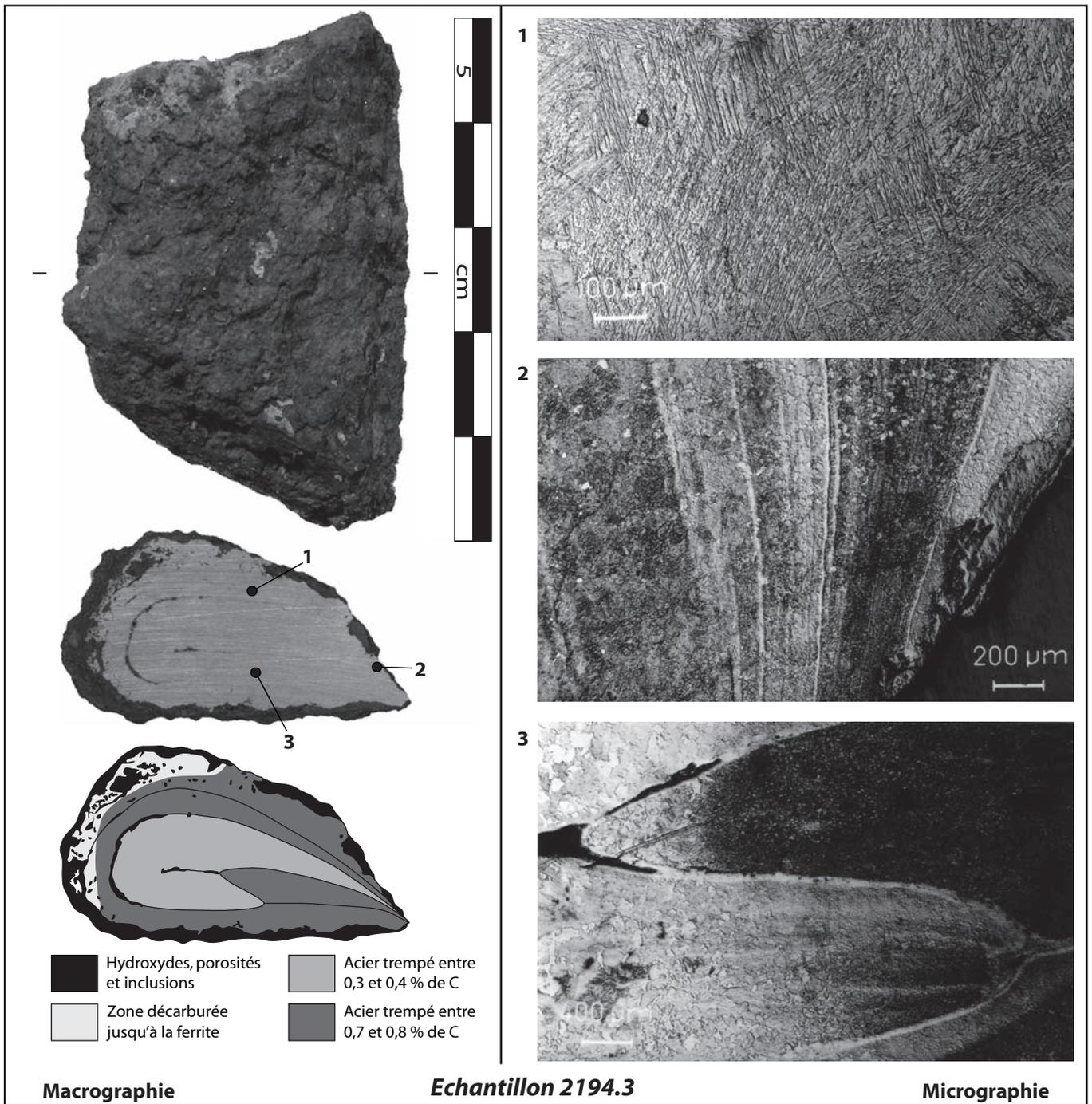
Con- texte	Sec- teurs	N°	L x l x e (mm)	M (g)	Identi- fications	Synthèse des observations métallographiques	Interprétations
Forge installée dans l'angle nord-oriental de l'agglomération et rejetant ses déchets dans la cour 2A3	2A3	2180.1	143 x 121 x 95	1340	culot	Superposition de 3 culots dont les matrices fayalitiques homogènes sont identiques. Toutes contiennent des dendrites de wustite, des battitures lamellaires et globulaires, et un semis épars de billes et de filaments métalliques plus ou moins réoxydés.	Cycles thermiques homogènes à haute température accompagnés de peu de pertes en oxyde et en métal.
		2180.3	71 x 50 x 31	108		Matrice fayalitique très homogène à dendrites de wustite qui contient quelques battitures essentiellement lamellaires et des pertes métalliques encore plus rares.	
		2180.2	120 x 75 x 40	332		Matrice hétérogène constituée d'un mélange d'une matière organique et de fayalite. Quelques rares pertes métalliques et en oxyde se trouvent dans la section.	Cycles thermiques hétérogènes à basse température accompagnés de nombreux ajouts organiques. Les pertes en oxyde et en métal sont toujours rares.
		2194.1	40 x 37 x 19	101	demi- produit	Masse métallique parallélépipédique mi-acierée (0,7-0,8 % de C) mi-ferritique avec de nombreuses porosités et très peu d'inclusions.	Demi-produit mi-acieré mi-ferritique issu d'un fragment de loupe.
		2194.2	48 x 32 x 16	80	double tranchant	Pièce métallique biseautée sur deux côtés opposés et présentant une nervure centrale. Formée de l'assemblage d'au moins 2 feuilles, cette pièce est très correctement épurée, acierée (de 0,5 à 0,8 % de C selon les feuilles), mais décarburée à 0,2 % de C en périphérie. Une des soudures est localement incorrecte.	Objet à double tranchant acieré. Une décarburation périphérique importante et/ou une soudure incorrecte ont peut-être engendré son rejet.
		2194.3	48 x 32 x 16	82	outil tranchant (chasse)	Pièce métallique trapézoïdale possédant un large biseau pratiquement obtus et, à l'opposé, un talon massif. Composée d'une assemblage complexe, elle est fabriquée à partir d'une soudure en gueule de loup repliée sur elle même. Cette pièce est réalisée à partir de feuilles acierées (soit à 0,4, soit à 0,8 % de C) qui ont été en dernier lieu trempées. Le talon est localement décarburé jusqu'à la ferrite.	Outil tranchant possédant des qualités mécaniques exceptionnelles (soudures complexes, âme en acier doux encaissant les chocs, tranchant en acier trempé très dur) pouvant être assimilé à une chasse destinée à l'équarrissage des pierres.
		2208.1	91 x 14 x 5	19	couteau	Couteau domestique composé d'une feuille acierée à 0,7 % de C repliée et soudée sur elle même. Le biseau du tranchant est décarburé et écroui.	Couteau domestique de bonne qualité, équivalent à un "opinel" actuel.

Fig. 107 : bilan répertorié des analyses métallographiques.



1 : après l'attaque au Nital, limite franche entre un acier à 0,7-0,8 % de C et un autre à 0,5-0,6 % de C.
 2 : après l'attaque au Nital, acier à 0,7-0,8 % de C légèrement décarburé autour d'une porosité très écrasée.
 3 : après l'attaque au Nital, replis dans une zone ferritique.

Fig. 108 : observations métallographiques du demi-produit 2194.1 (cour 2A3).



- 1 : après l'attaque au Nital, acier eutectoïde trempé (martensite).
 2 : après l'attaque au Nital, soudures de corroyage dans un acier eutectoïde trempé.
 3 : après l'attaque au Nital, soudure en gueule de loupe dans un acier essentiellement eutectoïde et trempé.

Fig. 109 : observations métallographiques de l'outil tranchant 2194.3 (cour 2A3).

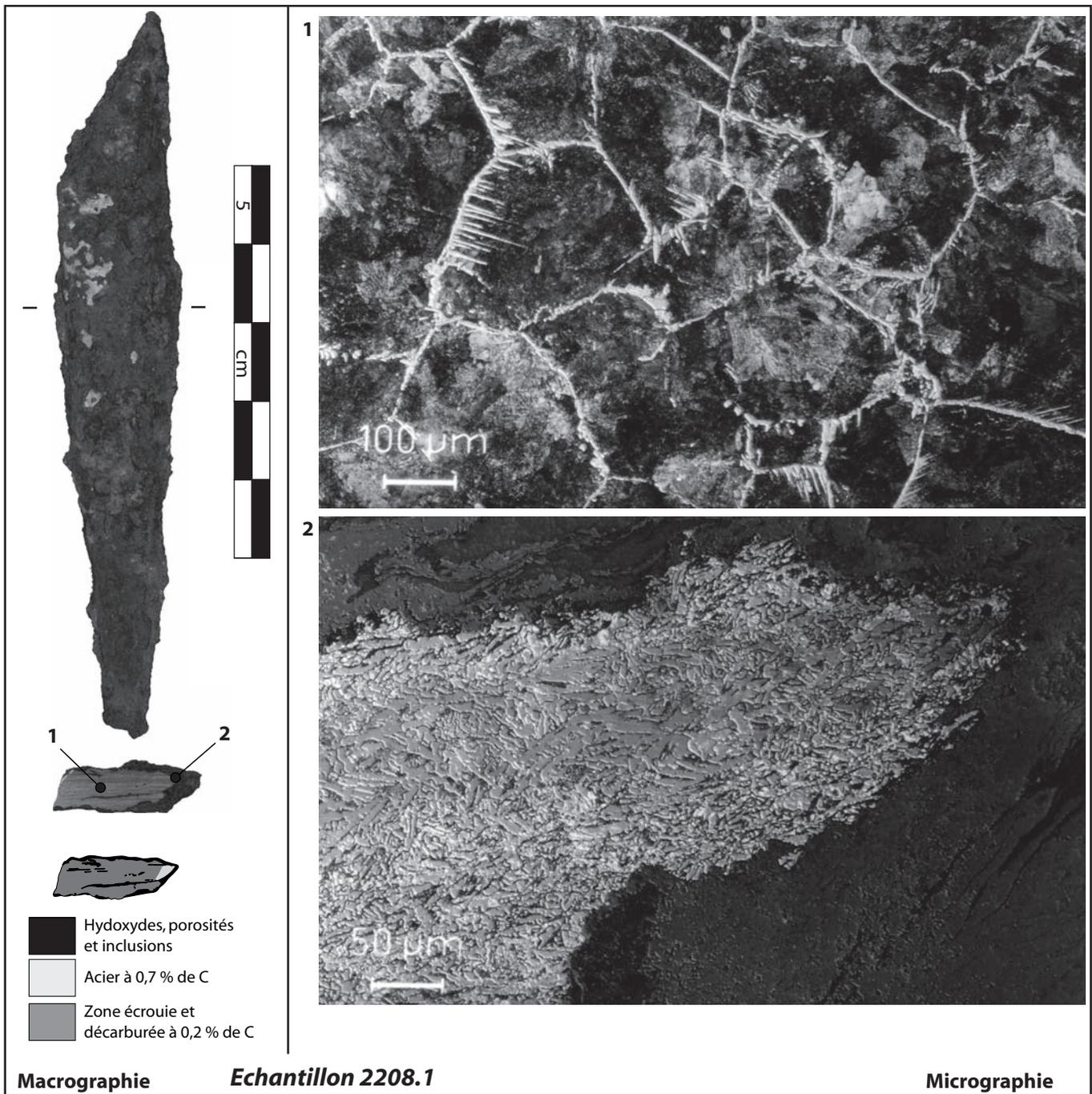


Fig. 110 : observations métallographiques du couteau 2208.1 (cour 2A3).

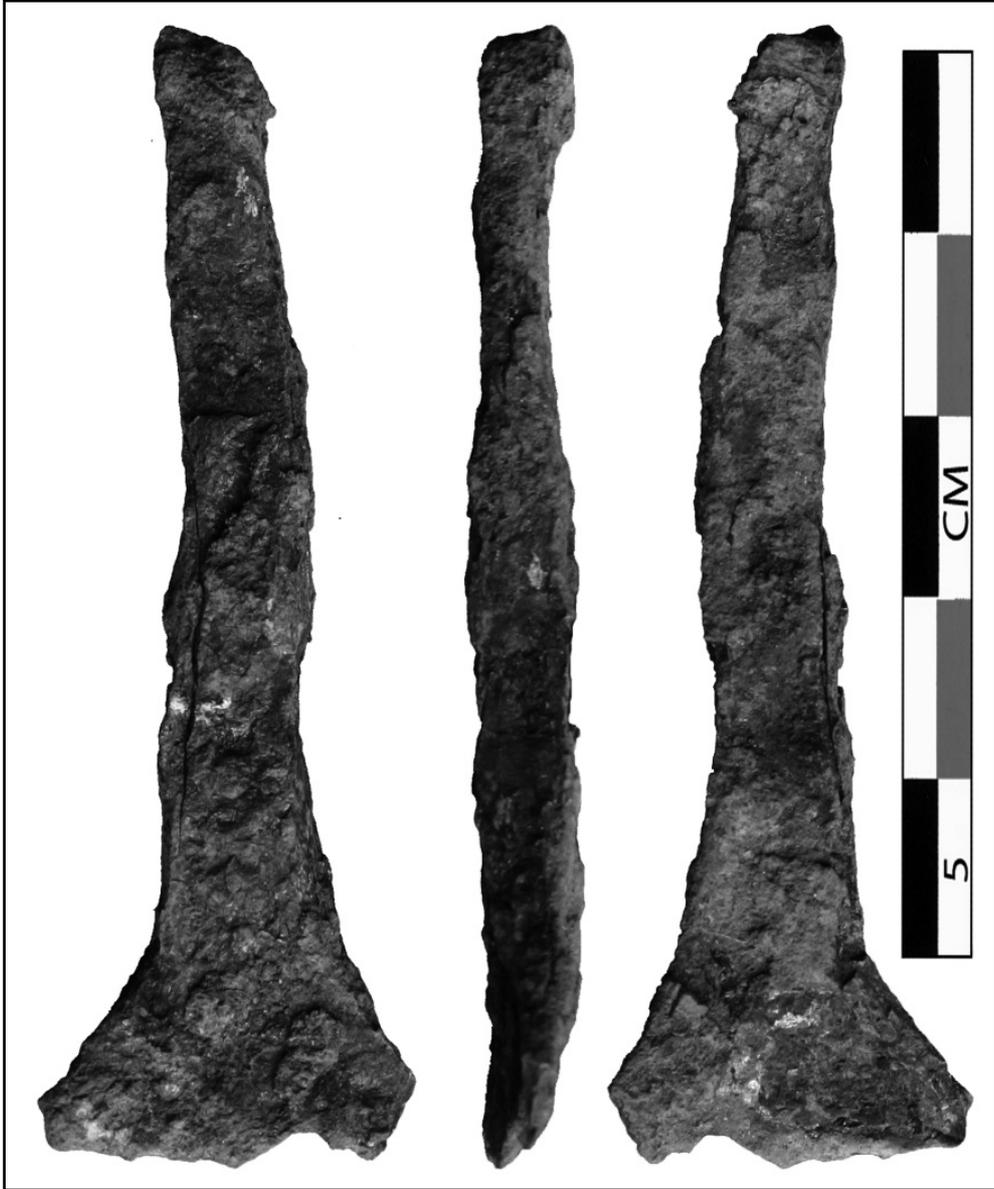
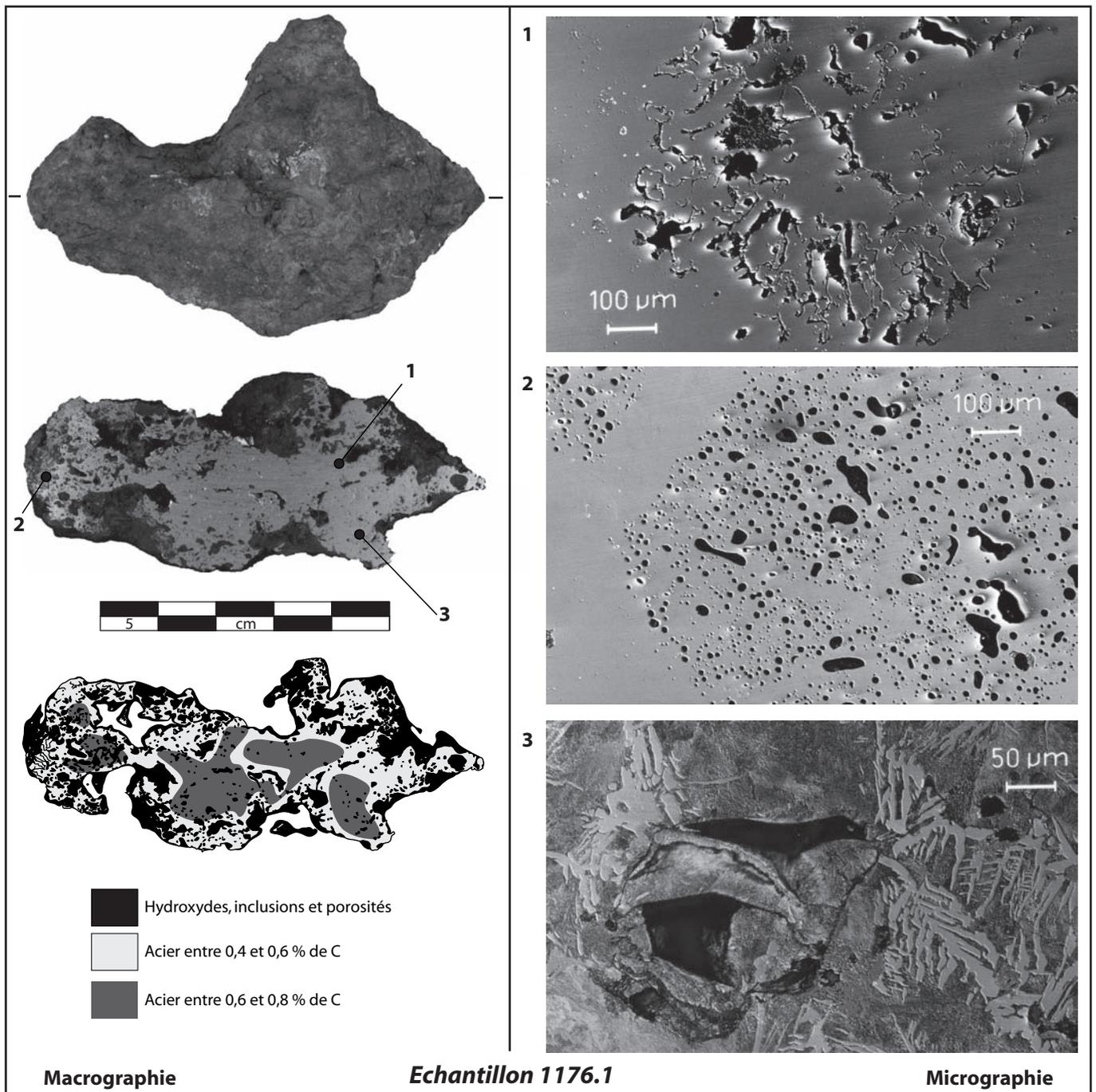


Fig. 111 : un ciseau à bois provenant de l'US2180 (cour 2A3).

Sec-teurs	N°	L x l x e (mm)	M (g)	Identi-fications	Synthèse des observations métallographiques	Interprétations
1L1	1176.1	75 x 52 x 27	190	<i>frgt. de loupe</i>	Masse métallique informe constituée d'un acier à 0,7-0,8 % de C contenant des replis, des porosités et quelques rares inclusions. Son pourtour est décarburé à 0,3 % de C et ponctuellement enrobé de scorie de forge.	Fragment de loupe en cours de compactage dont l'opération d'assèchement a été en grande partie réalisée.
2L	2535.1	157 x 26 x 10	338	<i>demi-produit</i>	Masse métallique parallélépipédique très correctement épurée constituée d'un acier eutectoïde trempé à 0,7-0,8 % de C (90 % de la section). Tout le pourtour est décarburé jusqu'à la ferrite.	Demi-produit très aciéré issu d'un fragment de loupe.
2K	2528.1	42 x 37 x 10	40	<i>tôles</i>	Assemblage incorrect entre 2 feuilles ferritiques correctement épurées.	Assemblage incorrect de tôles ferritiques.
2H	2505.1	43 x 36 x 11	110	<i>demi-produit</i>	Masse métallique parallélépipédique issue d'une loupe correctement épurée mi-ferritique mi-aciérée (0,8 % de C). Sur le pourtour, des battitures lamellaires en formation sont visibles.	Demi-produit mi-aciéré mi-ferritique venant d'être façonné .

Fig. 112 : bilan répertorié des analyses métallographiques.



1 : avant l'attaque au Nital, replis et porosités en cours d'agglomération.

2 : avant l'attaque au Nital, agglomération métallique incomplète (chapelet de petites inclusions amorphes et ovoïdes).

3 : après l'attaque au Nital, gros repli dans un acier à 0,7 % de C.

Fig. 113 : observations métallographiques du fragment de loupe en cours de compactage 1176.1 (pièce 1L1).

types		secteurs	US	m	L	l	e	
				g	mm			
complets et intacts	gabarit court	1A3	1663	181	48	45	17	
		1C	1109	90	42	30	18	
		1S1	1713	50	51	29	10	
		1S1	1751	98	55	39	12	
		2H	2505	110	43	36	11	
		3A1	3013	72	48	32	10	
		3A2	3031	34	49	18	17	
		4H	HS	75	47	28	12	
		<i>moyenne</i>			72,8	46,8	28,5	12,5
		<i>écart type</i>			31,1	2,6	7,7	3,1
	<i>coef. de variation (%)</i>			42,7	5,6	27,1	24,9	
		gabarit long	2L	2535	338	157	26	15
débités dans la longueur	1H	1409	30	28	20	15		
	1H	1408	20	31	20	18		
	1N	1153	49	corrodé				
	1O	1400	61	53	23	18		
	2A3	2194	101	40	37	19		
	4E	4239	55	66	20	15		
<i>moyenne</i>		<i>des gabarits court et long et des demi-produits débités</i>			26,8	14,4		
<i>écart type</i>					8,2	5,1		
<i>coef. de variation (%)</i>					30,5	35,8		
autre		1S1	1713	121	71	22	21	

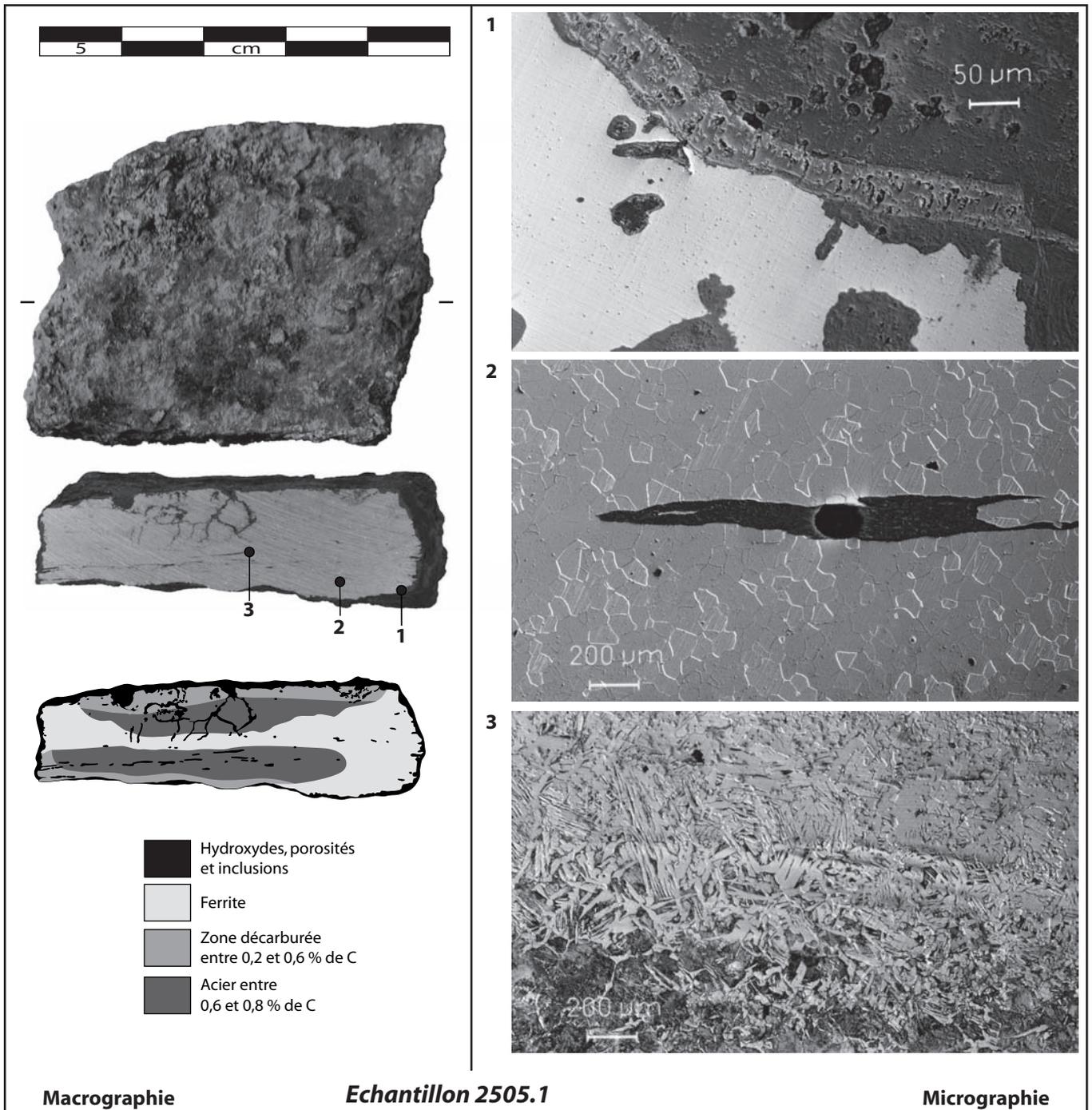
Fig. 114 : les demi-produits du site : synthèse des données métriques.



Fig. 115 : un exemple de demi-produit assimilé au gabarit court (US3013, pièce 3A1).



Fig. 116 : un exemple de demi-produit assimilé au gabarit court (US1109, cour 1C).



1 : avant l'attaque au Nital, battiture lamellaire en position primaire, en contact contre le métal duquel elle provient.

2 : après l'attaque au Nital, ferrite équiaxe avec une inclusion écrasée en cours d'écoulement.

3 : après l'attaque au Nital, jonction entre un acier à 0,3 % de C et un autre à 0,5 % de C avec des fantômes de soudures de corroyage.

Fig. 117 : observations métallographiques du demi-produit 2505.1 assimilé au gabarit court (bâtiment 2H).

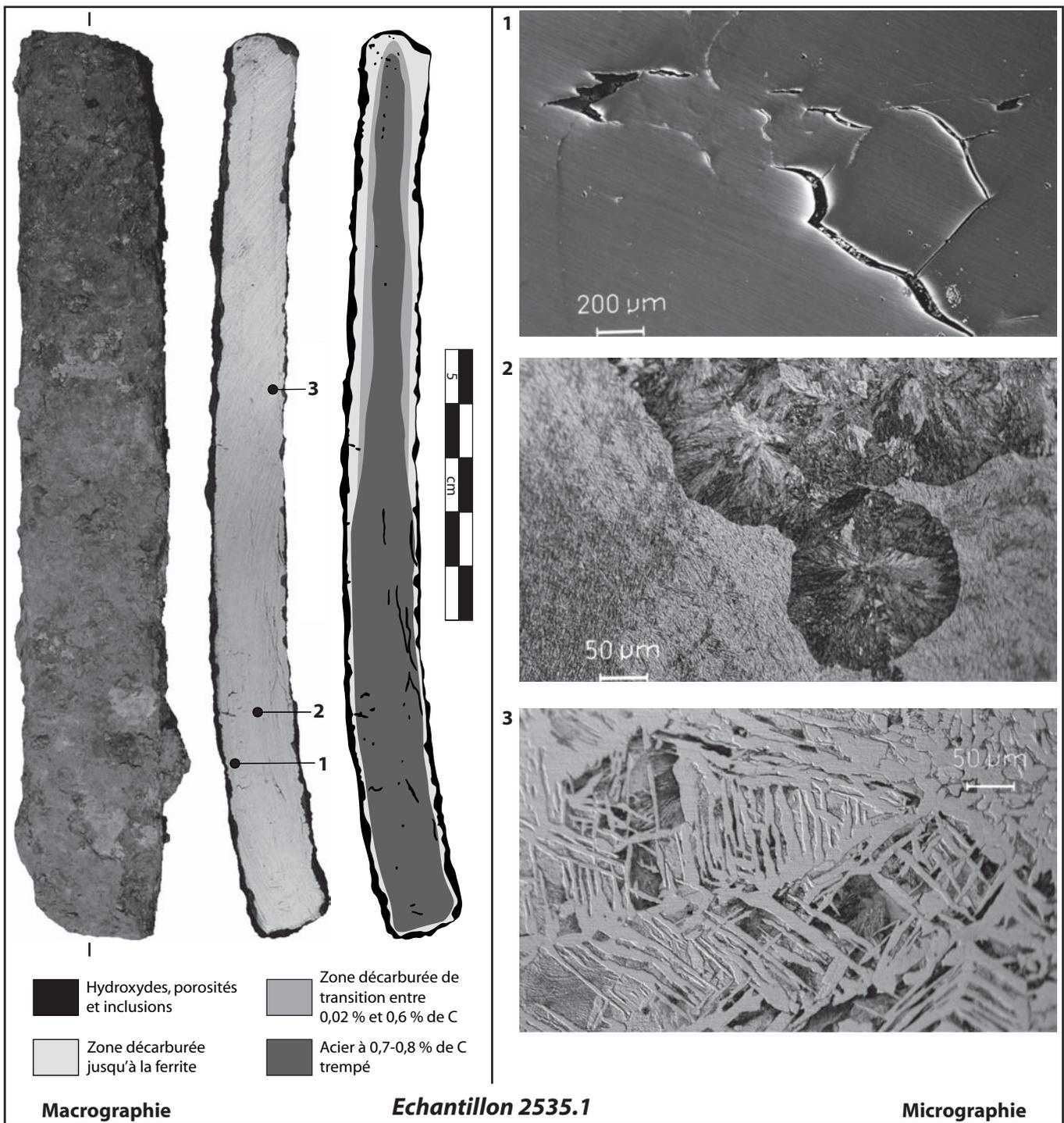


Fig. 118 : observations métallographiques du demi-produit 2535.1 assimilé au gabarit long (terrasse 2L).

Données prises en compte sur le Roc de Pampelune		Scories														n° de ligne	formules
		en culot		informes		coulées		peu denses		parois		pseudo-gromps		Total			
		nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)		
scories dans la totalité des fouilles de l'établissement		301	47299	4219	87175	1156	11879	746	5522	408	4411	199	5775	7029	162061	L1	
scories dans les extérieurs fouillés		150	23437	2842	51328	558	7354	743	5507	241	2180	77	2086	4615	92172	L2	
% des scories découvertes dans les extérieurs par rapport à la totalité des fouilles dans l'établissement		49,8	49,6	67,4	58,9	48,3	61,9	99,6	99,7	59,1	49,4	38,7	36,1	65,7	56,9		$= (L2 / L1) \times 100$
estimation à partir du plan des fouilles	% des fouilles d'extérieurs par rapport à la totalité des fouilles menées dans l'établissement	17														L3	
	% des extérieurs dans l'établissement	60														L4	
à propos des données recueillies dans les extérieurs, coefficient de correction	calculé	3,53															$= L4 / L3$
	minimisé	3														L5	
valeurs estimées des scories si les espaces ouverts avait été autant fouillés que les espaces fermés		601	94173	9903	189831	2272	26587	2232	16536	890	8771	353	9947	16259	346405	L6	$= (L5 \times L2) + (L1 - L2)$
% de l'espace exploré par rapport à la totalité de l'établissement		60														L7	
valeurs estimées des scories si tout l'établissement avait été fouillé		1002	156955	16505	316385	3787	44312	3720	27560	1483	14618	588	16578	27098	577342		$= (L6 \times 100) / L7$

Fig. 119 : estimations du nombre et de la masse de scories que renferme le site.

Données prises en compte sur le Roc de Pampelune (sauf mention contraire)		Scories				n° de ligne	formules
		en culot		Total			
		nbrs	m (g)	nbrs	m (g)		
<i>scories dans la totalité des fouilles de l'établissement</i>		301	47299	7029	162061	L1	
valeurs estimées des scories	<i>si les espaces ouverts avait été autant fouillés que les espaces fermés</i>	601	94173	16259	346405	L2	
	<i>si tout l'établissement avait été fouillé</i>	1002	156955	27098	577342	L3	
% moyen des scories en culot	<i>dans l'établissement</i>	3,9	27,9			L4	
	<i>dans les tas de scories des forges d'Olbia (US61148) et d'Ambrussum (SL9820)</i>	14,5	64,0			L5	
à propos des scories en culot de l'établissement, coefficient de correction	<i>calculé</i>	3,7	2,3				= L5 / L4
	<i>minimisé</i>	3	2			L6	
valeurs des scories en culot corrigées	<i>par rapport aux découvertes</i>	903	94598				= L1 x L6
	<i>si les espaces ouverts avait été autant fouillés que les espaces fermés</i>	1803	188346				= L2 x L6
	<i>si tout l'établissement avait été fouillé</i>	3005	313910			L7	= L3 x L6
<i>nombre d'années travaillées dans l'établissement par rapport au nombre total de scories en culots estimé et corrigé (en sachant que 1 culot = 1 jour de chauffe et qu'il y a 180 jours de chauffe par an dans une forge)</i>		17				L8	= L7 / 180
nombre d'années travaillées dans l'établissement si	<i>5 ateliers de forge en fonction</i>	3,3					= L8 / 5
	<i>3 ateliers de forge en fonction</i>	5,6				L9	= L8 / 3
<i>nombre minimum d'années de fonctionnement de l'établissement</i>		60				L10	
ratio du déficit de scories	<i>dans l'établissement si 3 ateliers de forge en fonction</i>	10,8					= L10 / L9
	<i>minimisé</i>	9					

Fig. 120 : estimations de la durée de fonctionnement des forges et du déficit en scories sur le site.

Données prises en compte sur le Roc de Pampelune (sauf mention contraire)		en culot	informes	coulées	peu denses	parois	pseudo-gromps	Total	n° de ligne	formules
		m (g)								
scories dans la totalité des fouilles de l'établissement		47299	87175	11879	5522	4411	5775	162061	L1	
valeurs estimées des scories	si les espaces ouverts avait été autant fouillés que les espaces fermés	94173	189831	26587	16536	8771	9947	346405	L2	
	si tout l'établissement avait été fouillé	156955	316385	44312	27560	14618	16578	577342	L3	
d'après notamment V. Serneels (Anderson et al. 2003, p. 168)	correspondances typologiques	SGD (qq SAS)	SGD (qq SAS)	SAS	SAS	PAR	SFR	Total		
	% moyen de fer dans chaque type de scories	40	40	10	10	0	65		L5	
masse de fer dans les scories	découvertes dans l'établissement	18920	34870	1188	552	0	3754	59283	L6	= (L5 X L1) / 100
	si les espaces ouverts avait été autant fouillés que les espaces fermés	37669	75932	2659	1654	0	6466	124379	L7	= (L5 X L2) / 100
	si tout l'établissement avait été fouillé	62782	126554	4431	2756	0	10776	207299	L8	= (L5 X L3) / 100
% moyen de fer perdu lors des phases de forgeage traditionnelles et de quelques étapes d'épuration de finition		20							L9	
masse de fer travaillée	à partir des scories découvertes							296417	L10	= L6 x 100 / L9
	si les espaces ouverts avait été autant fouillés que les espaces fermés							621897	L11	= L7 x 100 / L9
	si tout l'établissement avait été fouillé							1036495	L12	= L8 x 100 / L9
ratio minimisé du déficit de scories dans l'établissement									L13	
après correction, masse de fer travaillée	à partir des scories découvertes							2667755		= L11 x L13
	si les espaces ouverts avait été autant fouillés que les espaces fermés							5597075		= L10 x L13
	si tout l'établissement avait été fouillé							9328459		= L12 x L13

Fig. 121 : estimations de la masse de fer travaillée dans les forges.

<i>si 9328459 g de fer ont été travaillés (estimation après correction, si tout l'établissement avait été fouillé)</i>	objets		nombre d'objets travaillés		
	type	masse moyenne (g) (d'après Leroy à paraître)	durant 60 ans pour 3 ateliers	par an et par atelier (en considérant qu'il y a 3 ateliers qui fonctionnent durant 60 ans (60 x 3 = 180))	par jour de chauffe (180 / an) et par atelier
	couteau	75	124379	691	3,8
	forces, faucilles	175	53305	296	1,6
	ciseau, gouge	275	33922	188	1,0
	hache, pioche	750	12438	69	0,4
pic, soc, épée	3500	2665	15	0,1	

Fig. 122 : estimations du nombre d'objets fabriqués dans les forges.

Données prises en compte sur le Roc de Pampelune (sauf mention contraire)				n° de ligne	formules
<i>(notamment Anderson et al. 2003, p. 172)</i>	<i>masse de charbon par journée de chauffe (en kg)</i>	15		L1	
	<i>nombre de journées de chauffe</i>	540		L2	= 180 x 3
	<i>masse de charbon</i>	8100		L3	= L2 x L1
<hr/>					
<i>d'après l'étude du bas fourneau du Gravas à Saint-Mamert du Gard (30), cf. partie I</i>	<i>fourchette du rendement moyen du charbonnage en %</i>	15	30	L4	
	<i>masse de bois</i>	54000	27000	L5	= (L3 x 100) / L5
	<i>nombre de stères de bois de garrigue (pour une densité de 0,8)</i>	68	34	L6	= L5 / 800
	<i>nombre d'hectares (2 st/an/ha)</i>	34	17	L7	= L6 / 2
<i>pour 3 ateliers de forge par an (d'après Breichner et al. 2002, p. 93)</i>	<i>côté d'un carré en m de</i>	581	411		= $\sqrt{L7 \times 10000}$
	<i>nombre d'hectares</i>	169	84	L8	= L7 x 5
<i>pour 3 ateliers de forge pour une rotation de coupe de 5 ans</i>	<i>côté d'un carré en m de</i>	1299	919		= $\sqrt{L8 \times 10000}$
	<i>nombre d'hectares</i>	338	169	L9	= L7 x 10
<i>pour 3 ateliers de forge pour une rotation de coupe de 10 ans</i>	<i>côté d'un carré en m de</i>	1837	1299		= $\sqrt{L9 \times 10000}$

Fig. 123 : estimations de la surface de bois exploitée et charbonnée pour le fonctionnement des forges.

CHAPITRE 2 : DANS LES HABITATS DISPERSÉS

1. LE CHANTIER DE CONSTRUCTION DU BÂTIMENT A DE L'ÎLOT 12 D'AMBRUSSUM (VILLETTELLE, 34) DANS LA SECONDE MOITIÉ DU II^E SIÈCLE

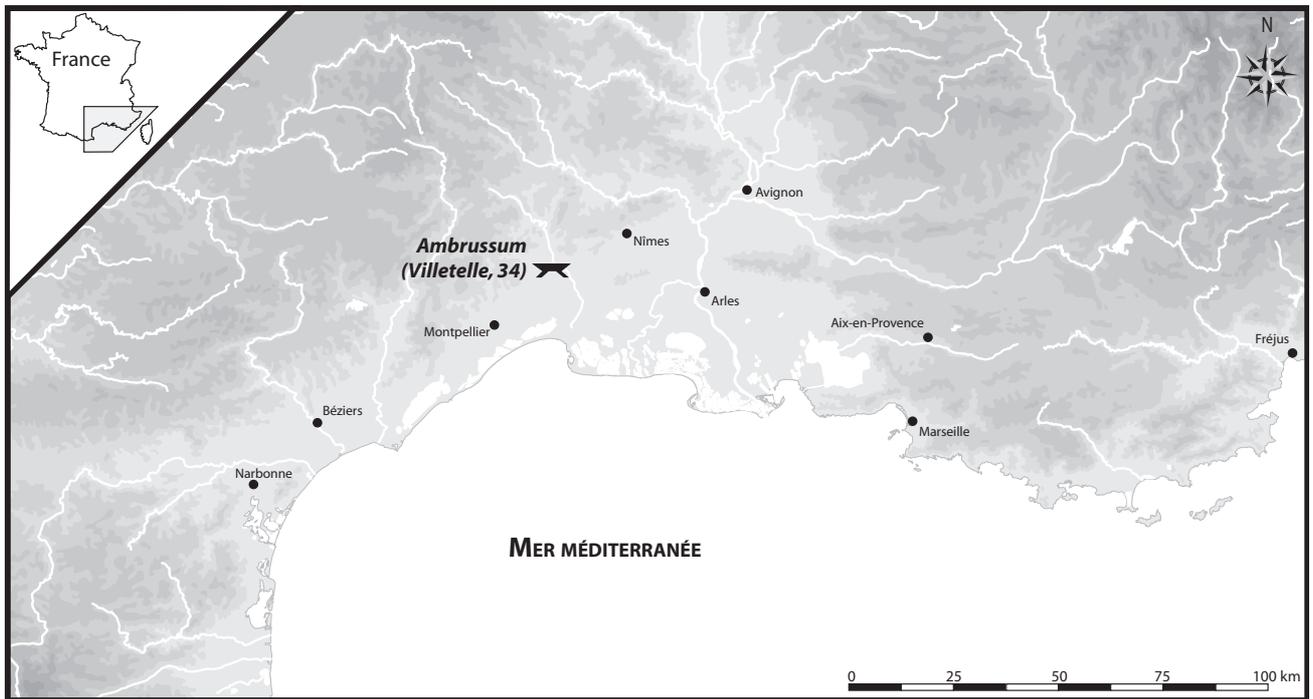


Fig. 124 : carte de localisation du site.

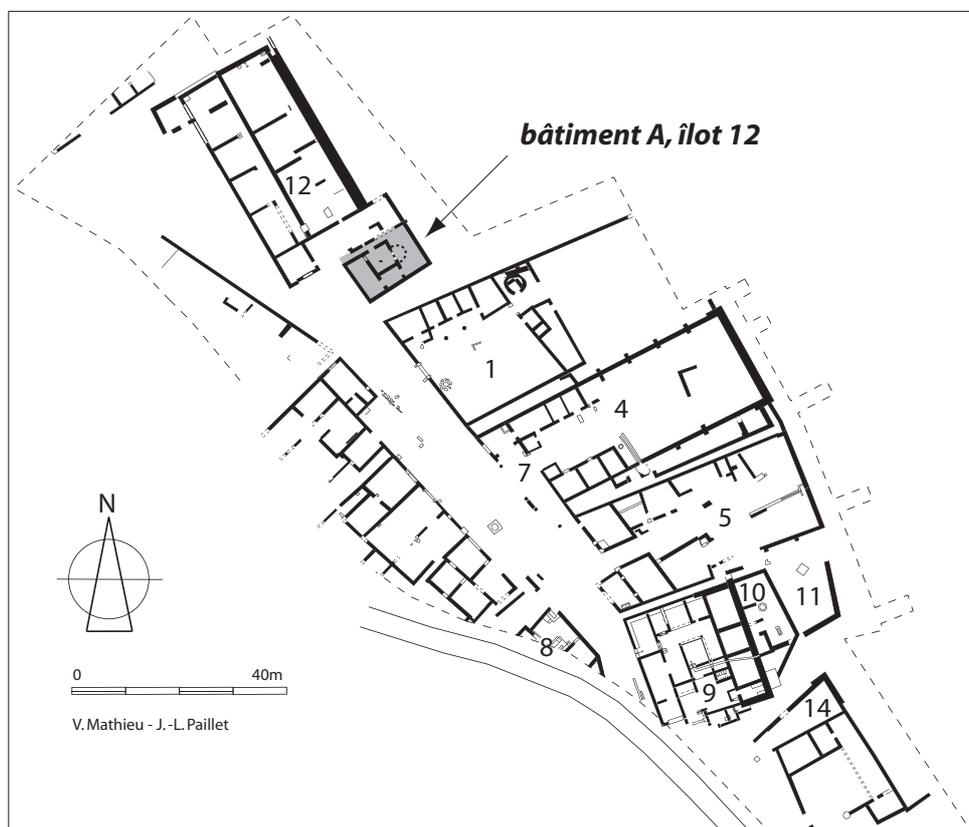


Fig. 125 : plan général du site et localisation du bâtiment A dans l'îlot 12 (d'après V. Mathieu et J.-L. Paillet).

Phases		C3 (seconde moitié Ile s.)								B4 / B2 (déb. Ile s.)		Total	
Aménagements		foyer de forge FR503		sol		fonctionnement		sous total		remblai, sol			
US		12304		12216		12214				12121, 12193, 12199			
Types		nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)
Scorie	en culot	19	2180	53	6270	13	1410	85	9860	16	1850	101	11710
	peu dense, forme arrondie	328	1480	536	6610	318	1230	1182	9320	191	1510	1373	10830
	battiture	X				X							
	paroi	4	240	70	3690	8	470	82	4400	3	160	85	4560
	tuyère	1	50	1	50			2	100			2	100
	sous total	352	3950	660	16620	339	3110	1351	23680	210	3520	1561	27200
Objet ferreux	clou			7	20	19	30	26	50			26	50
	tige	6	20			29	40	35	60			35	60
	partie distale tranchante d'outils					2	80	2	80			2	80
	ind. et petit			3	10	3	20	6	30			6	30
	sous total	6	20	10	30	53	170	69	220			69	220
Total		358	3970	670	16650	392	3280	1420	23900	210	3520	1630	27420

Fig. 126 : répartition spatiale, en nombre et en masse, des types de mobiliers métallurgiques dans le bâtiment.

N°	L x l x e (mm)	M (g)	Identifications	Synthèse des observations métallographiques	Interprétations
12214.1	54 x 52 x 30	106	culot	Matrice fayalitique homogène avec des dendrites de wustite et un semis épars de petites battitures globulaires et lamellaires. Les pertes métalliques sont rares et sous la forme de billes parfois réoxydées.	Cycles homogènes de moyenne à haute température avec peu de pertes en métal et en oxyde. Cas typiques de chauffe dans le cadre de travaux de fabrication à partir d'un métal correctement épuré.
12216.2	91 x 78 x 25	228			
12216.4	51 x 38 x 21	60		Matrice fayalitique homogène avec beaucoup de globules de wustite. Si quelques pertes métalliques réoxydées sont visibles aucune battiture ne l'est.	
12216.5	36 x 29 x 17	30		Matrice fayalitique homogène avec beaucoup de globules et de dendrites de wustite issus de rares pertes en oxyde et en métal.	
12216.6	36 x 34 x 19	36		Matrice fayalitique homogène avec beaucoup de globules de wustite et un semis très épars de pertes en oxyde et en métal (battitures globulaires et lamellaires).	
12304.1	80 x 50 x 18	178			
12304.3	60 x 51 x 36	126		Matrice fayalitique homogène avec des globules et des dendrites de wustite et un semis très épars de pertes en oxyde et en métal (battitures globulaires).	
12216.1	173 x 135 x 83	1468			Cycle de chauffe typique d'une forge de fabrication suivi d'un cycle effectué à basse température avec de nombreux ajouts argilo-sableux.
12216.3	96 x 82 x 30	238		Cycles homogènes de chauffe de pièces aciérées avec de nombreux ajouts siliceux.	
12214.2	55 x 39 x 15	66	outil tranchant en cours de fabrication	Soudure imparfaite donnant la forme de "V" à deux feuilles aciérées à 0,6 % de C avec une bonne propreté inclusionnaire. Une décarburation périphérique de l'ensemble et des grains de sable le long de la ligne de soudure sont visibles.	Tranchant en acier devant probablement être lié au manche par une soudure en gueule de loupe. Pièce abandonnée peut-être à cause de la décarburation périphérique de l'ensemble et/ou de la soudure mal assemblée.

Fig. 127 : bilan répertorié des analyses métallographiques.

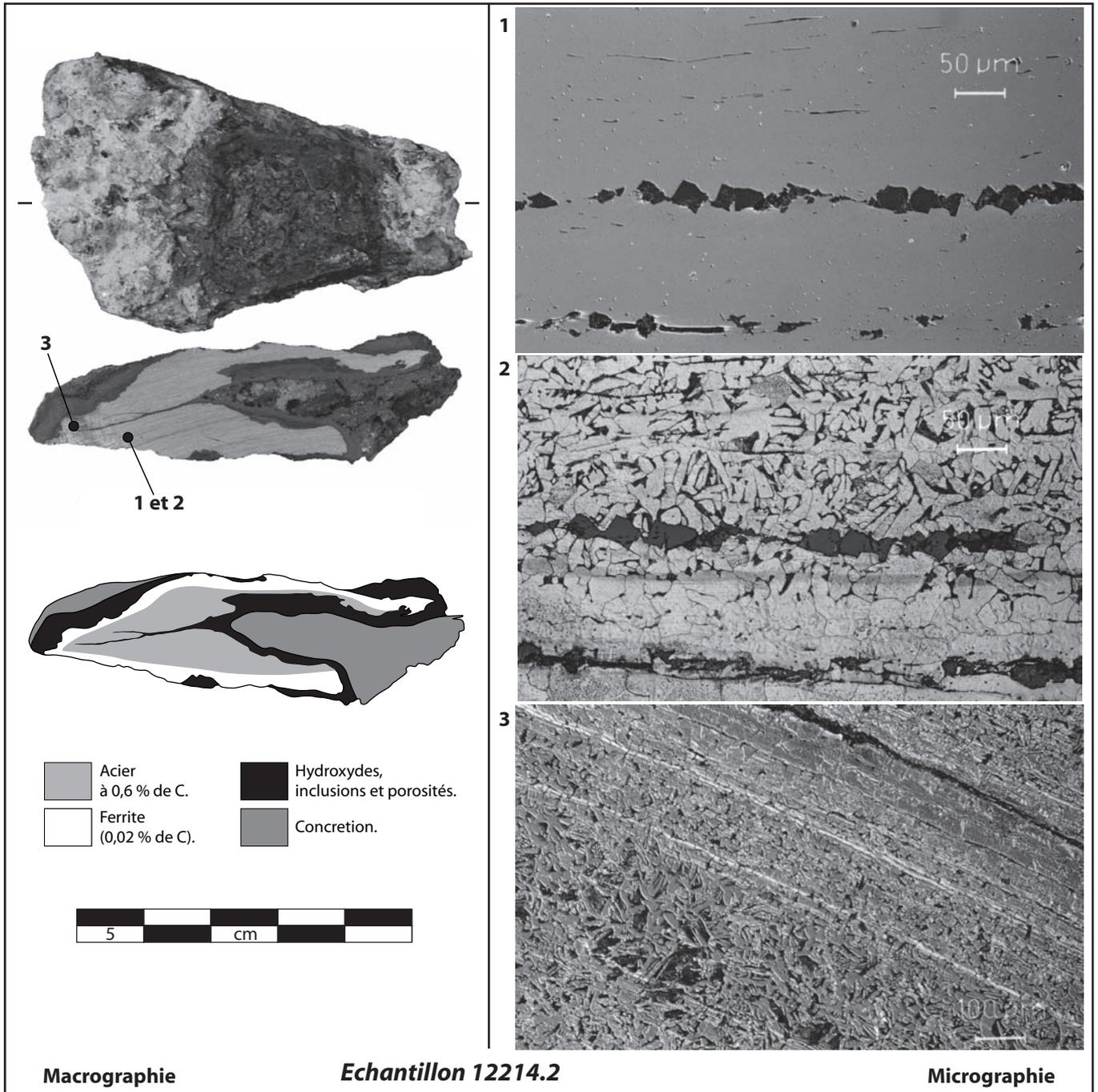
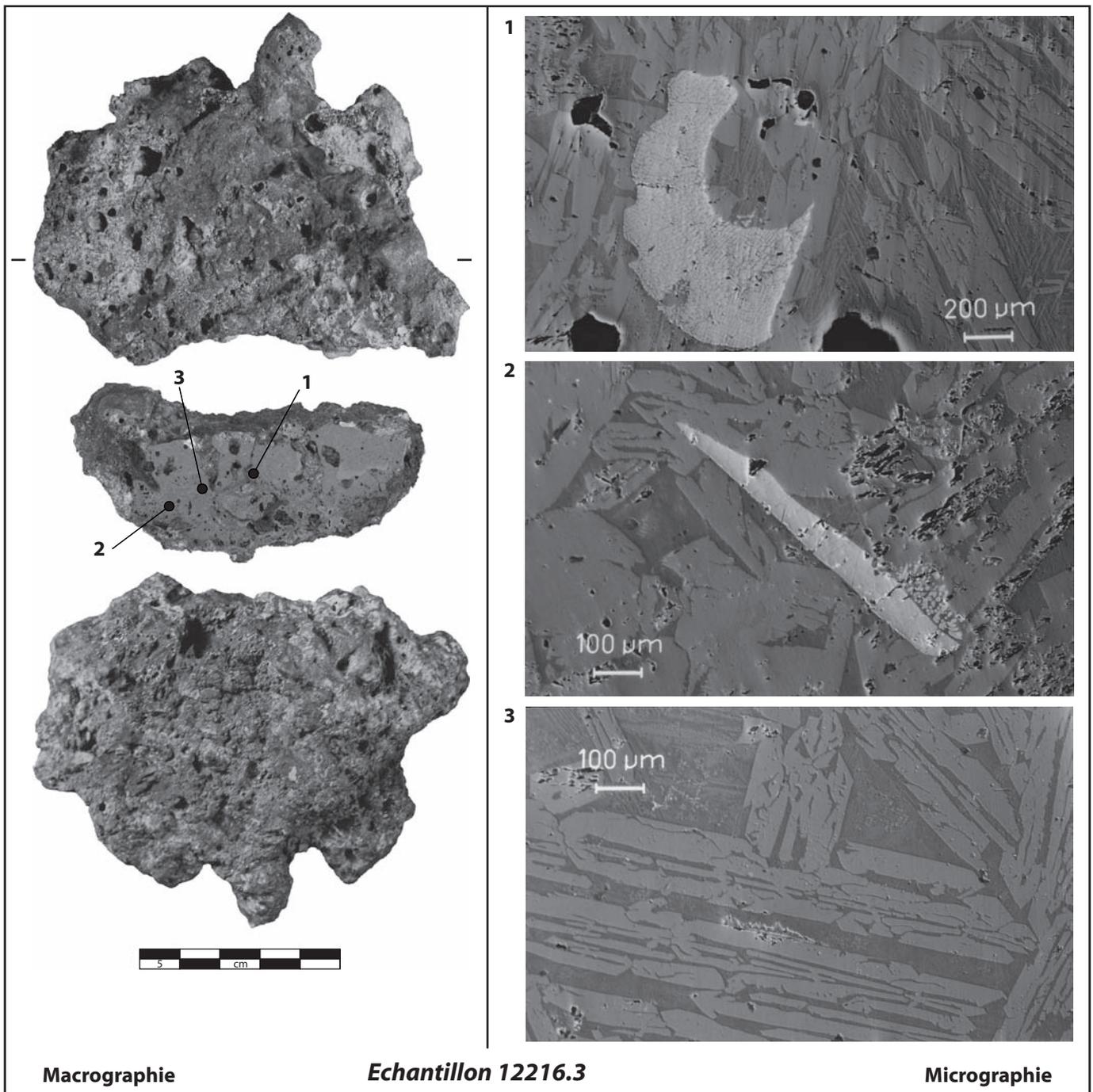


Fig. 128 : observations métallographiques du tranchant en cours de fabrication 12214.2.



1 : battiture globulaire en cours de dissolution dans un bain fayalitique.

2 : battiture lamellaire dans un bain uniquement fayalitique.

3 : matrice fayalitique à lattes.

Fig. 129 : observations métallographiques du culot de forge 12216.3.

2. LE FORGEAGE DANS LES *VILLAE* DU HAUT-EMPIRE

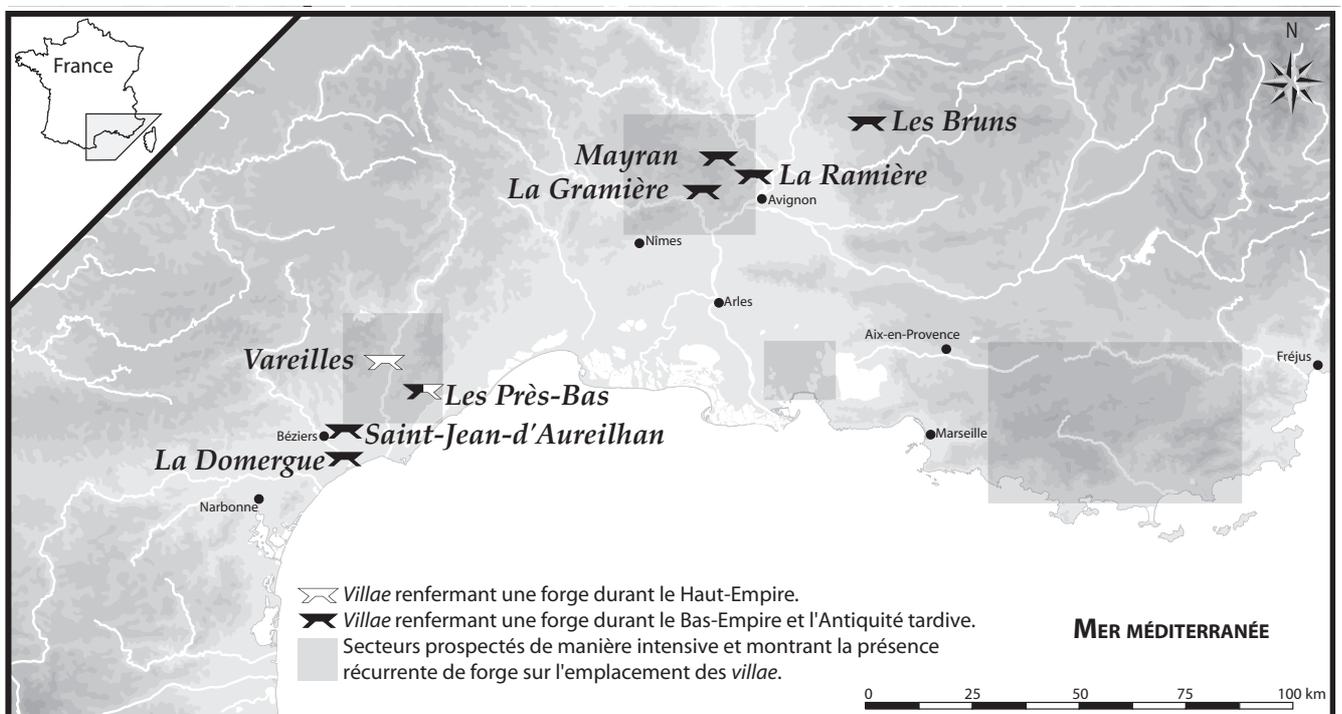


Fig. 130 : localisation des *villae* et des établissements antiques fouillés possédant une forge, et positionnement des zones géographiques prospectées ayant livré des scories sur l'emplacement des bâtiments domaniaux.

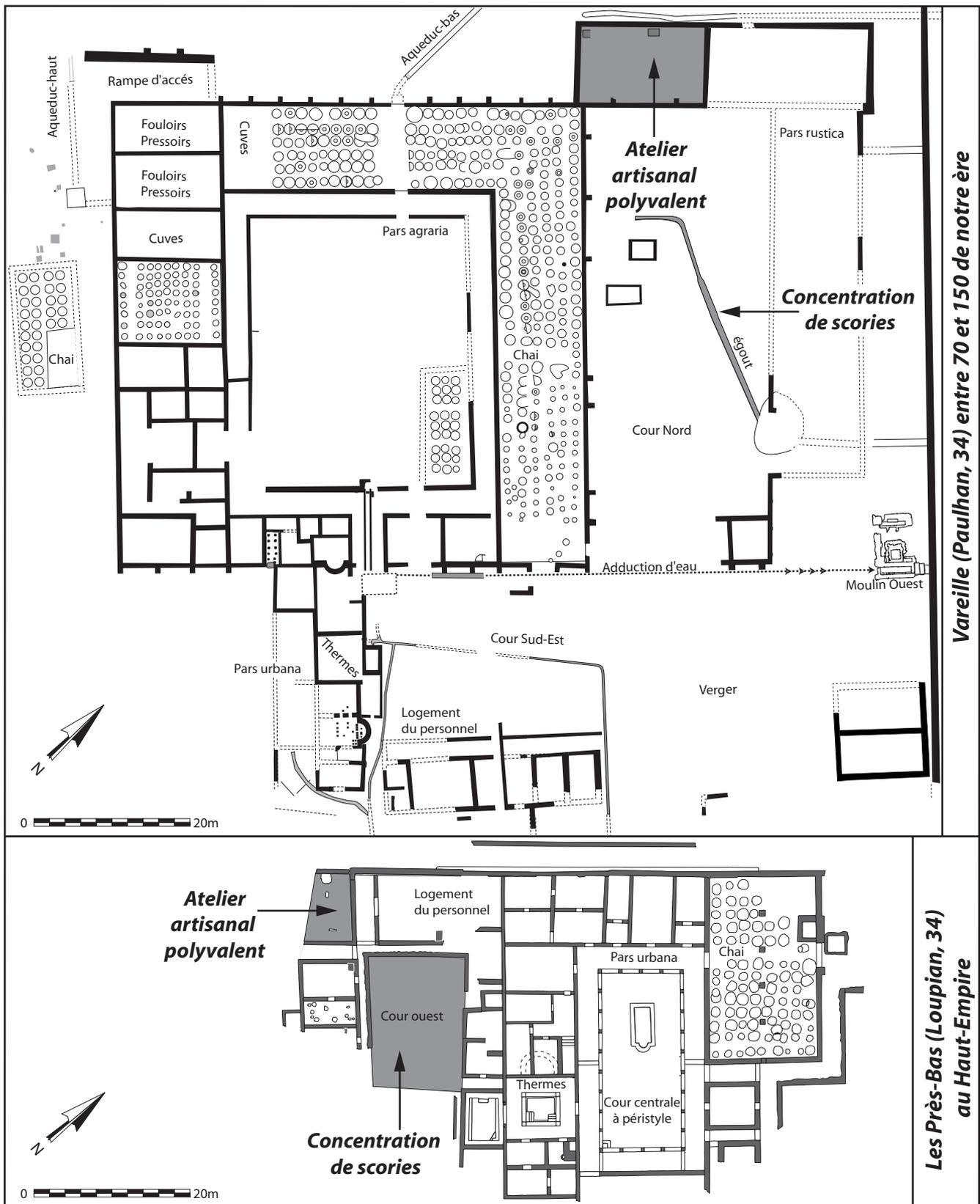


Fig. 131 : plan du Haut-Empire des *villae* de Vareilles (Paulhan, Hérault) et des Près-Bas (Loupian, Hérault), et localisation des espaces artisanaux liés au forgeage (d'après S. Mauné et C. Pellecier).

3. L'AURIBELLE-BASSE (PÉZENAS, 34) AU DÉBUT DU II^E SIÈCLE

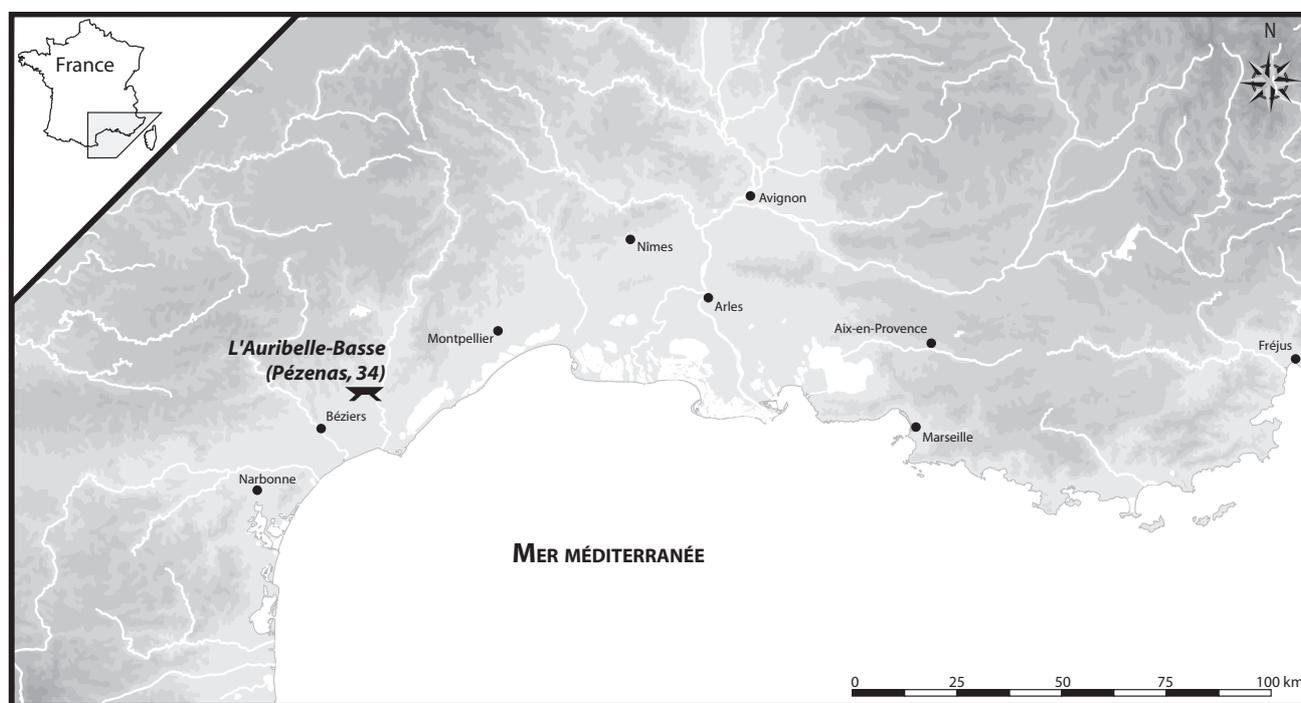


Fig. 132 : carte de localisation du site.

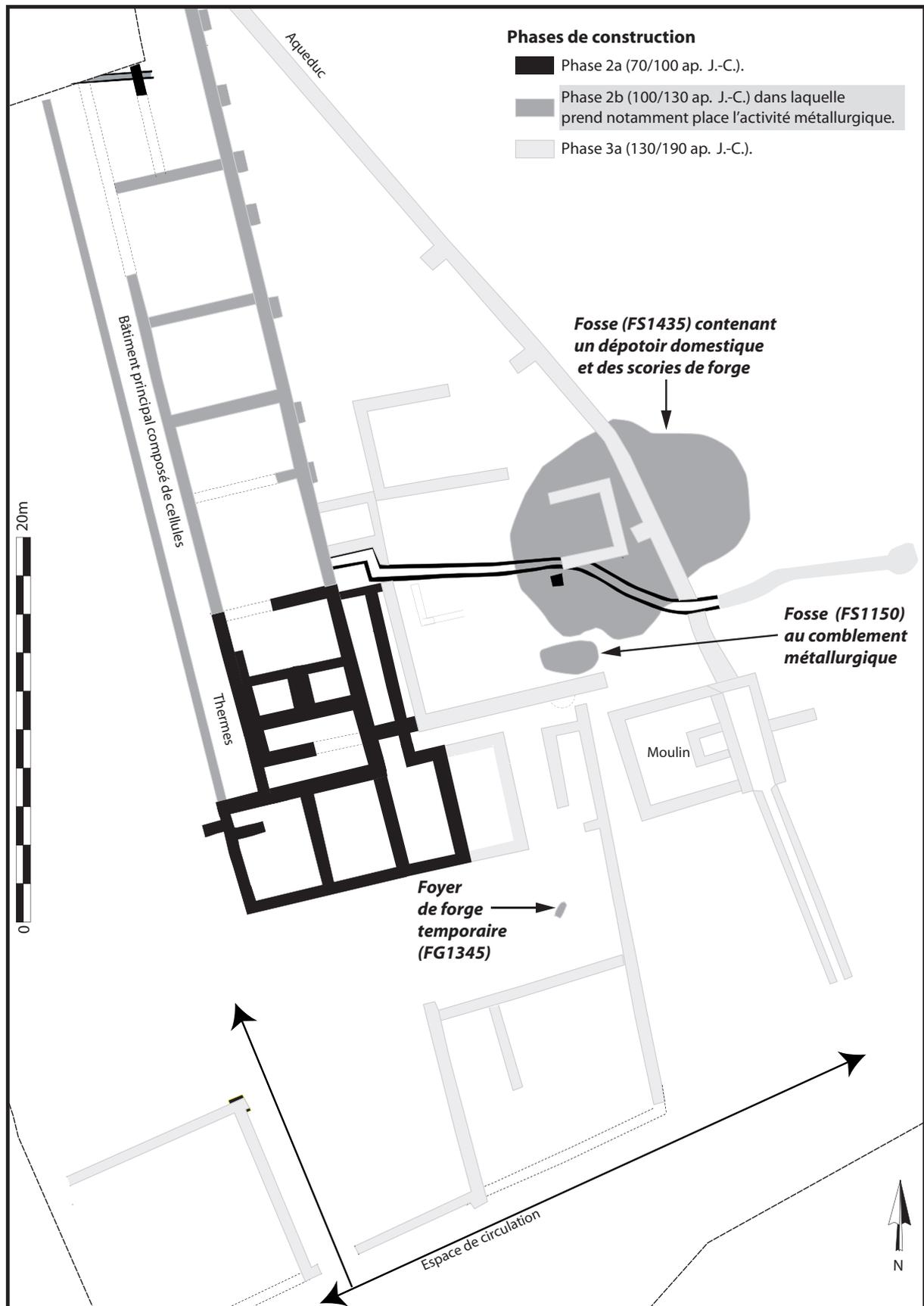


Fig. 133 : plan général du site et localisation des contextes métallurgiques (d'après S. Mauné).

Types de mobiliers métallurgiques et ferreux		Phases et localisations																					
		ph 1b 20-40		ph 2a 70-100		ph 2b 100-130						ph 3a 130-190		ph 3b 190-250		hors strati.		Total					
						FS1150		FS1435		autre		sous total											
		nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)				
Scorie	en culot					116	26805	2	1090			118	27895					1	139	119	28034		
	informe					900	38000	25	1250			925	39250							925	39250		
	petite, coulée, vitrifiée et très peu dense	2	85	1	10	1799	47800	170	7905	32	1273	2001	56978	4	127	63	3558	3	43	2074	60801		
	paroi					143	2950	2	26			145	2976							145	2976		
	paroi avec tuyère					8	200					8	200							8	200		
	sous total	2	85	1	10	2966	115755	199	10271	32	1273	3197	127299	4	127	63	3558	4	182	3271	131261		
Objet	ind.					23	728															23	728
	demi-produit					1	244															1	244
	sous total					24	972															24	972
Total		2	85	1	10	2990	116727	199	10271	32	1273	3221	128271	4	127	63	3558	4	182	3295	132233		

Fig. 134 : répartitions spatiale et chronologique, en nombre et en masse, des types de mobiliers métallurgiques.

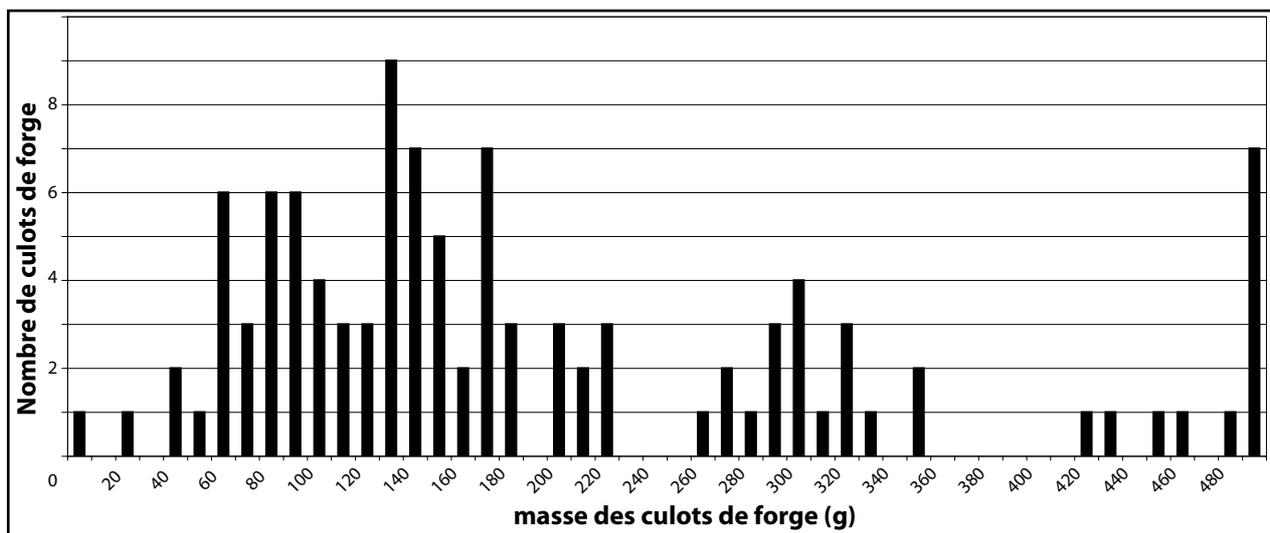
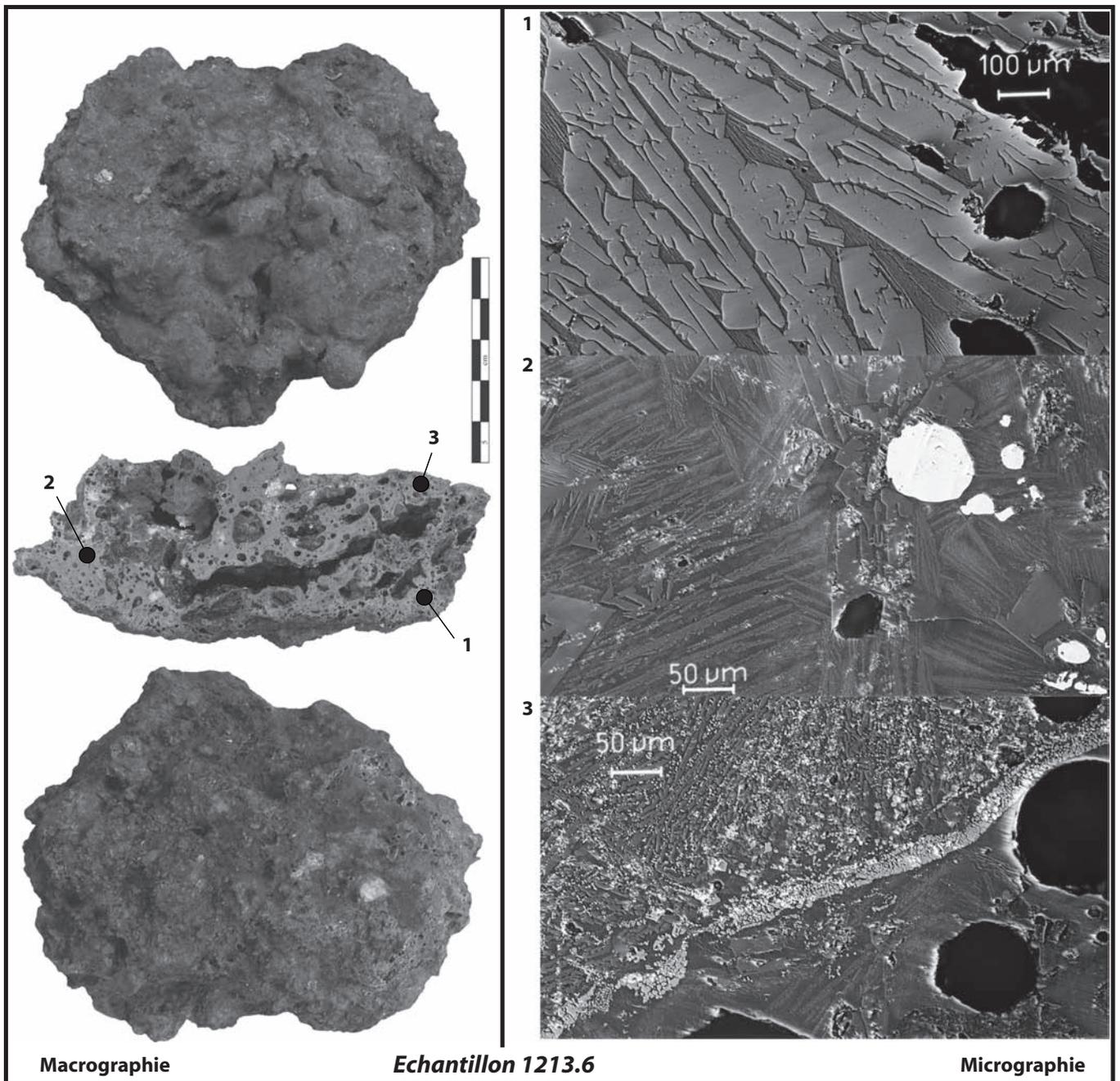


Fig. 135 : distribution, par classes de masse, des culots de forge de la phase 2b (100-130 de n. é.).

N°	L x l x e (mm)	M (g)	Identifications	Synthèse des observations métallographiques	Interprétations
1151.2	127 x 70 x 54	664	<i>culot</i>	Matrice fayalitique très homogène chargée de quelques dendrites de wustite, peu de pertes en oxyde (battitures essentiellement globulaires et parfois en bille) et très peu de pertes en métal (toujours non réoxydées à chaud). Température homogène, moyenne à élevée, avec une petite amplitude.	Forgeage sectorisé et fondé sur la répétition d'une phase de travail très précise avec une haute qualité d'exécution.
1212.3	136 x 74 x 36	478			
1212.5	89 x 63 x 26	172		Matrice fayalite très homogène quasiment pure, pratiquement sans wustite et sans perte en oxyde et en métal. Température moyenne à élevée conduite de manière très homogène avec une petite amplitude. Ajouts silicatés et argileux probablement importants.	
1212.4	116 x 91 x 48	428			
1213.6	106 x 79 x 40	298			
1212.2	33 x 28 x 26	38	<i>gromps</i>	Masse ferritique disposant d'une mauvaise propreté inclusionnaire, totalement enrobée dans une gangue de scorie.	Epuration et/ou façonnage de masses ferreuses "sales", proches de la loupe.
1213.2	45 x 21 x 17	22	<i>pseudo-gromps</i>	Masses ferritiques plus ou moins épurées suivant les zones et enveloppées dans de la scorie.	
1213.4	34 x 20 x 14	24			
1212.1	32 x 27 x 9	22	<i>chute de forge</i>	Assemblage de nombreuses feuilles essentiellement ferritiques et de bonne propreté inclusionnaire.	Martelage et soudures de masses ferreuses dont la qualité est variable.
1213.1	30 x 26 x 11	28		Assemblages de nombreuses feuilles avec des taux de carbone et des taux d'épuration inégaux.	
1213.3	38 x 27 x 17	22			
1230.1	62 x 35 x 20	244	<i>demi-produit</i>	Courte barre constituée d'un assemblage de feuilles très correctement épurées et plus ou moins aciérées (98% de la surface observée et en moyenne à 0,4 % de C).	Demi-produit aciéré à haute valeur ajoutée, issu de multiples étapes d'épuration probablement réalisées dans différents lieux.
1151.1	42 x 8 à 15	18	<i>outil</i>	Petite tige composée d'un acier eutectoïde entièrement trempé.	Probable outil à percussion indirecte (poinçon?)

Fig. 136 : bilan répertorié des analyses métallographiques.



- 1 : matrice fayalitique à lattes sans wustite.
 2 : bille métallique non réoxydée dans une matrice fayalitique à lattes sans wustite.
 3 : battiture lamellaire dans un bain fayalitique possédant un peu de wustite.

Fig. 137 : observations métallographiques du culot de forge 1213.6.

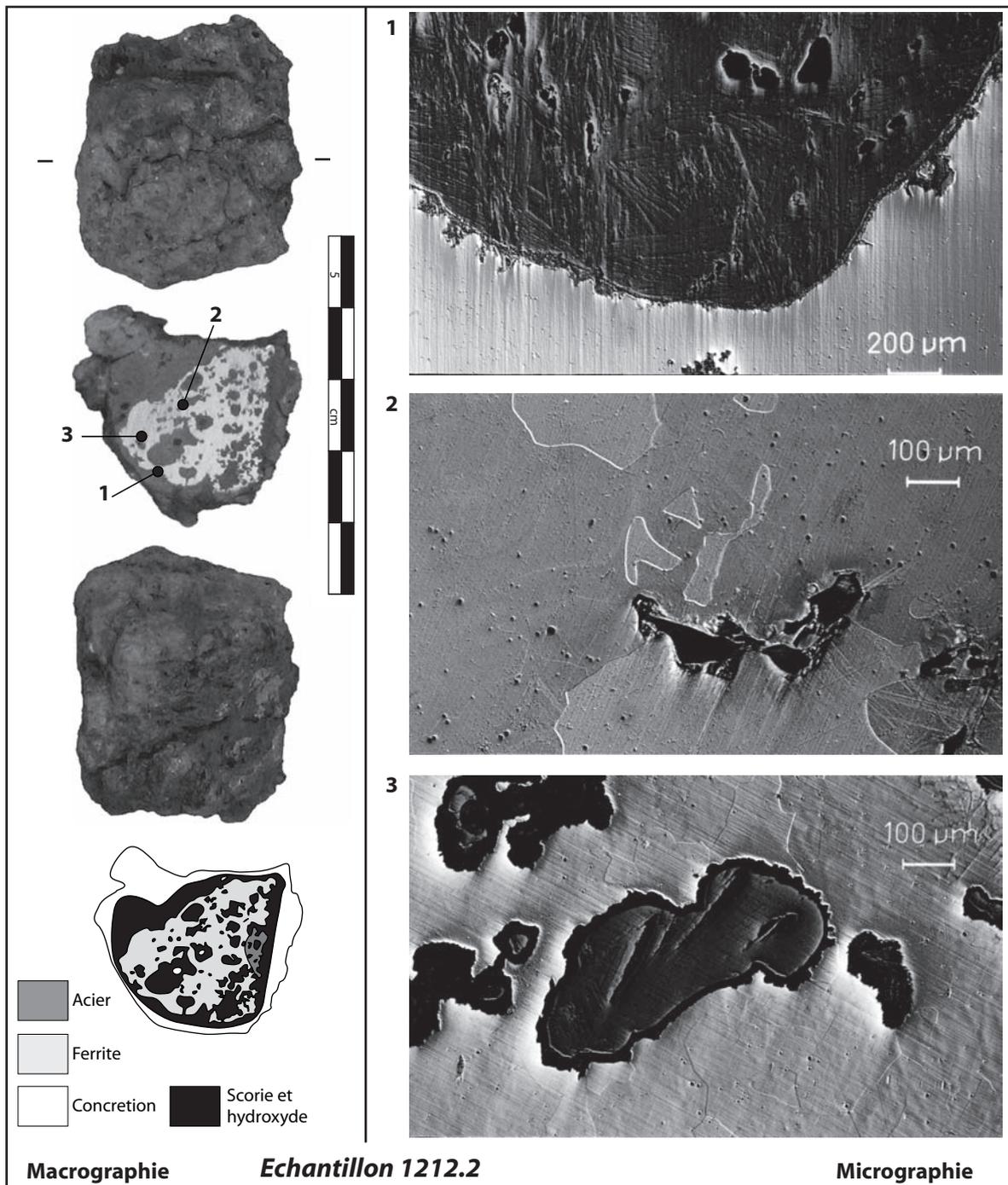
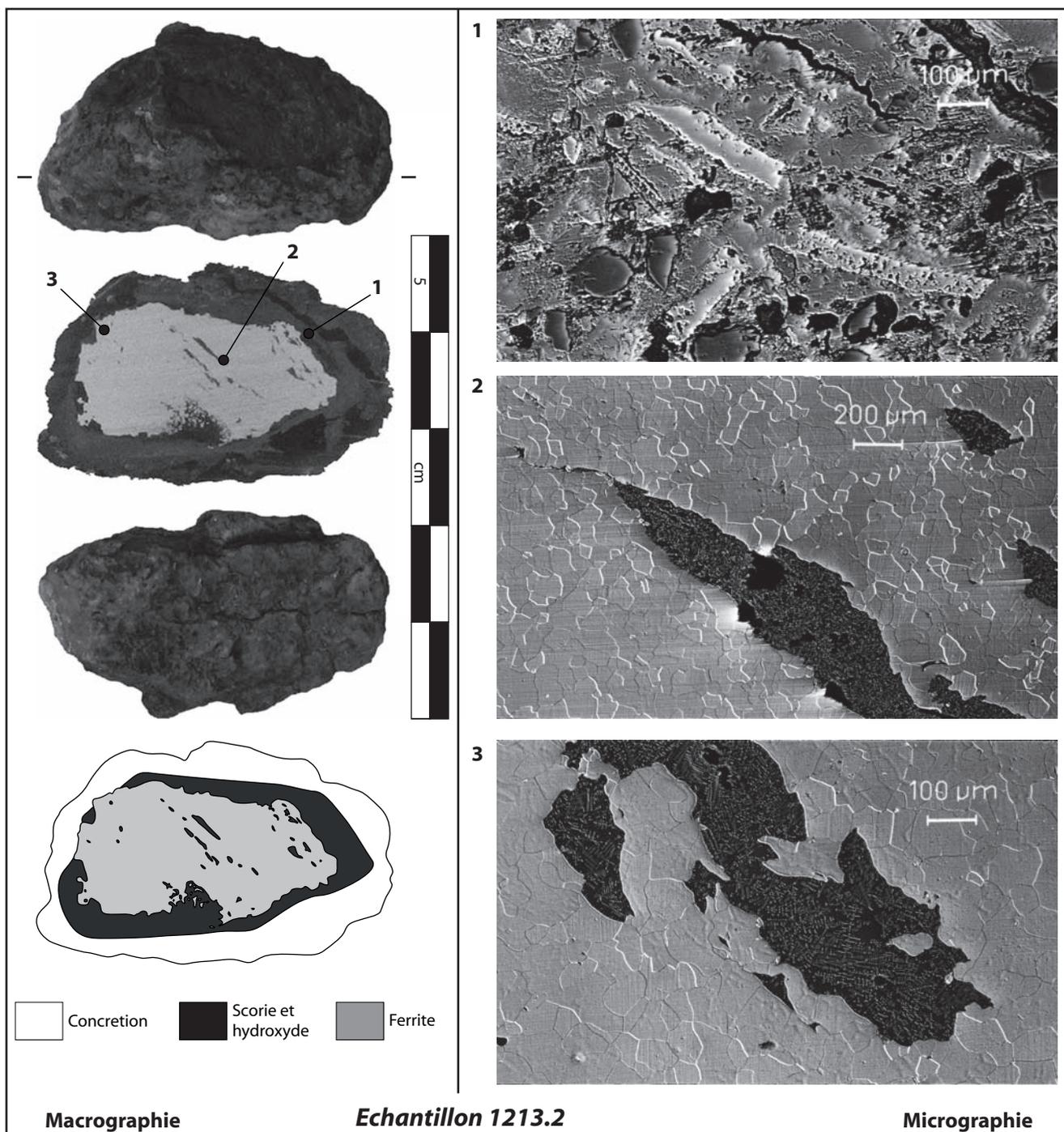


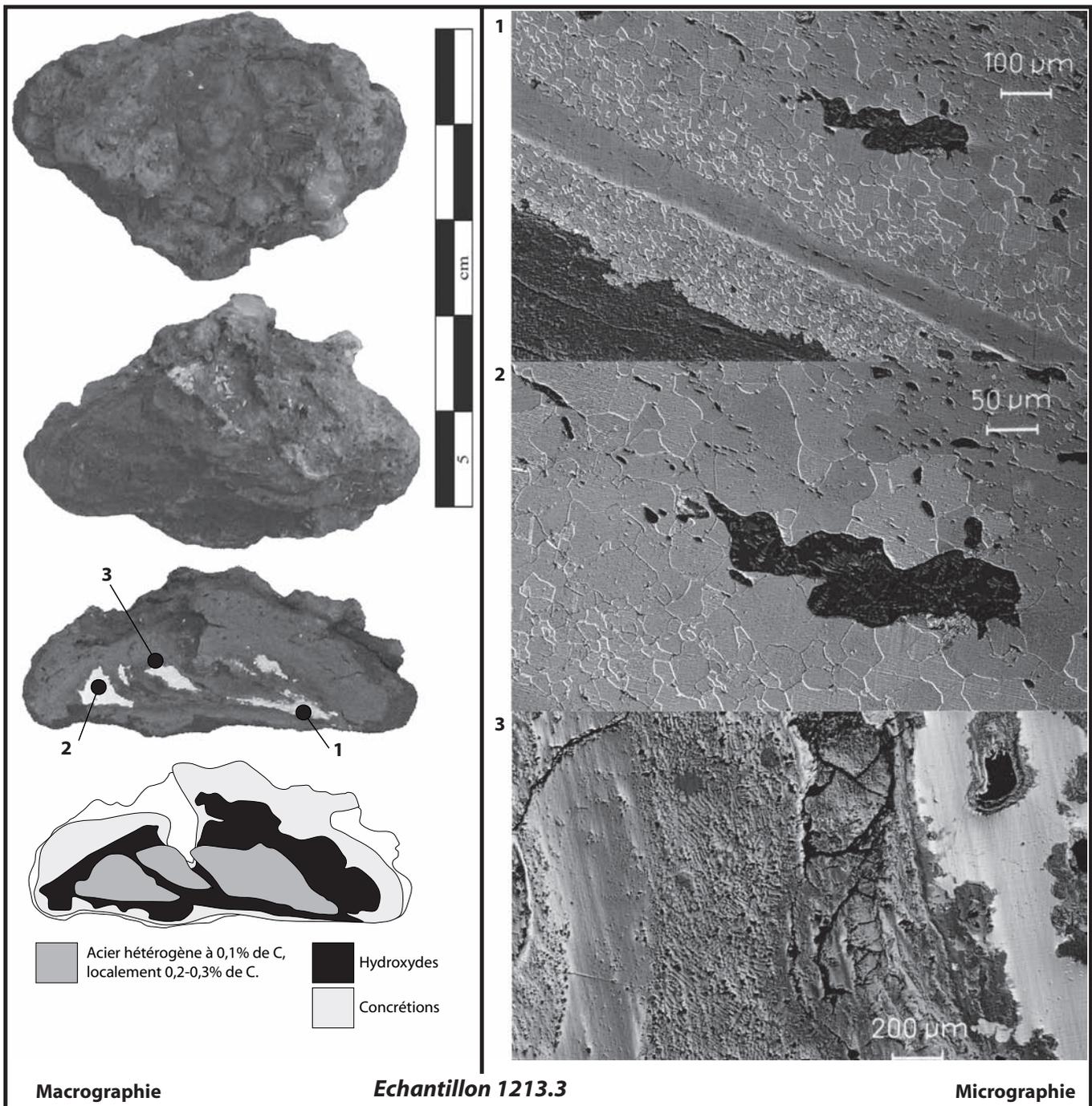
Fig. 138 : observations métallographiques du *groups* 1212.2.



1 : concrétion périphérique mêlant des battitures lamellaires et du sédiment.

2 et 3 : après l'attaque au Nital, grosses inclusions fayalitiques avec des dendrites de wustite dans un métal ferritique.

Fig. 139 : observations métallographiques du pseudo-gromps 1213.2.

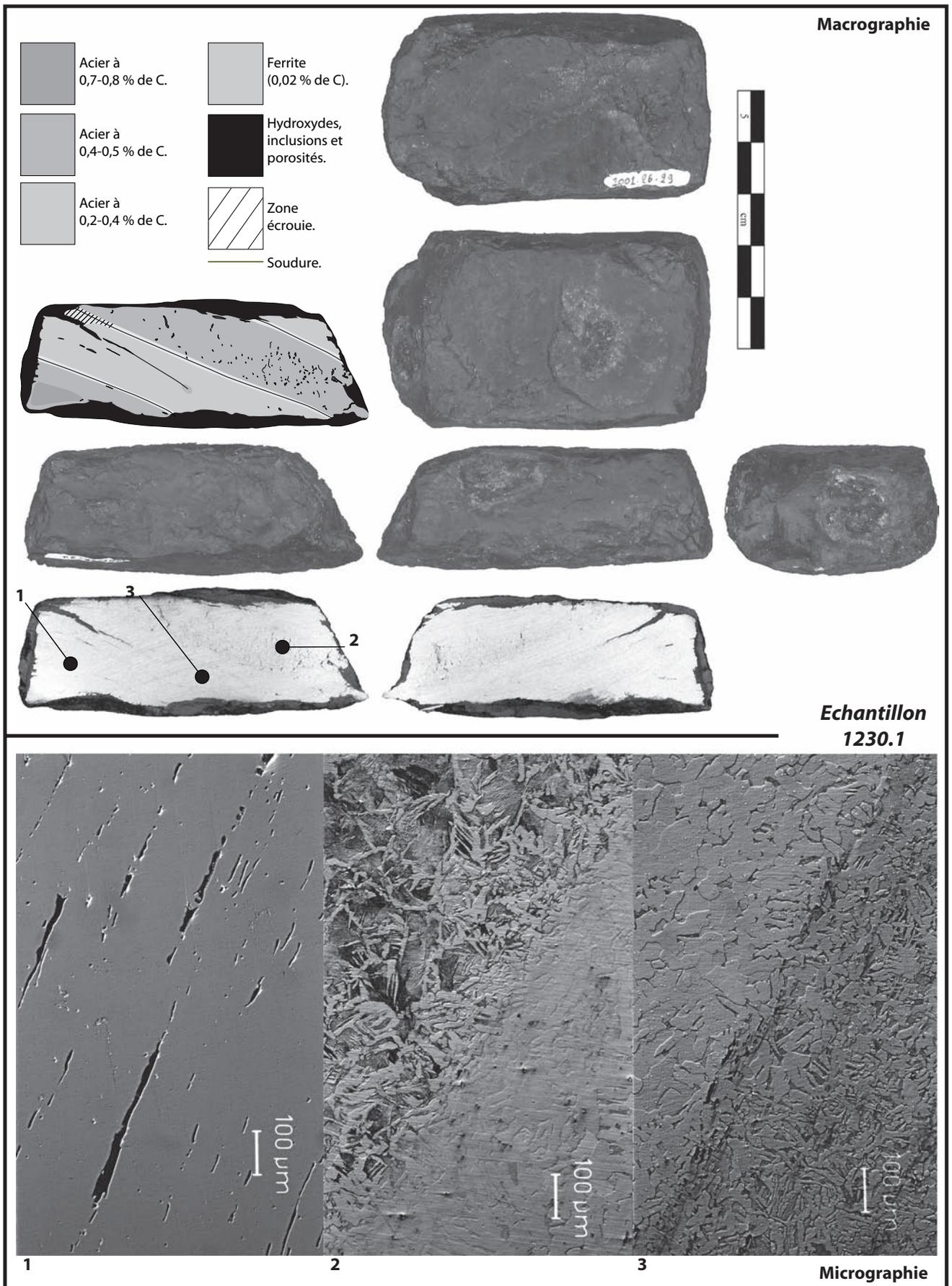


1 : après l'attaque au Nital, soudure entre deux feuilles ferritiques au taux d'épuration inégal.

2 : après l'attaque au Nital, zone ferritique avec un taux d'épuration différentiel. En haut, partie dite "sale" avec des inclusions plus ou moins refermées.

3 : avant l'attaque au Nital, zone de jonction entre le métal, l'hydroxyde, la scorie et une battiture lamellaire.

Fig. 140 : observations métallographiques de la chute de forge 1213.3.



- 1 : avant l'attaque au Nital, inclusions et replis partiellement écrasés.
 2 : après l'attaque au Nital, soudure entre de la ferrite (0,02% de C) et un acier à 0,3-0,4 %.
 3 : après l'attaque au Nital, soudure entre un acier à 0,1% de C et un acier à 0,2-0,3 %.

Fig. 141 : observations métallographiques du demi-produit 1230.1.

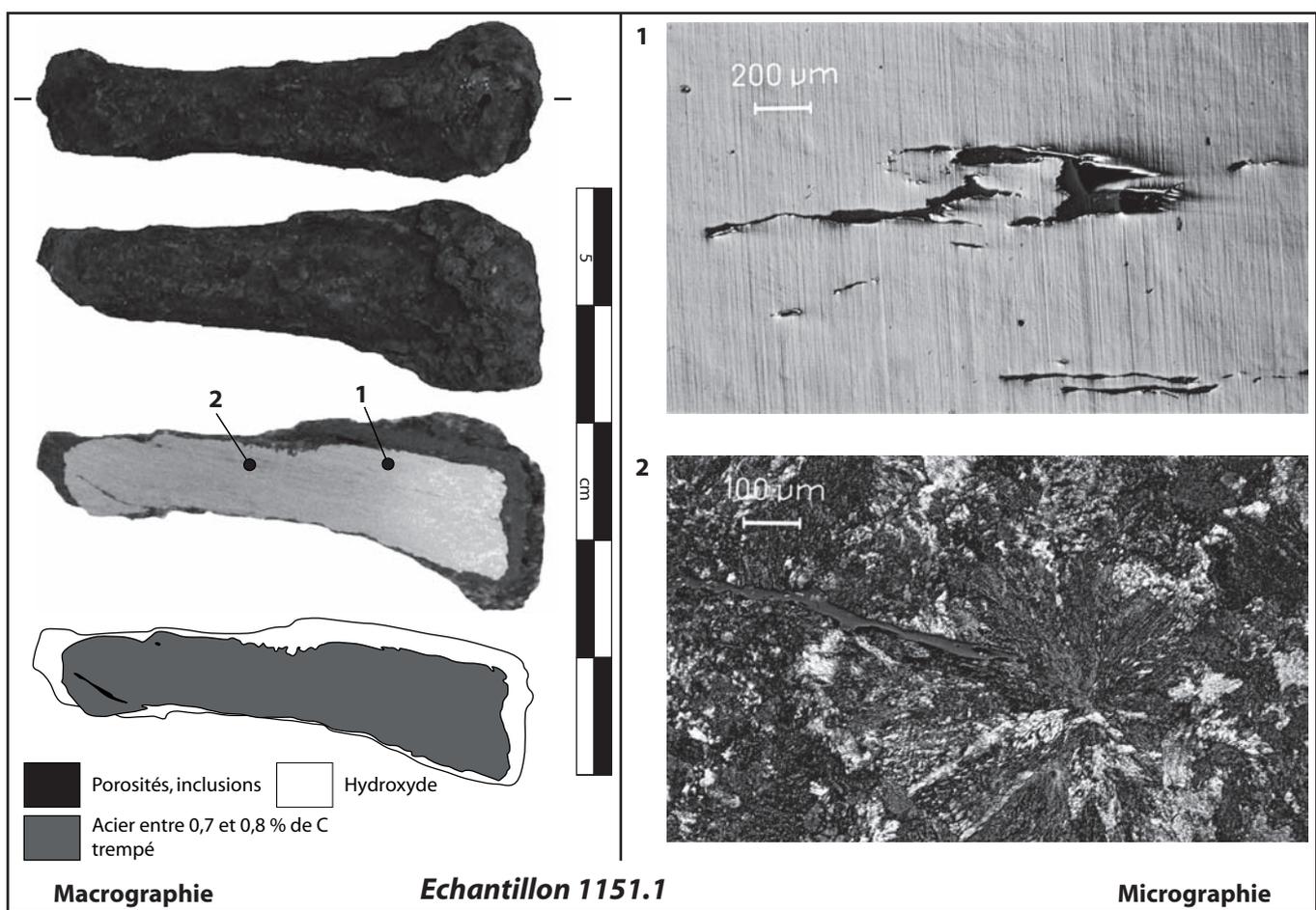


Fig. 142 : observations métallographiques de l'outil type poinçon 1151.1.

4. LE BÂTIMENT B DE LA MADELEINE II (CLERMONT-L'HÉRAULT, 34) AUX IV^E-V^E SIÈCLES

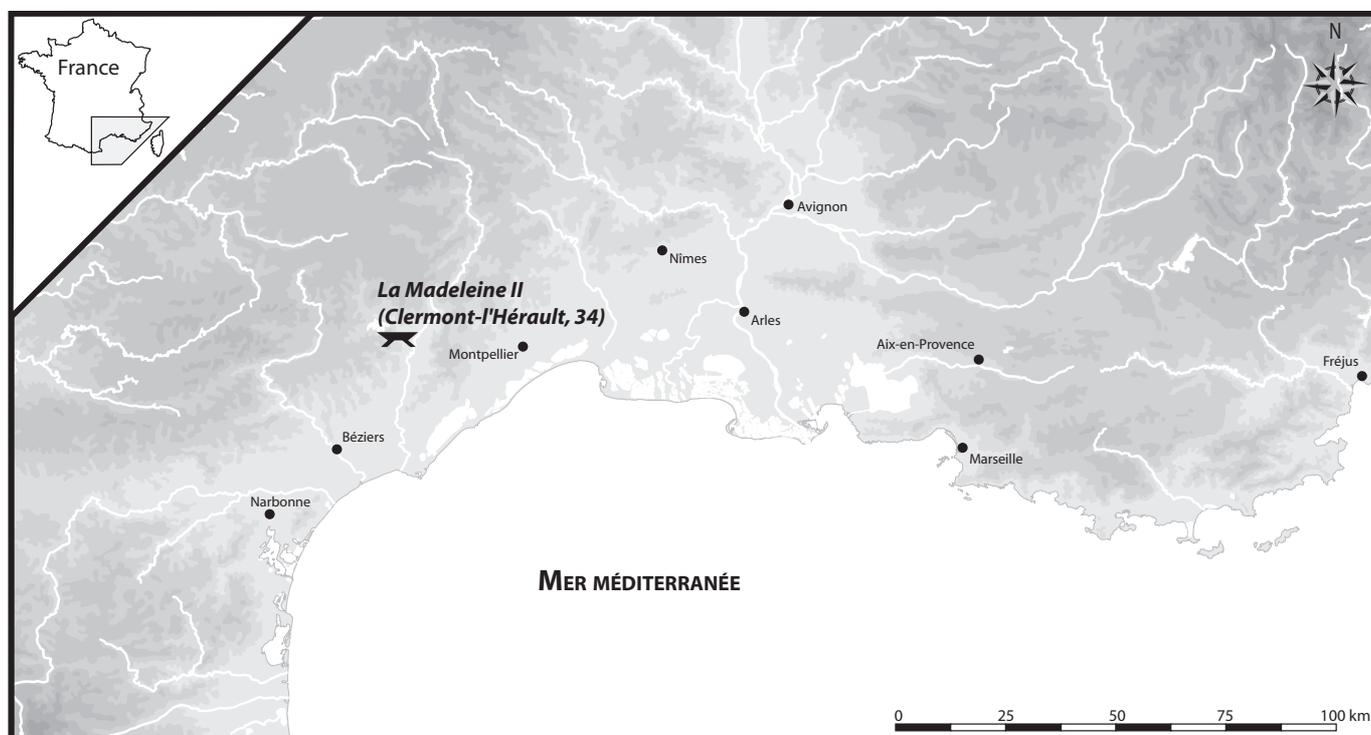


Fig. 143 : carte de localisation du site.

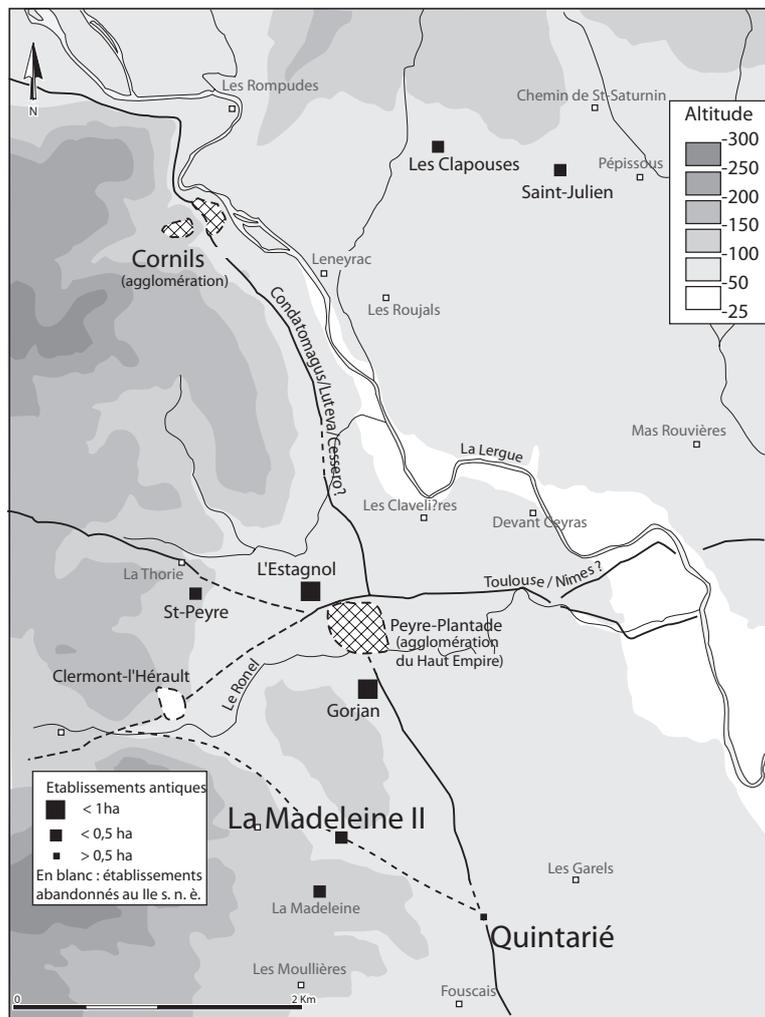


Fig. 144 : le site dans son contexte micro-régional (d'après L. Schneider).

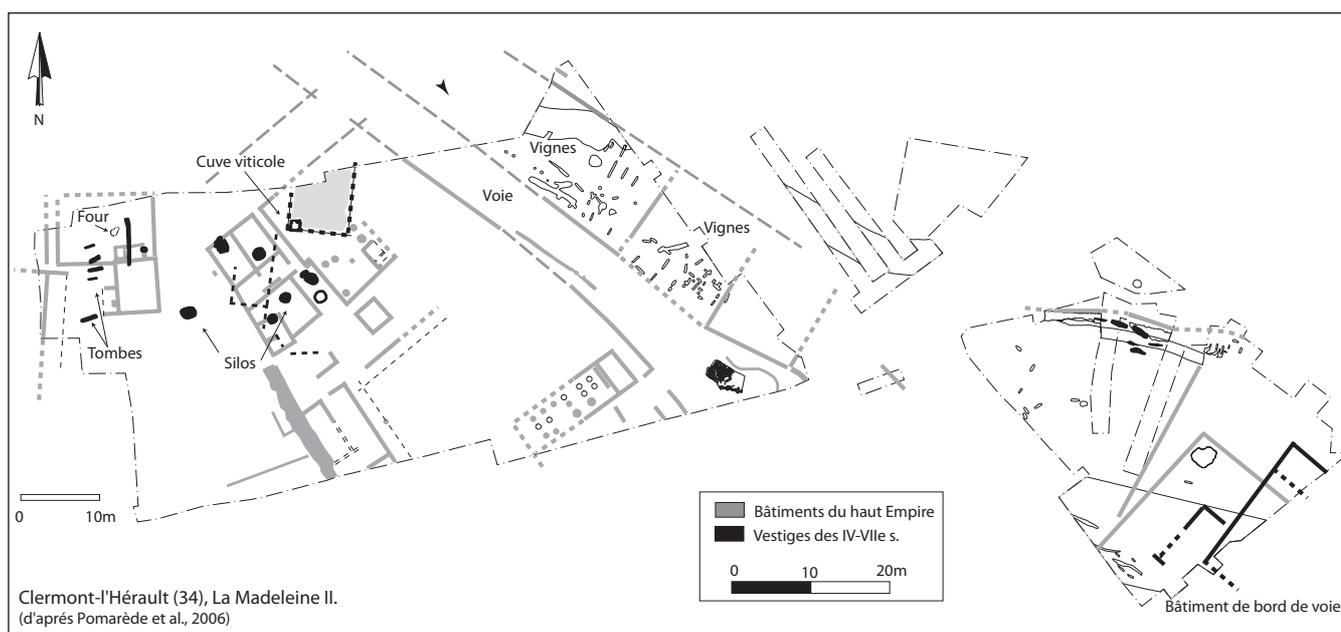


Fig. 145 : le site dans son contexte archéologique proche (d'après H. Pomarèdes).

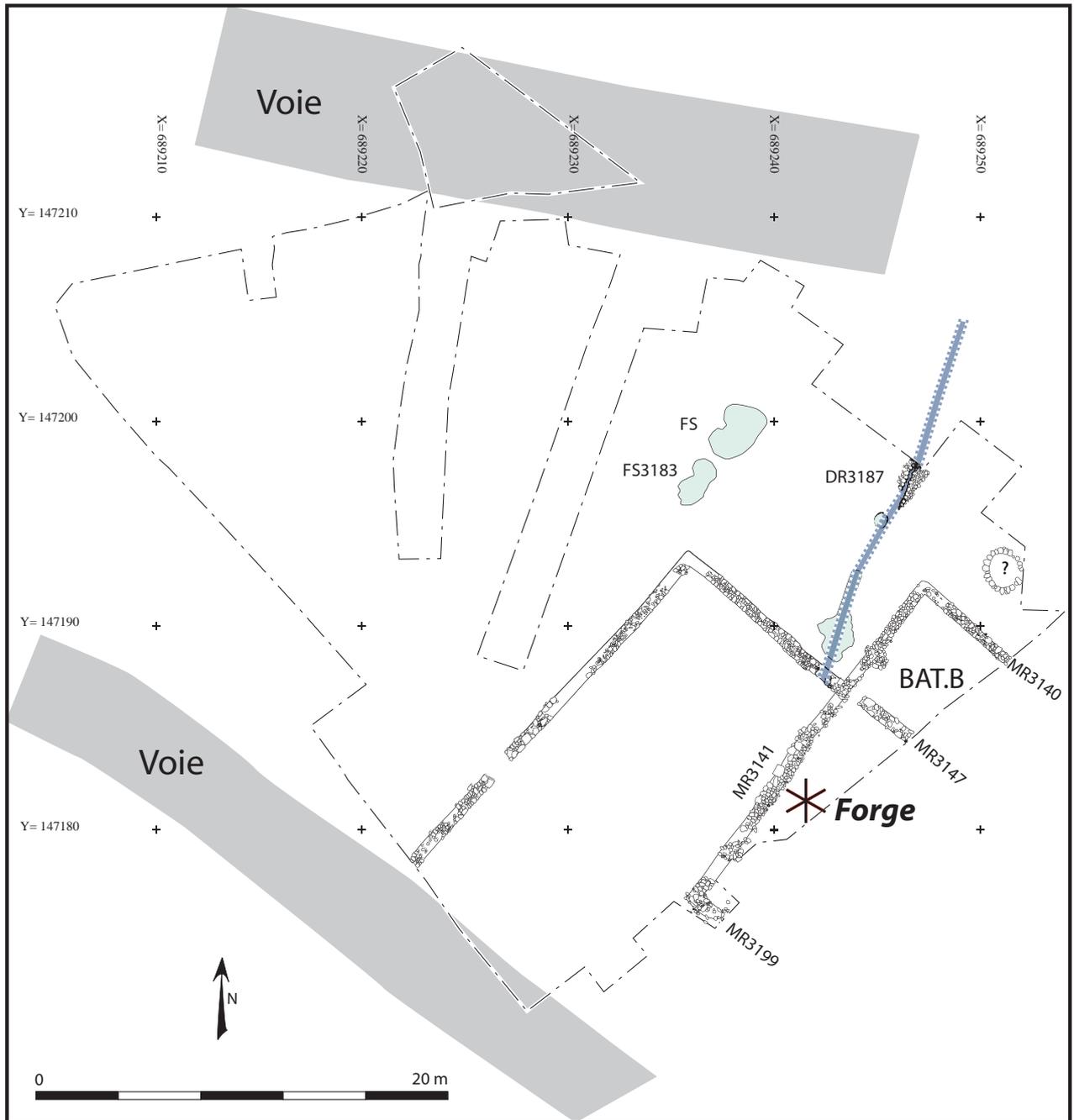


Fig. 146 : plan général du site et localisation du contexte métallurgique (d'après A. Bergeret).

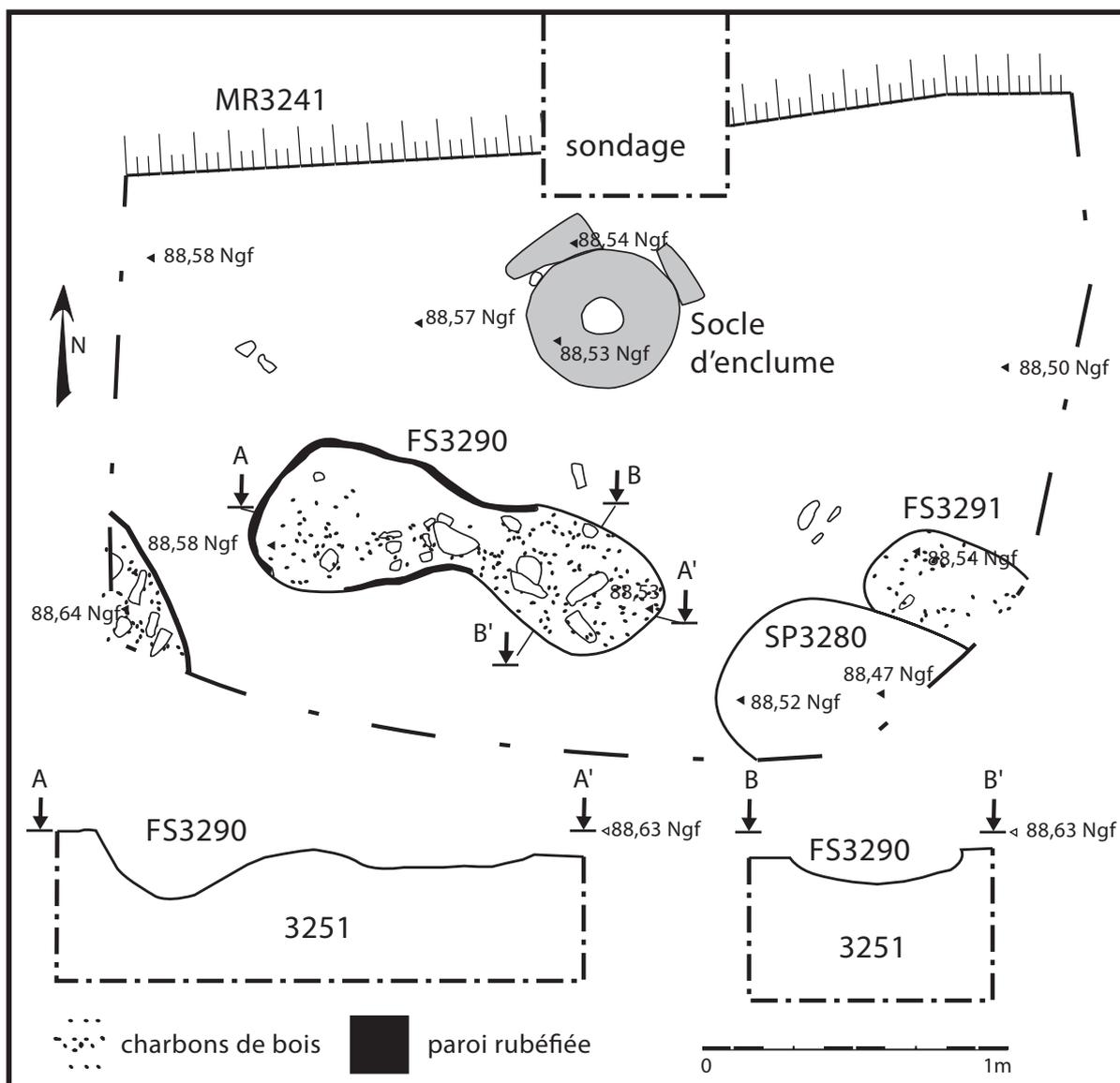


Fig. 147 : plan détaillé de la forge (d'après A. Bergeret et S. Barbey).

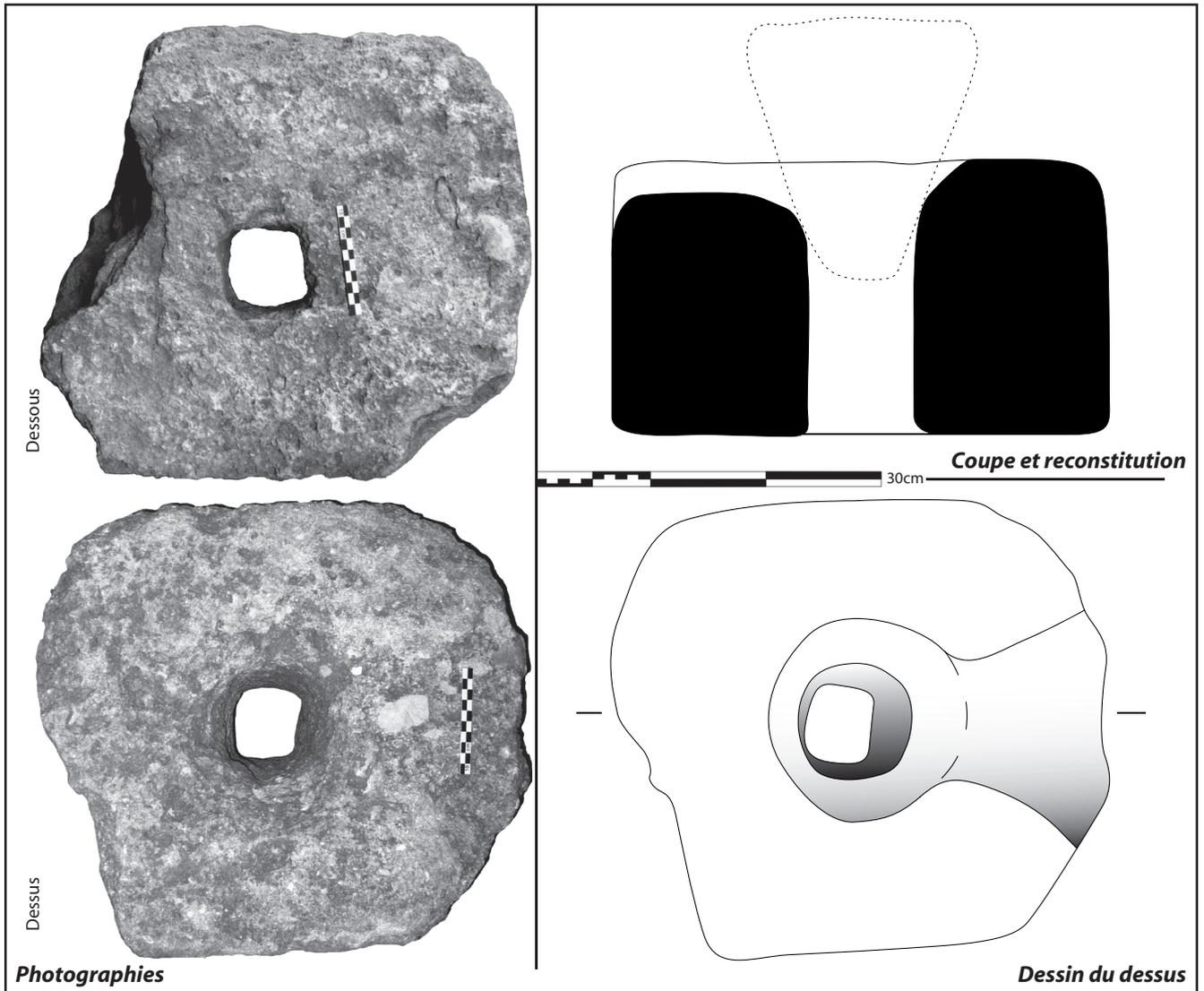


Fig. 148 : le support de l'enclume.

Aménagements/ interprétations		Aménagements métallurgiques				Sol et occu- pation SL3287	
		foyer de forge FS3290		fosse dépotoir FS3291			
Litre de sédiment tamisé		19		10		0	
Types		nbre	m (g)	nbre	m (g)	nbre	m (g)
Scorie	en culot magnétique			1	290		
	informe	peu dense		40	220		
		magnétique			7	400	
	gromps pseudo-gromps			2	240		
	battiture				410		
	sous total			50	1560		
Objet ferreux	clou			1	10		
	fragment de loupe			1	190		
	sous total			2	200		
Total				52	1760		

Fig. 149 : répartition spatiale, en nombre et en masse, des types de mobiliers métallurgiques dans le bâtiment.

N°	L x l x e (mm)	M (g)	Identi- fications	Synthèse des observations métallographiques	Interprétations
3291.1	78 x 71 x 68	290	Culot	Matrice hétérogène en grande partie constituée d'un mélange d'une matrice fayalitique et d'une mélasse argileuse. Quatre morceaux d'acier totalement hydroxydé baignent dans ce mélange et couvrent environ 10 % de la section.	Culot de forge probablement associé à une phase d'épuration d'une pièce aciérée.
3291.2	68 x 55 x 30	192	Fragment de loupe	Pièce métallique informe et monobloc renfermant encore de très nombreuses porosités et des replis. Le coeur est très aciéré et trempé (0,7-0,8 % de C), tandis que la périphérie est décarburée jusqu'à la ferrite. Le pourtour est localement enrobé de scorie de forge.	Fragment de loupe en cours de compactage.

Fig. 150 : bilan répertorié des analyses métallographiques.

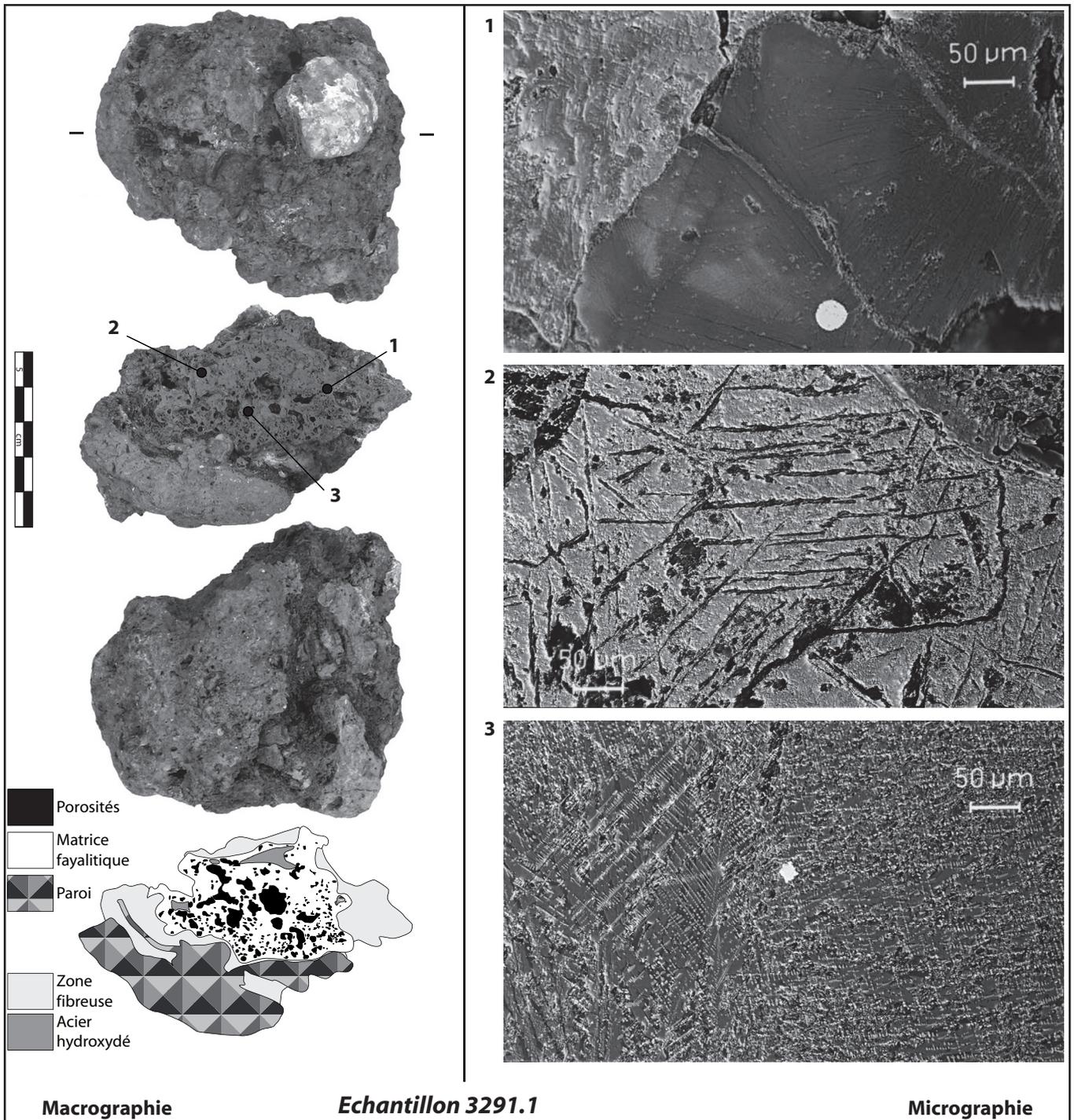
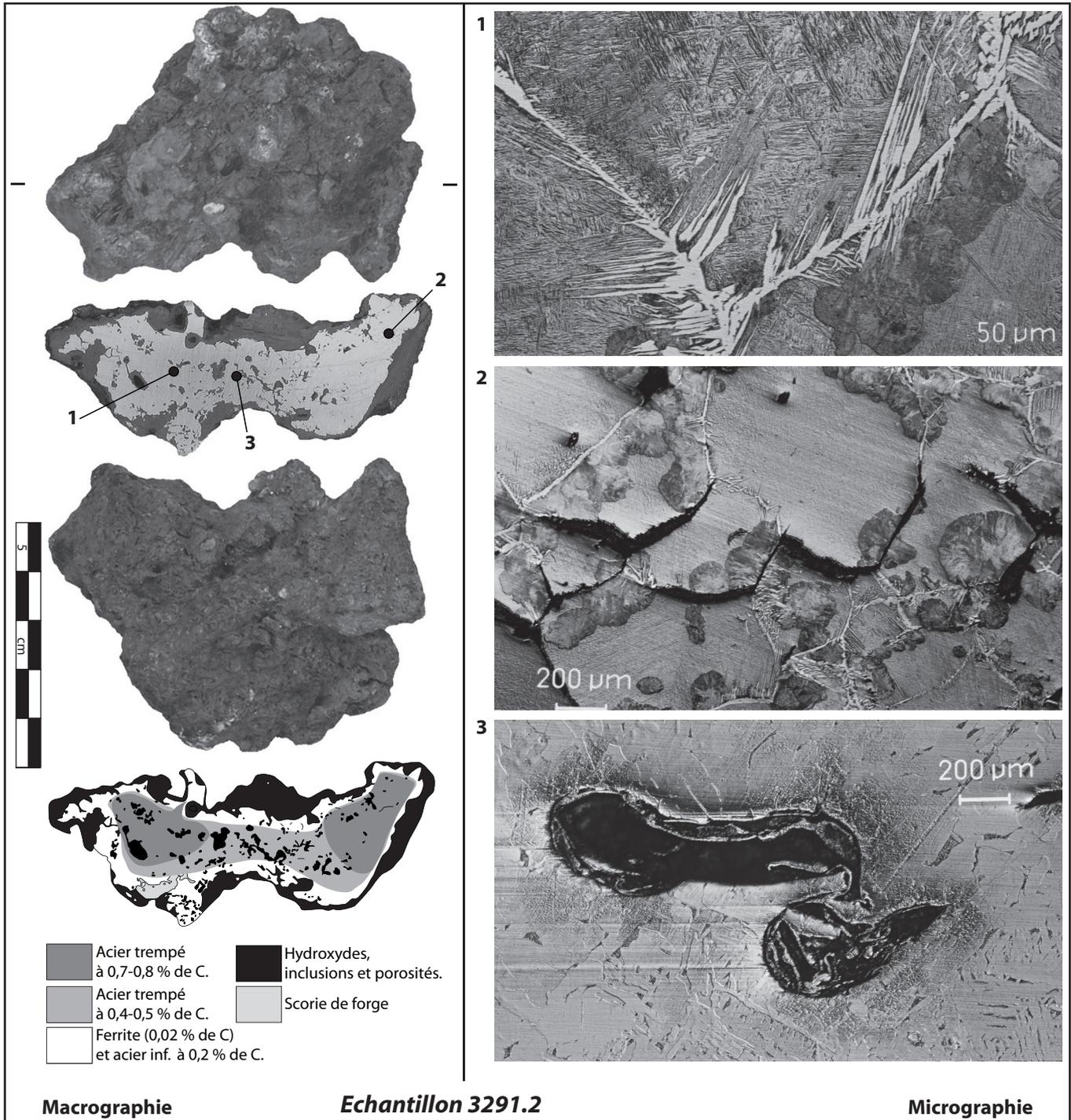


Fig. 151 : observations métallographiques du culot de forge 3291.1.



1 : après l'attaque au Nital, acier trempé à 0,7 % de C (éguilles de bainite).

2 : après l'attaque au Nital, fissures dans les joints de grains d'un acier trempé à 0,7 % de C (bainite nodulaire).

3 : après l'attaque au Nital, repli dans un acier à 0,2-0,3 % de C.

Fig. 152 : observations métallographiques du fragment de loupe en cours de compactage 3291.2.

5. L'ERMITAGE (PAULHAN, 34) AU HAUT MOYEN ÂGE

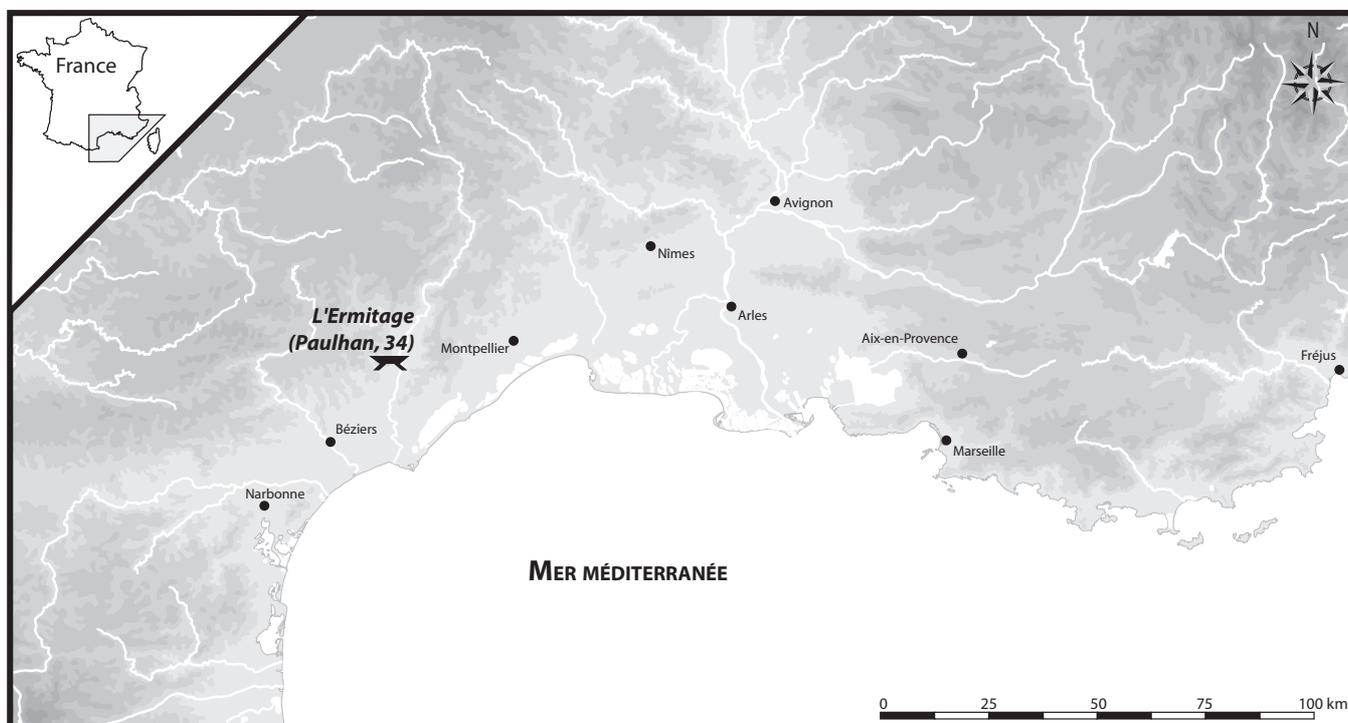


Fig. 153 : carte de localisation du site.

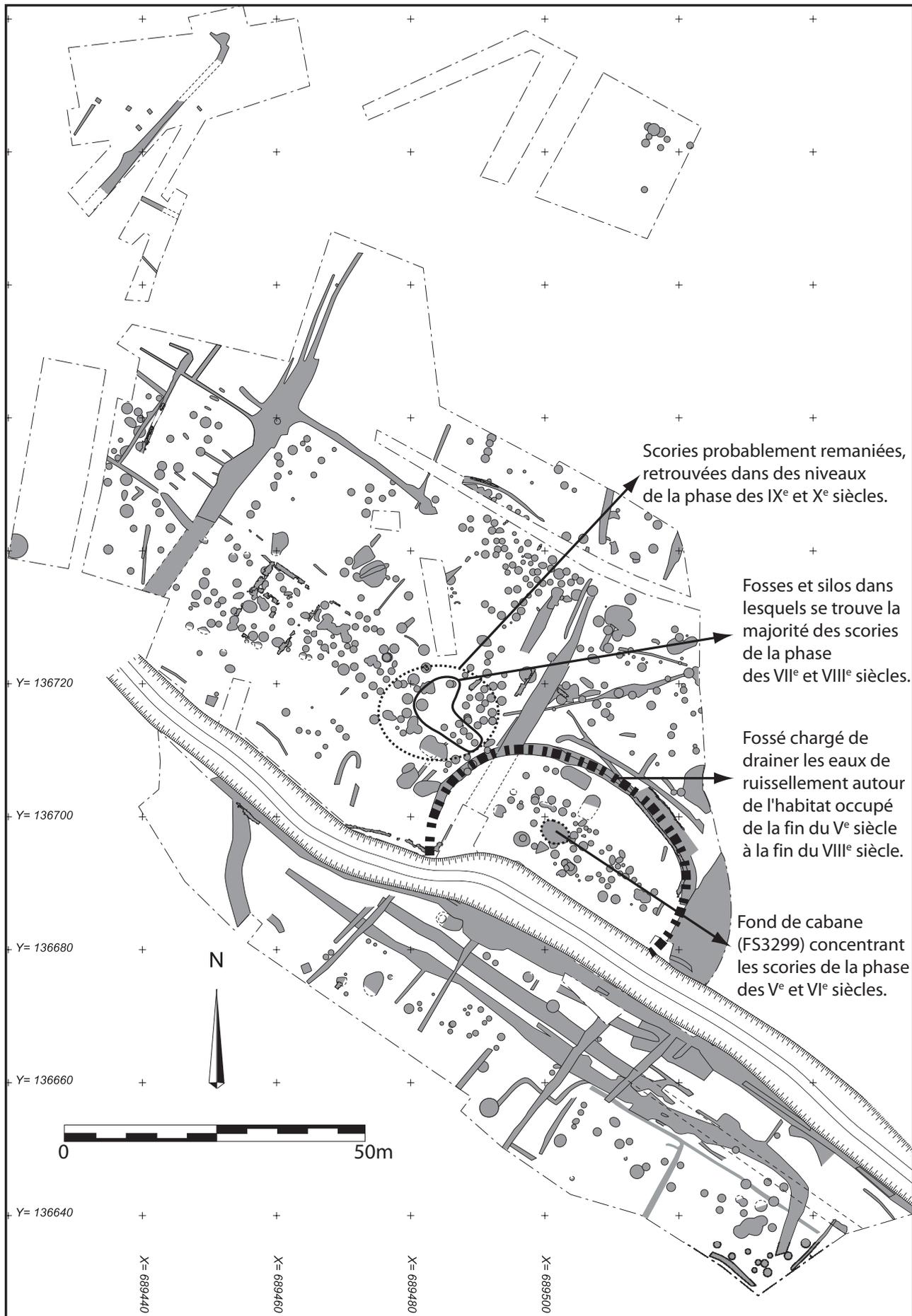


Fig. 154 : plan général, toutes périodes confondues (du V^e au XIV^e siècle), des occupations du site et des concentrations en scories (d'après C. Labarussiat et O. Ginouvez).

Phases		Ve-VIe s.						VIIe-VIIIe s.						IXe-Xe s.		ind.											
Faits (US)	FS3299 (US3300)			<i>sous total</i>		FS3420 (US3421)	FS3422 (US3423)	FS3407 (US3408)	FS3237 (US3236)	FS4207 (US4208)			<i>sous total</i>		<i>sous total</i>		<i>sous total</i>		Total								
Fonctions	fond de cabane	autres				fosse ind.			silo			autres		<i>sous total</i>		<i>sous total</i>		<i>sous total</i>									
Types	nbr	m (g)	nbr	m (g)	nbr	m (g)	nbr	m (g)	nbr	m (g)	nbr	m (g)	nbr	m (g)	nbr	m (g)	nbr	m (g)	nbr	m (g)							
Scories	en culot	5	2540	1	150	6	2690	10	1300	19	6090	3	160	3	220	1	520		36	8290	7	1590	3	530	52	13100	
	informes denses	25	750	16	1020	41	1770	51	2760	66	3420	66	2750	24	510	29	1040	14	500	250	10980	66	910	77	1780	434	15440
	pseudo- gromps							3	340			1	50						4	390			1	50	5	440	
	informes peu denses							4	80										4	80					4	80	
	parois								5	150				3	70				8	220	10	90	6	370	24	680	
	parois avec tuyère							1	230										1	230					1	230	
	Total	30	3290	17	1170	47	4460	69	4710	90	9660	70	2960	30	800	30	1560	14	500	303	20190	83	2590	87	2730	520	29970

Fig. 155 : répartitions chronologique et spatiale, en nombre et en masse, des types de mobiliers métallurgiques du site.

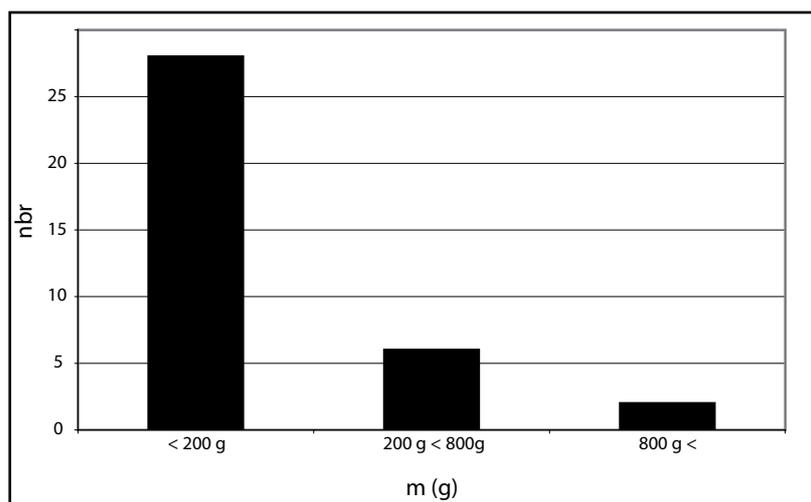
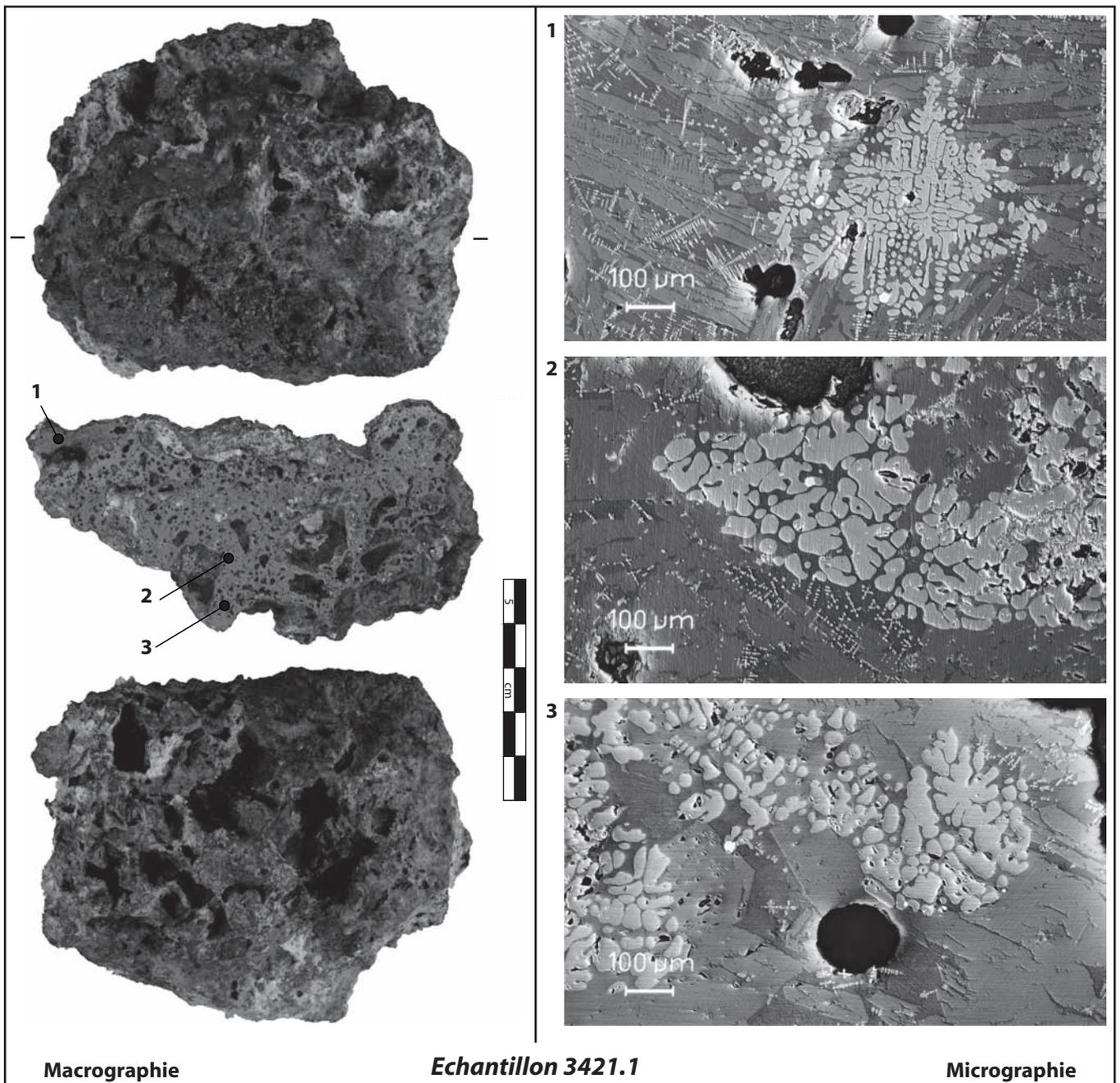


Fig. 156 : distribution, par classes de masse, des culots de forge de la phase des VII^e et VIII^e siècles.

N°	L x l x e (mm)	M (g)	Identifications	Synthèse des observations métallographiques	Interprétations
3408.1	34 x 32 x 30	48	<i>pseudo-gromps</i>	Fragment d'acier hypereutectoïde correctement compacté (en partie hydroxydé) dont le contour est brûlé et enrobé de scorie.	Façonnage de masses aciérées hypereutectoïdes déjà épurées pour fabriquer des objets.
3421.3	70 x 55 x 25	166			
3421.1	80 x 70 x 45	262	<i>culot</i>	Matrice fayalitique homogène possédant de la wustite sous les formes globulaire et dendritique, provenant de la dissolution de battitures globulaires et en bille. Quelques éclats métalliques non réoxydés sont toujours visibles. Localement, la matrice peut être argilo-siliceuse.	Cycles de chauffe à moyenne et haute températures liés à la mise en forme maîtrisée d'objets à partir d'un métal de bonne qualité. Plus temporairement, ces phases sont accompagnées d'ajouts.
3423.2	90 x 67 x 34	256			
3423.1	180 x 130 x 120	2864			

Fig. 157 : bilan répertorié des analyses métallographiques.

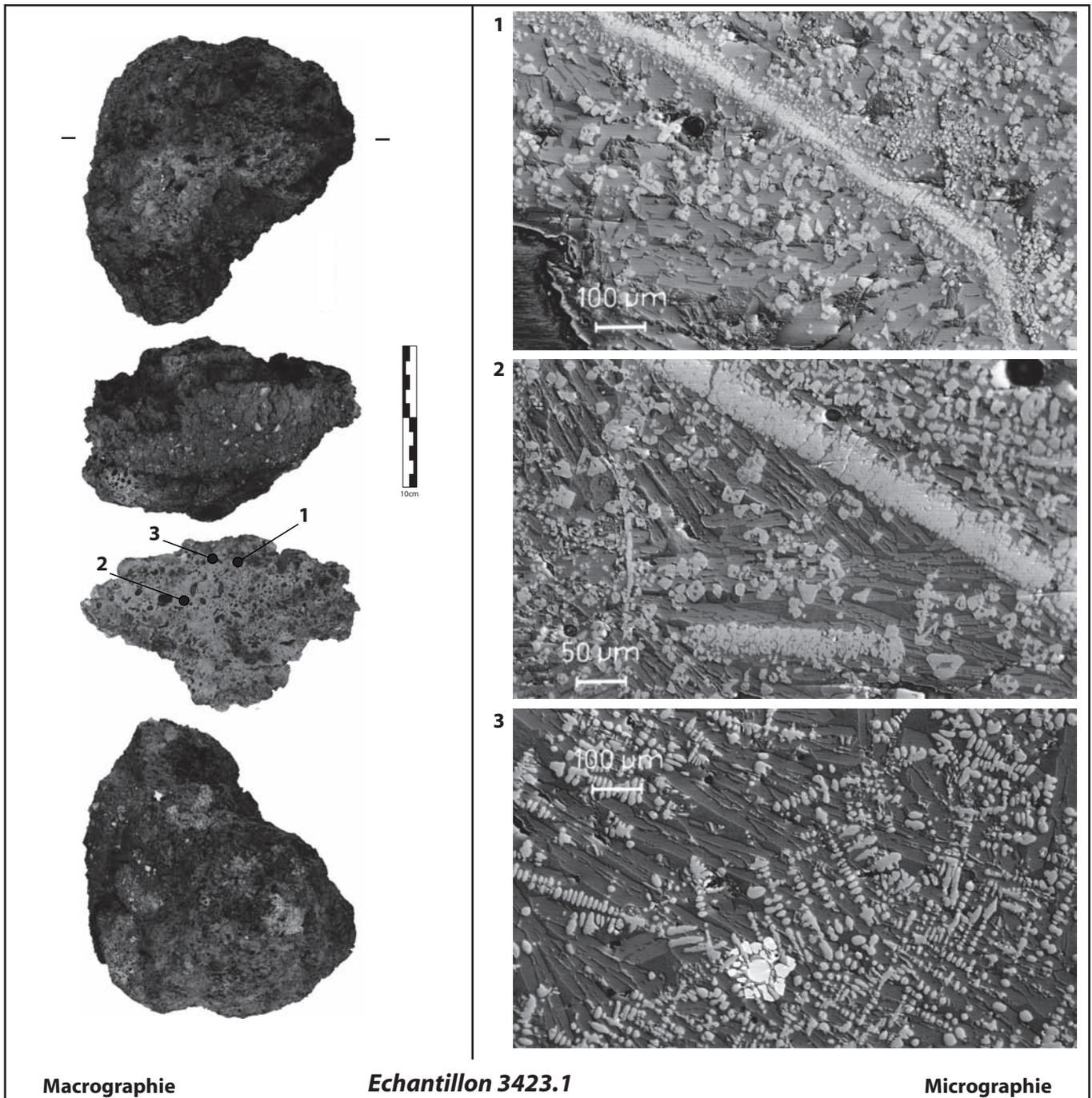


1 : petite battiture bille dans une matrice fayalitique à lattes avec quelques petits éléments métalliques et quelques fines dendrites de wustite.

2 : battiture globulaire dans une matrice fayalitique à pavés avec quelques fines dendrites de wustite.

3 : petite battiture bille dans une matrice fayalitique à pavés.

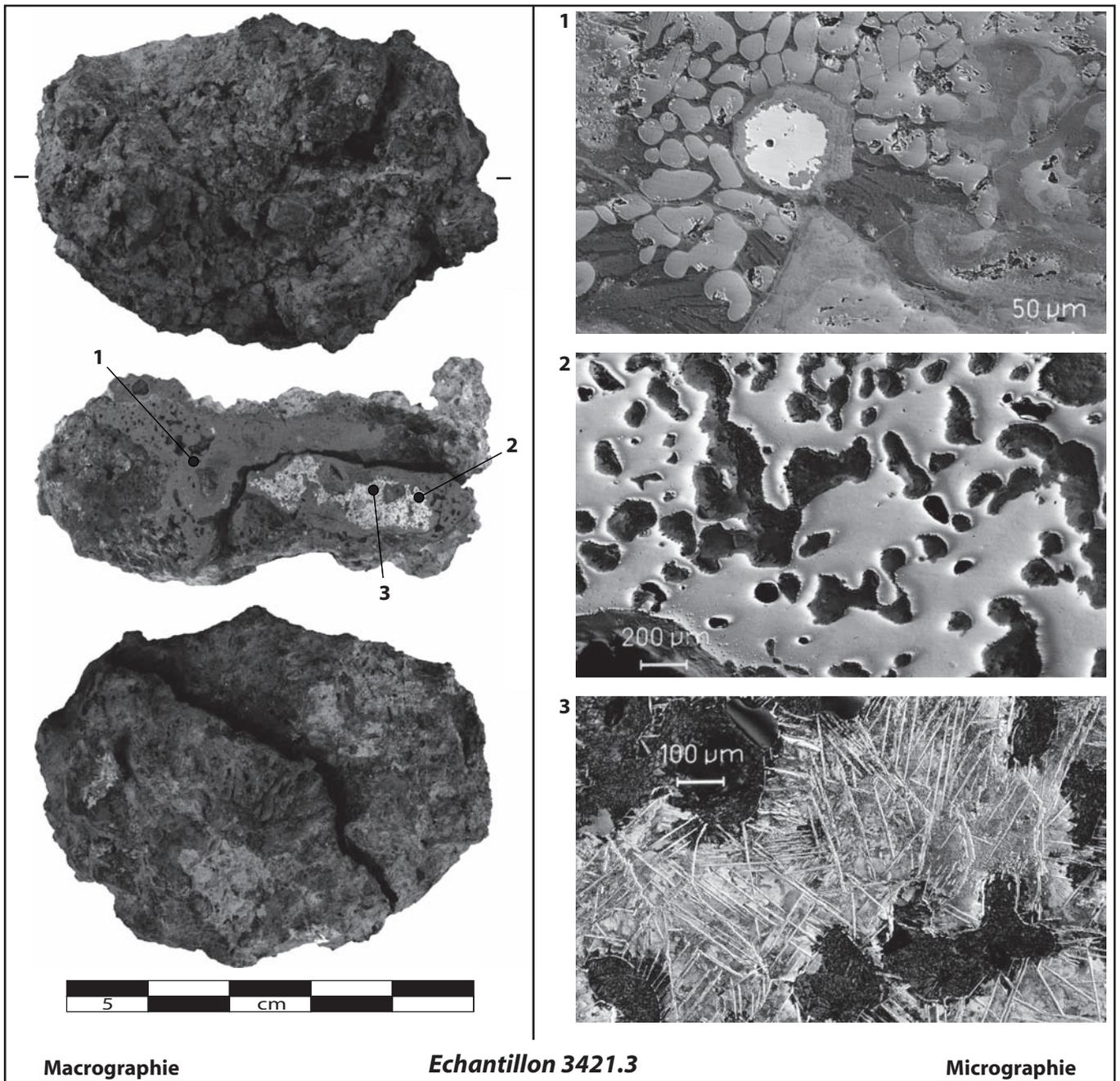
Fig. 158 : observations métallographiques du culot de forge 3421.1.



1 et 2 : battitures lamellaires en cours de dissolution dans une matrice fayalitique à lattes.

3 : petite bille métallique éclatée et non réoxydée dans une matrice fayalitique à lattes avec des dendrites de wustite.

Fig. 159 : observations métallographiques du culot de forge 3423.1.



1 : avant l'attaque au Nital, bille métallique réoxydée à chaud dans une matrice scoriacée.

2 : avant l'attaque au Nital, métal largement hydroxydé.

3 : après l'attaque au Nital, acier hypereutectoïde largement hydroxydé.

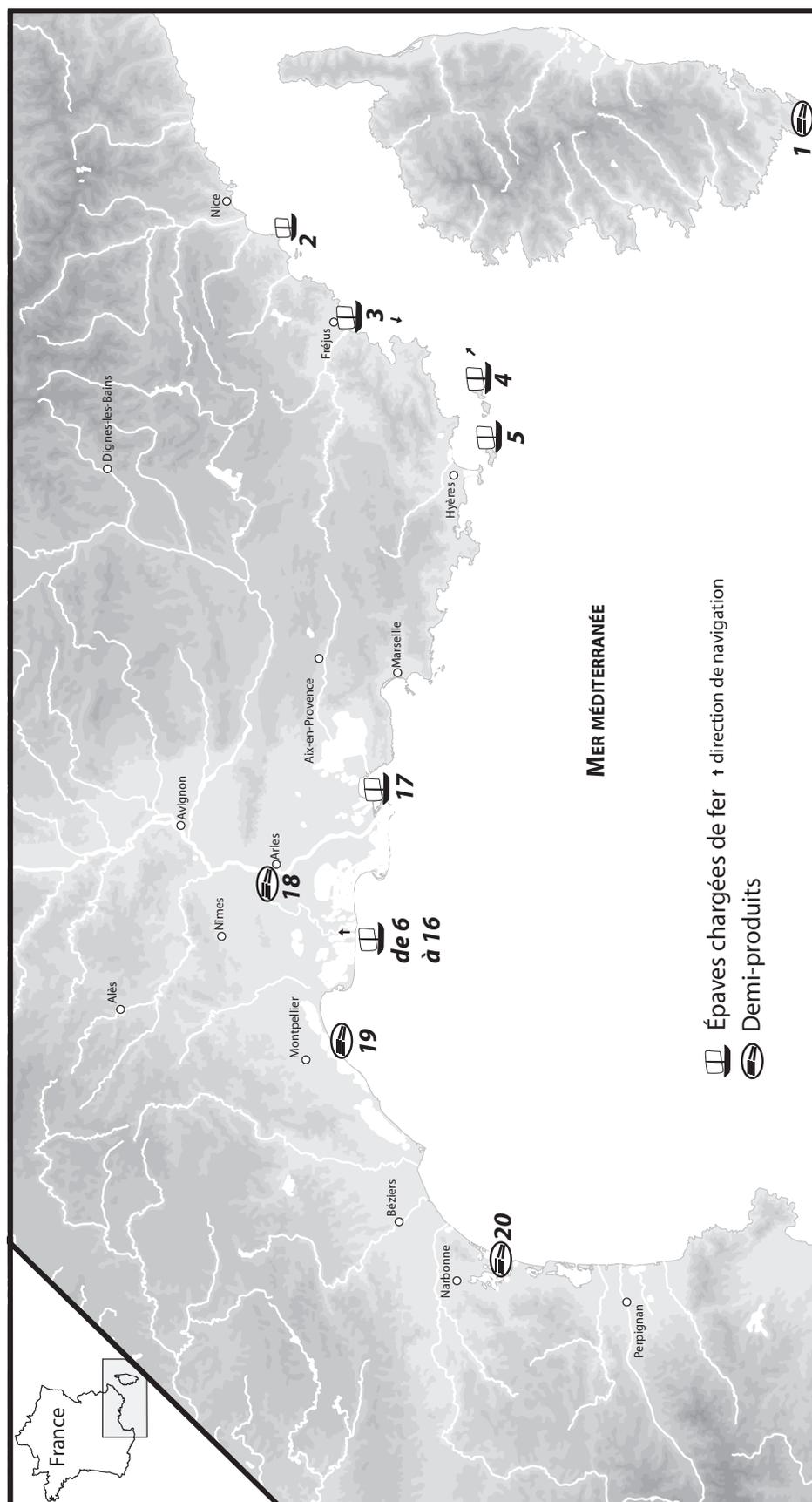
Fig. 160 : observations métallographiques du pseudo-groupe 3421.3.

**PARTIE III : LA CIRCULATION ET LE
COMMERCE DU MATÉRIAU FER**

CHAPITRE 1 : SPÉCIFICITÉS DU SUPPORT ET DÉMARCHE

CHAPITRE 2 : DES DEMI-PRODUITS EN CONTEXTE DE CIRCULATION ET D'UTILISATION

1. DES NAVIRES ANTIQUES CHARGÉS DE FER



Les numéros renvoient à la fig. 164.

Fig. 163 : localisation des épaves chargées de fer et des découvertes de demi-produits en contextes maritime et fluvial autour de la Méditerranée occidentale.

n°	nom	com-mune	dép.	datation	sortes de site	types de demi-produits								estimation en tonnes ou en fréquence			
						1M	1L	2M	3C	4C	4L	5C	6C				
1	Bonifacio		2A	antique	découverte isolée					■				■			
2	Cap Gros	Antibes	06	150 av. - 0	portion d'un chargement de navire	■									1 t		
3	Dramont C	Saint-Raphaël		120 av. - 80 av.			■								1 t		
4	Bagaud 2	Hyères	83	120 av. - 80 av.				■		■					10 / 12 t		
5	Cap des Mèdes			100 av. - 0			?		?						1 t		
6	SM2	Saintes-Maries-de-la-Mer	13	0 - 25		chargement majoritaire de navire	■									100 / 150 t	
7	SM3			0 - 60	■										20 / 50 t		
8	SM6			50 av. - 0			■	■	■	■	■	■	■	■	■	20 t (?)	
9	SM8			0 - 50			■	■	■	■	■	■	■	■	■	20 t (?)	
10	SM9			25 - 50	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	100 / 150 t	
11	SM10			0 - 100	■		■	■	■	■	■	■	■	■	■	20 t	
12	SM11			antique													indéterminé
13	SM23			50 av. - 100 ap.			■										20 t (?)
14	SM24			120 av. - 75 ap.				■									5 t (chargement récupéré)
15	SM25			100 av. - 100 ap.				■									100 t
16	SM27	antique												indéterminé			
17	Saint-Gervais I	Fos-sur-Mer	13	~140	contexte portuaire			■						1 t			
18	Trinquetaille	Arles	13	antique		■									1 exemplaire		
19	Palavas-les-Flots	34	antique			■		■							5 exemplaires		
20	Mateille A	Gruissan	11	antique					■				■	10 exemplaires			
Légende			Barres attestées mais indisponibles														
			Barres attestées et disponibles														
		?	Correspondance typologique problématique														

Fig. 164 : les épaves chargées de fer et les découvertes de demi-produits en contextes maritime et fluvial autour de la Méditerranée occidentale : nomination, localisation, datation, type morphologique et estimation quantitative.

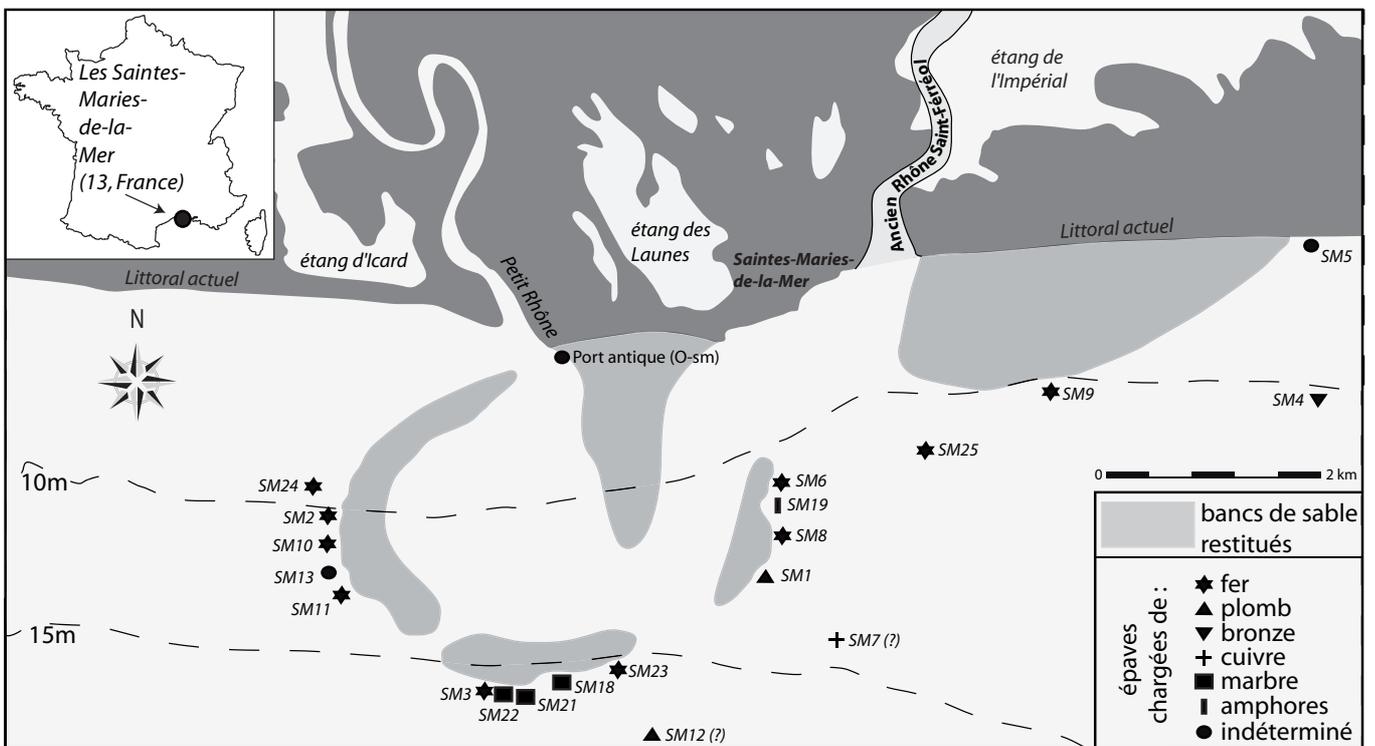


Fig. 165 : Localisation et chargement des épaves des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) (d'après L. long).

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. 166 : typologie des demi-produits des épaves des Saintes-Maries-de-la-Mer (d'après L. Long et D. Djaoui).

types épaves		1M	1L	2M	3C	4C	4L	5C	6C	Total	
		Bagaud 2			3 1 1		2 0 0				
Saintes-Maries-de-la-Mer	SM2	5 2 4				3 1 1				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 9 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 4 10	6 4 4	10 4 5	1 0 0	12 4 6	6 2 7	1 1 1	4 1 1	54 21 35		
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. 167 : tableau croisé synthétisant l'échantillonnage des demi-produits des épaves de Méditerranée occidentale : Bagaud 2 (Hyères, 83) et les Saintes-Maries-de-la-Mer (13).



Fig. 168/1 : les demi-produits de type 1L des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.

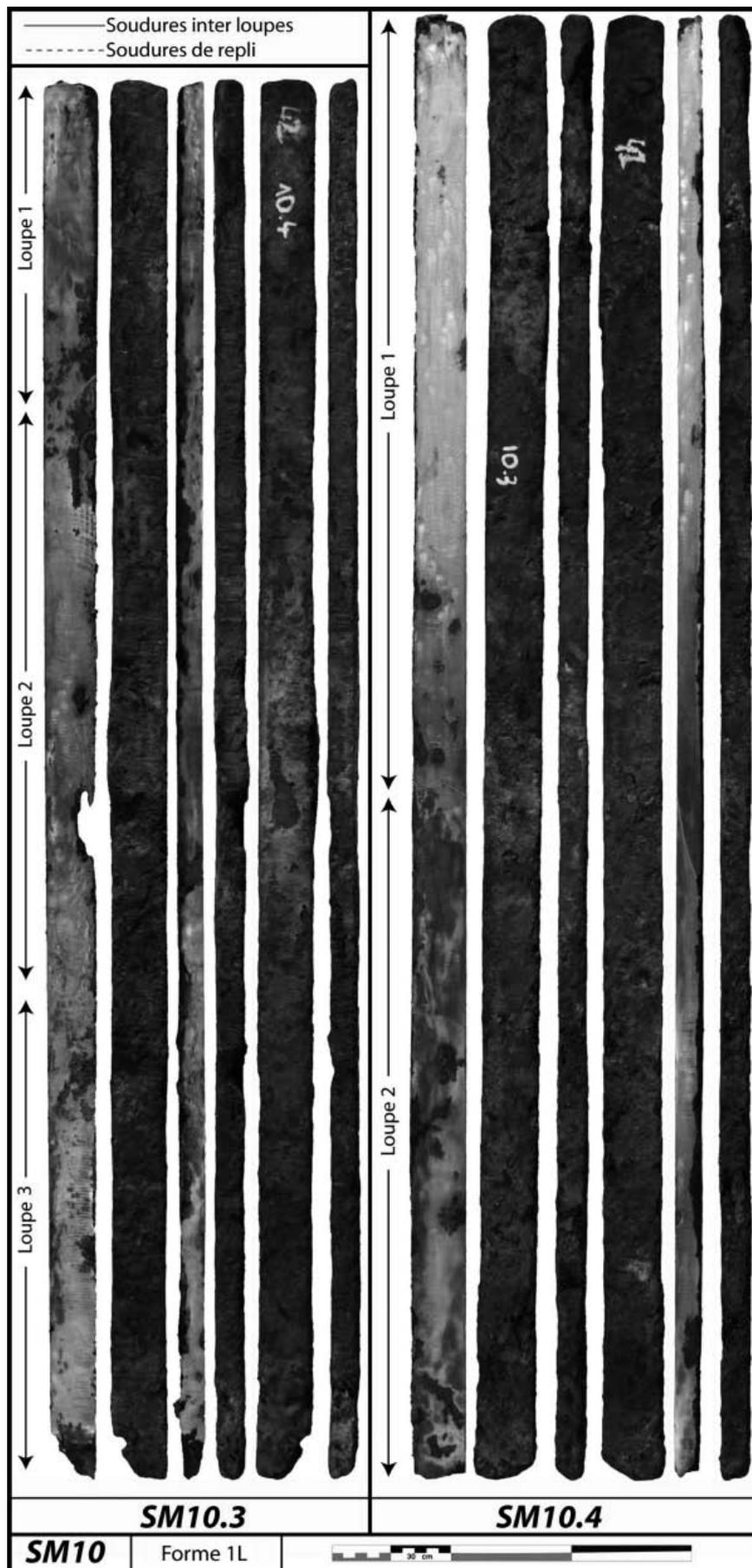


Fig. 168/2 : les demi-produits de type 1L des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.

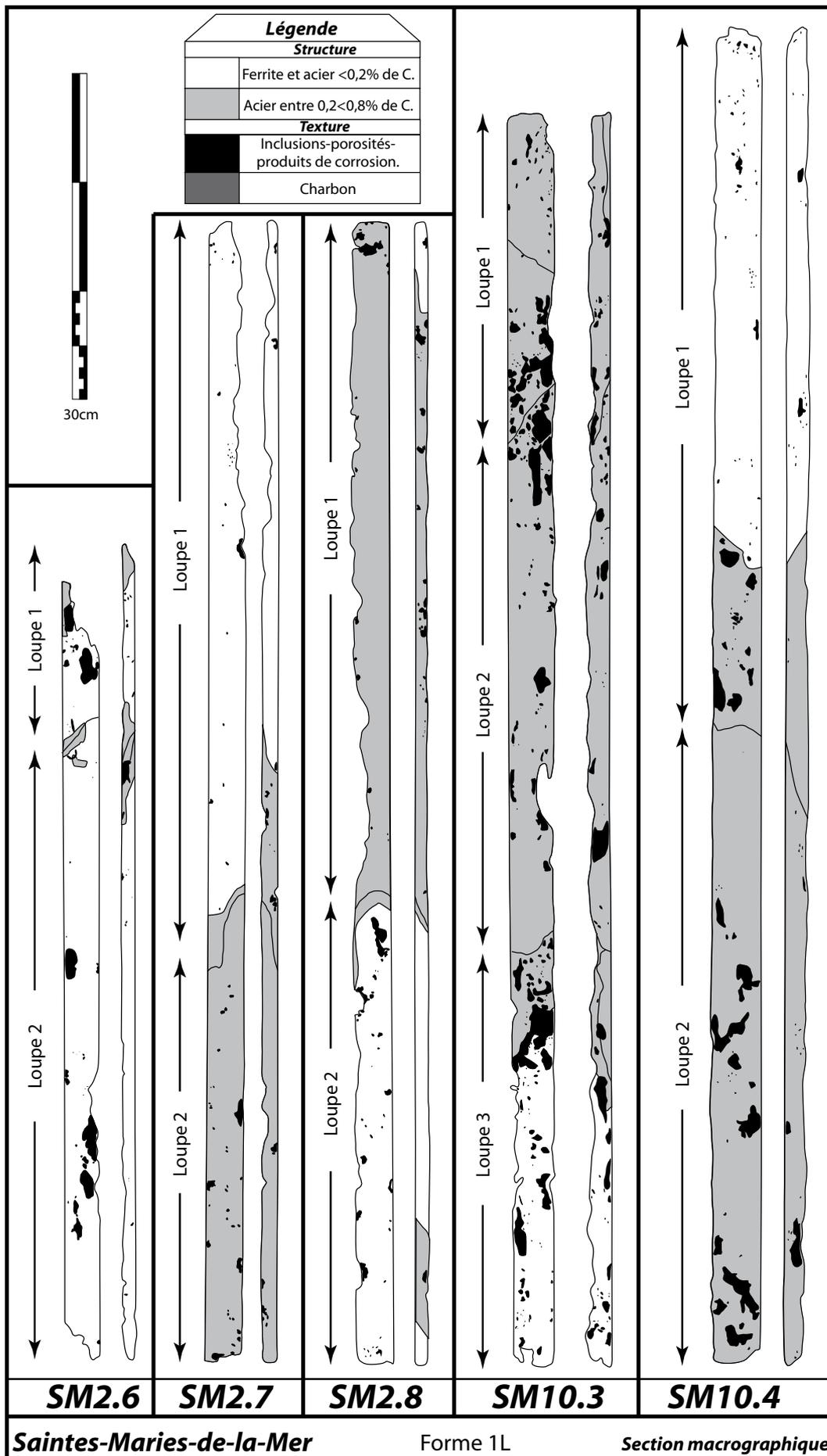


Fig. 169 : la structure des demi-produits de type 1L des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.

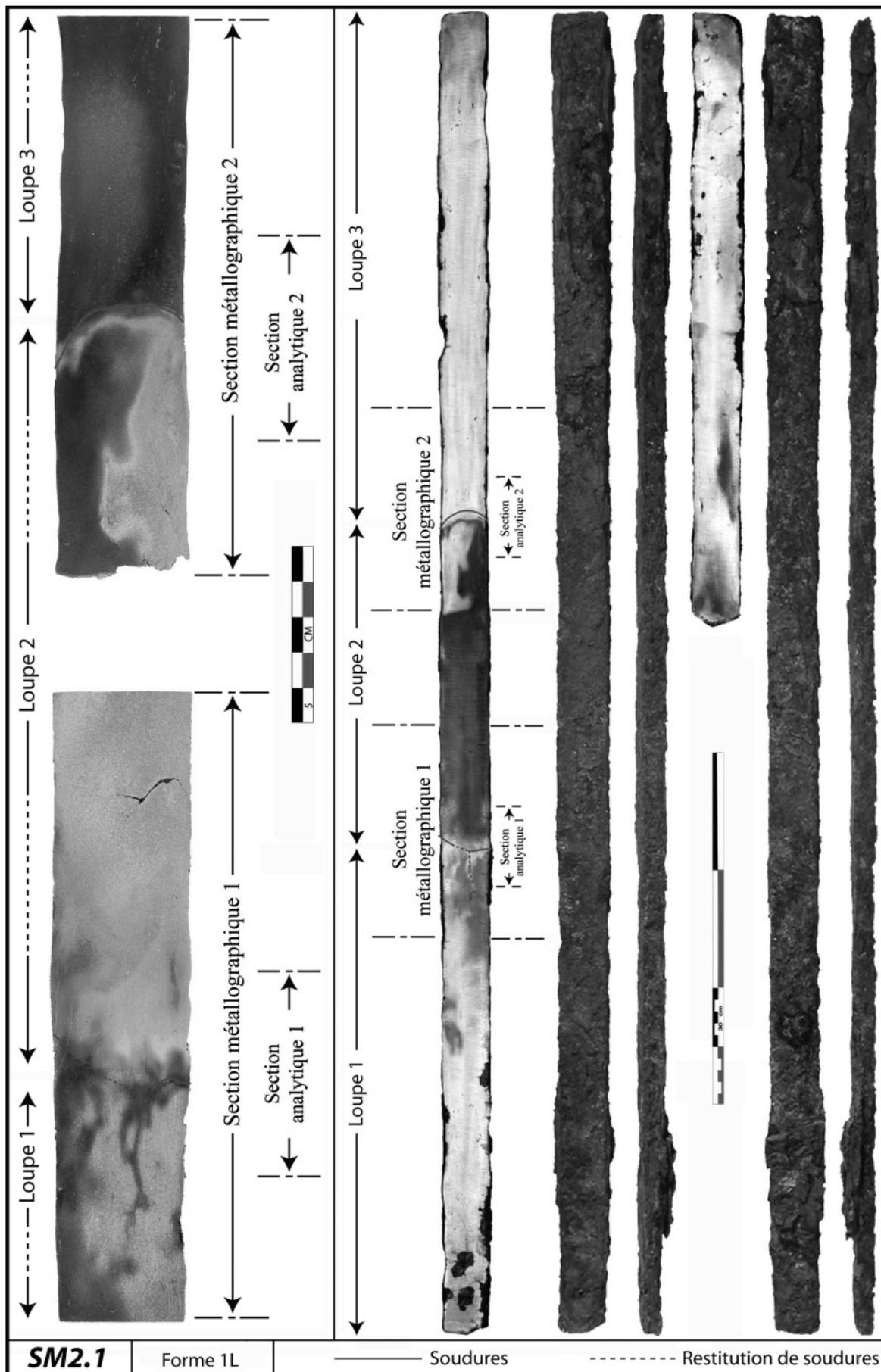


Fig. 170 : le demi-produit SM2.1 (type 1L) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

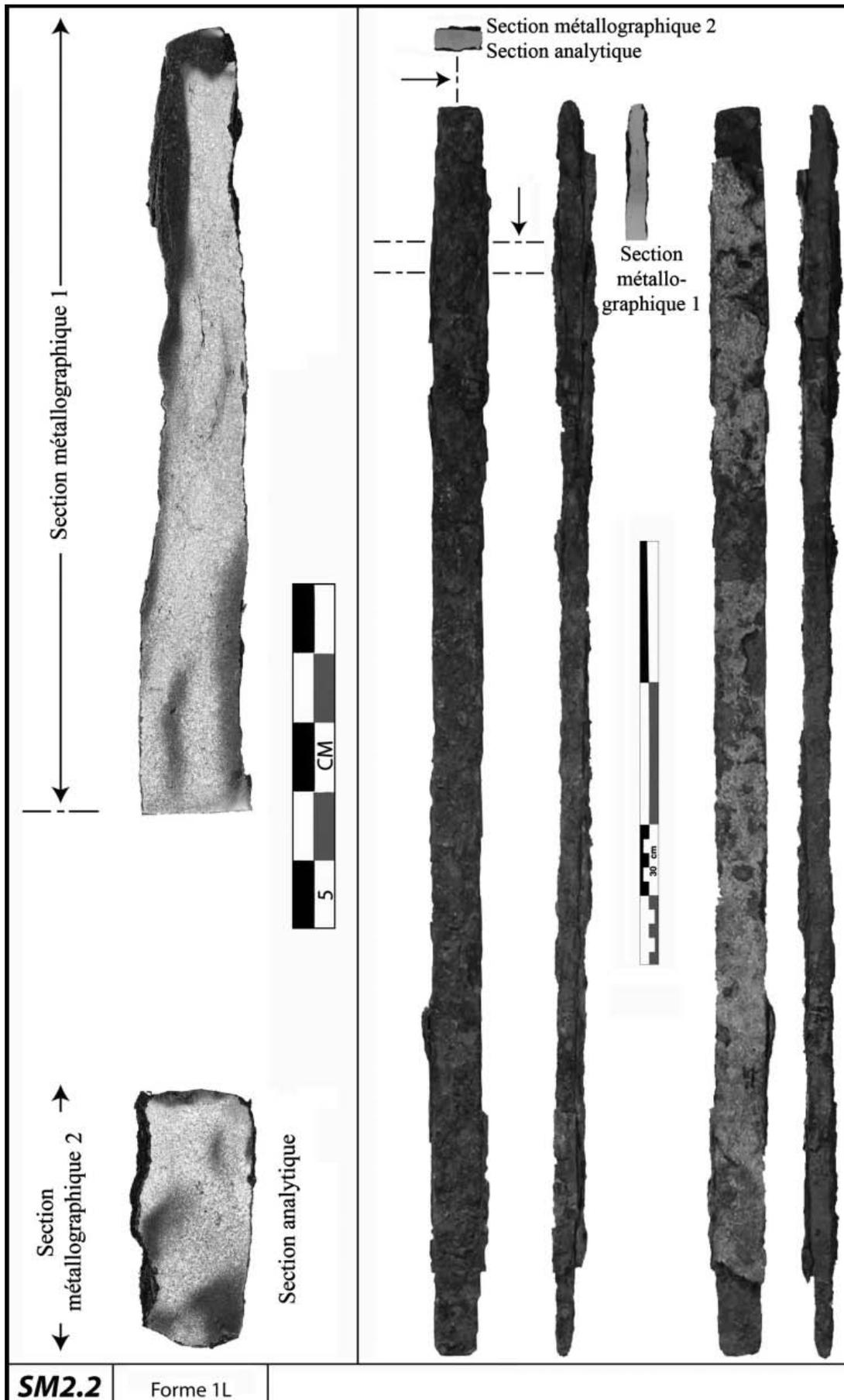


Fig. 171 : le demi-produit SM2.2 (type 1L) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

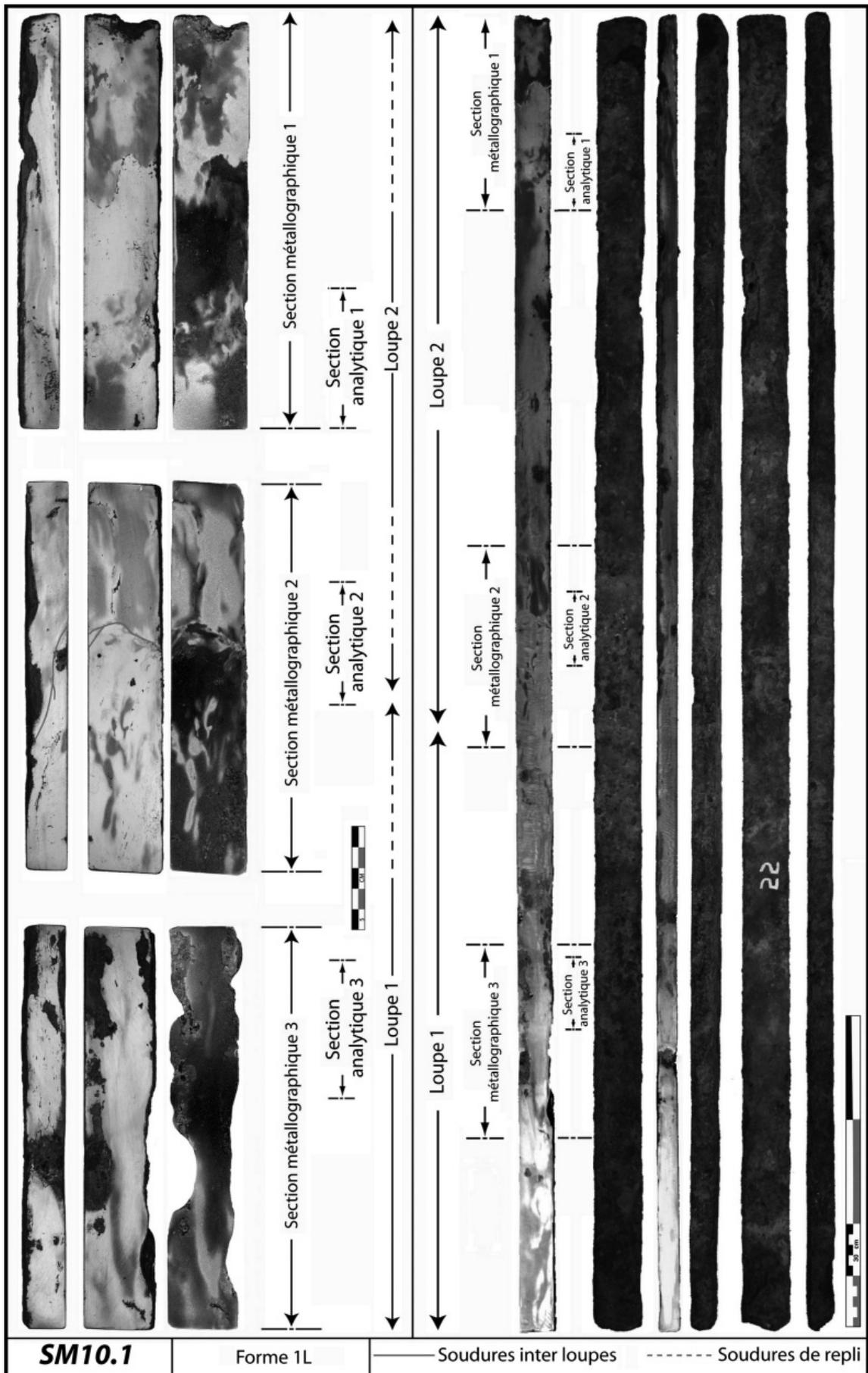


Fig. 172 : le demi-produit SM10.1 (type 1L) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

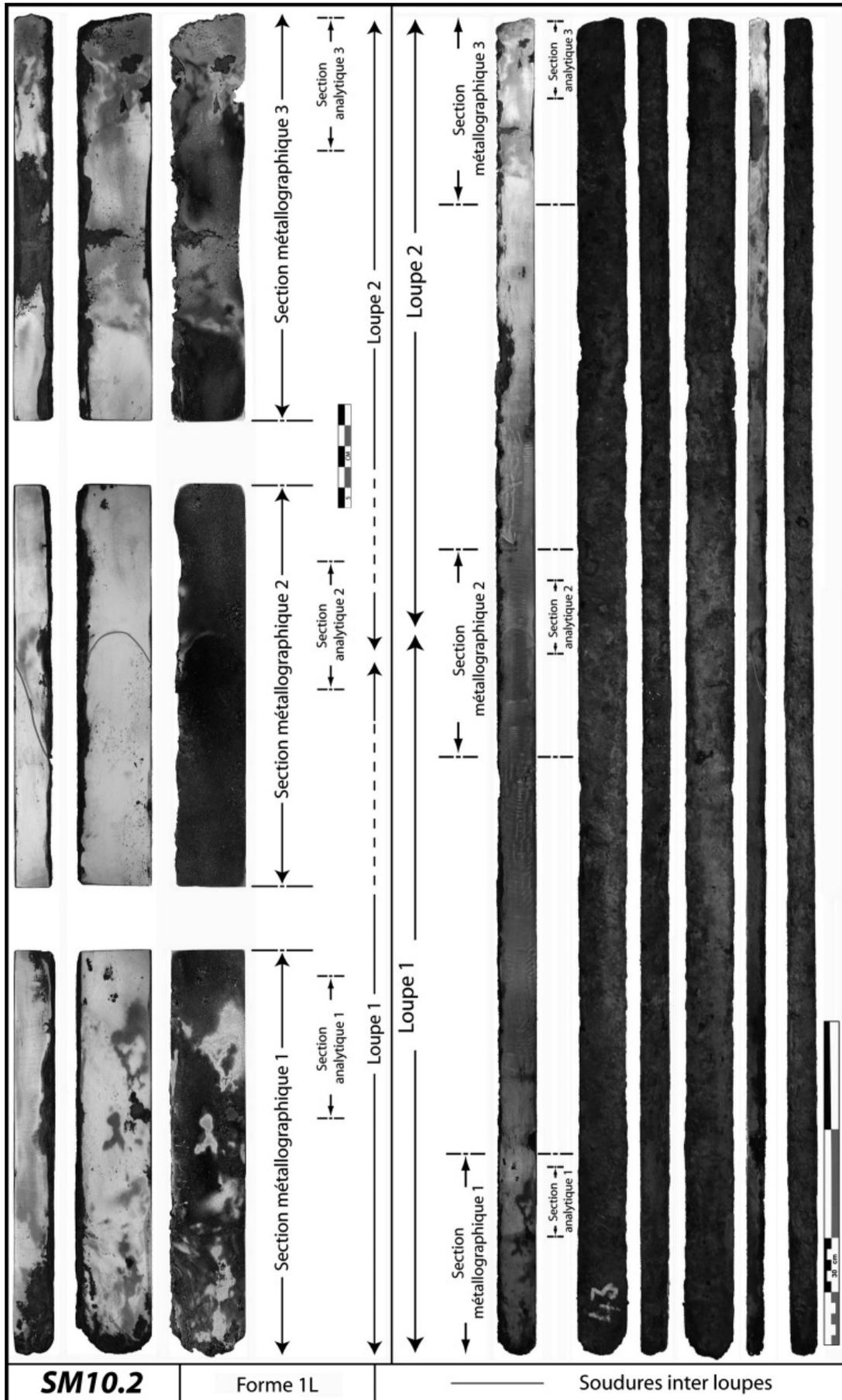


Fig. 173 : le demi-produit SM10.2 (type 1L) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

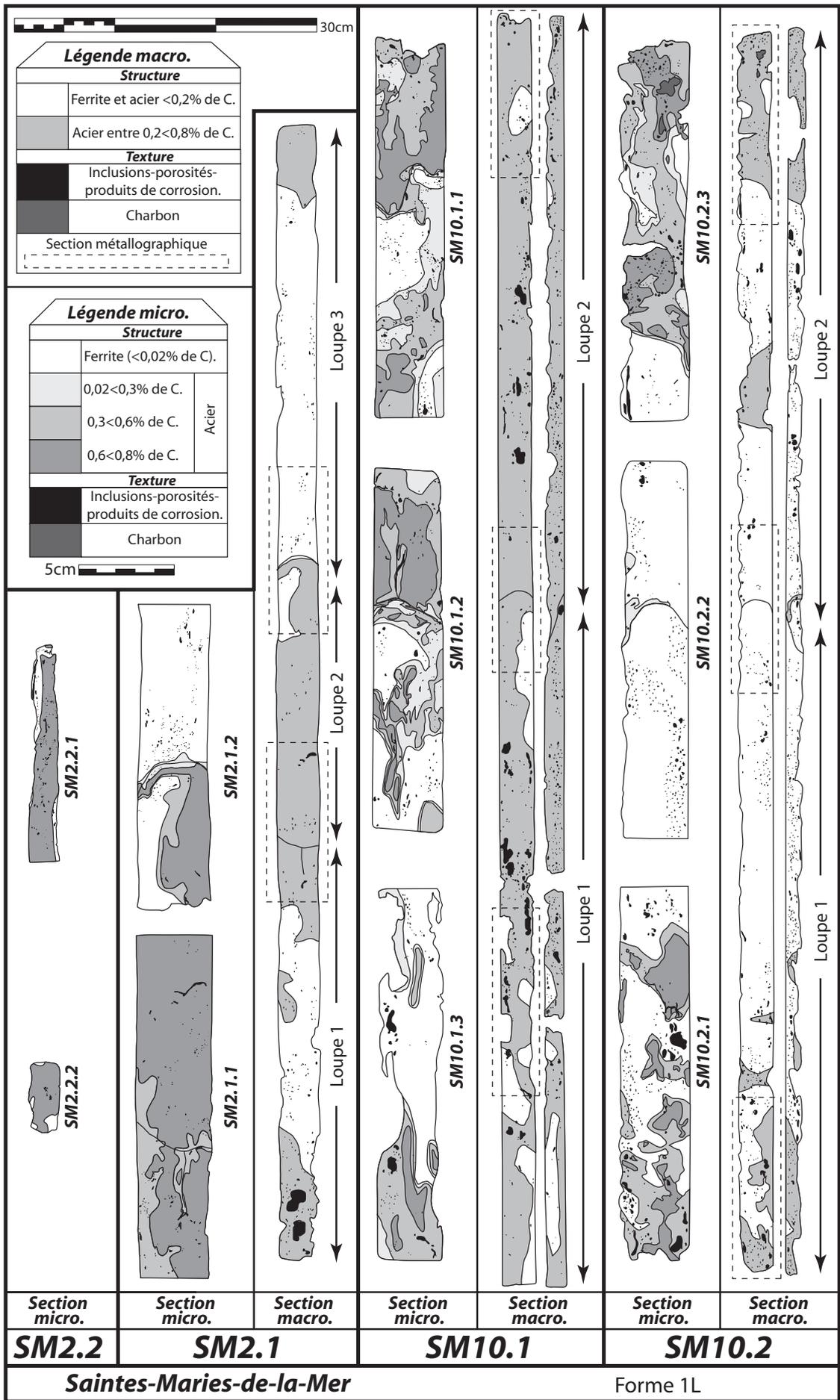


Fig. 174 : la structure des demi-produits de type 1L des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle micrographique.

Type 1L																								
Echantillons		Morphologie						Métallographie																
		(mm)			V (cm ³)			loupes			soudures			estimations (%)										
		L	I	e	m (g)	V (cm ³)		V (cm ³)		V (cm ³)		V (cm ³)		estimations (%)										
n° inv.		L		I		e		m (g)		V (cm ³)		V (cm ³)		V (cm ³)		estimations (%)								
épaisseurs		L		I		e		m (g)		V (cm ³)		V (cm ³)		V (cm ³)		estimations (%)								
SM2	1	1087	45	22	5680	1076	3	359	498	96	2	1	+++	1,5	44	1	0,5	1*	0	48	52	0,4	0	
	2	1025	40	23	5230	943	?	?	?	?	?	0	+++	?	?	2	0,4	1*	67	3	7	23	0	
	6	971	39	15	3660	568	2	339	339	339	1	0	+++	2,1	5	2	0,3	1*	14	0	0	86	0	
	7	1075	39	13	4480	545	2	273	336	209	1	0	+++	1,5	43	2	0,4	1*	21	0	0	79	0	
	8	1065	38	17	4270	688	2	344	398	290	1	0	+++	1,7	53	2	0,3	1*	14	0	0	86	0	
	1	1300	45	20	9305	1170	2	585	622	548	1	0	+++	3,1	77	1	1,3	2*	21	20	34	25	0,4	0
	2	1266	45	25	8400	1424	2	712	770	655	1	0	+++	2,4	21	2	1,3	1*	30	17	27	26	0,4	0
	3	1306	49	25	9560	1600	3	533	655	381	2	1	+++	3,2	70	3	2,1	1*	58	6	27	9	0,4	0
SM10	4	1170	44	23	6110	1184	2	592	633	552	1	0	+++	3,7	55	2	1,3	1*	98	2	0	0	0,2	0
	Moyenne	1141	43	20	6299	1022	2	467	531	384	1	0	+++	2,4	46	2	3,8	1*	28	12	39	21	0,4	0
	Ecart type	125	4	4	2237	371	0,5	158	163	190				0,8	24		1,6	1,4*	39	6	21	34	0,4	0
	Coef. de variation (%)	11	9	22	36	36	21	34	31	50				35,3	52		78	50					49	0

Fig. 175 : dimensions et structure des demi-produits de type 1L des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) : données métriques.

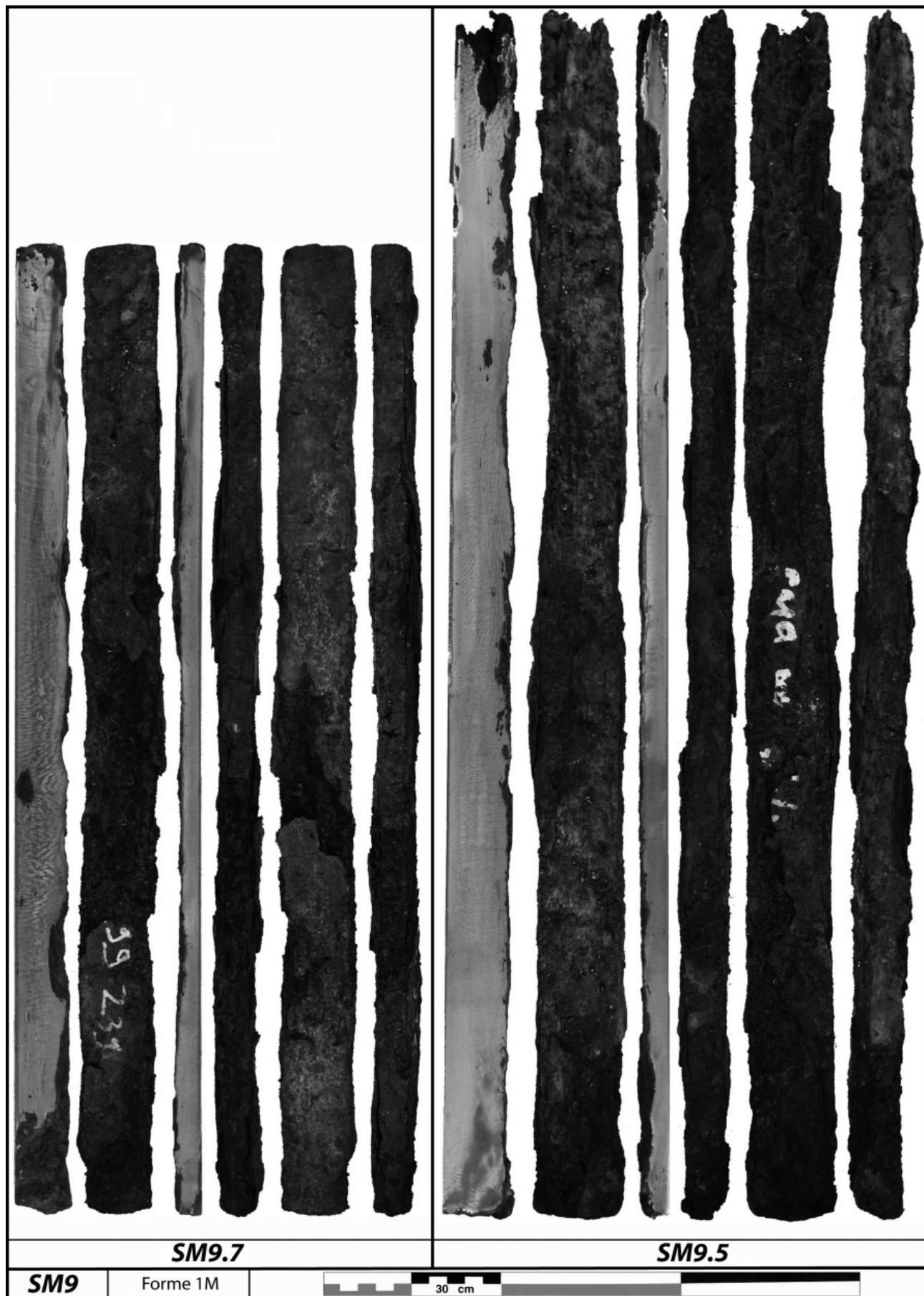


Fig. 176 : les demi-produits de type 1M des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.

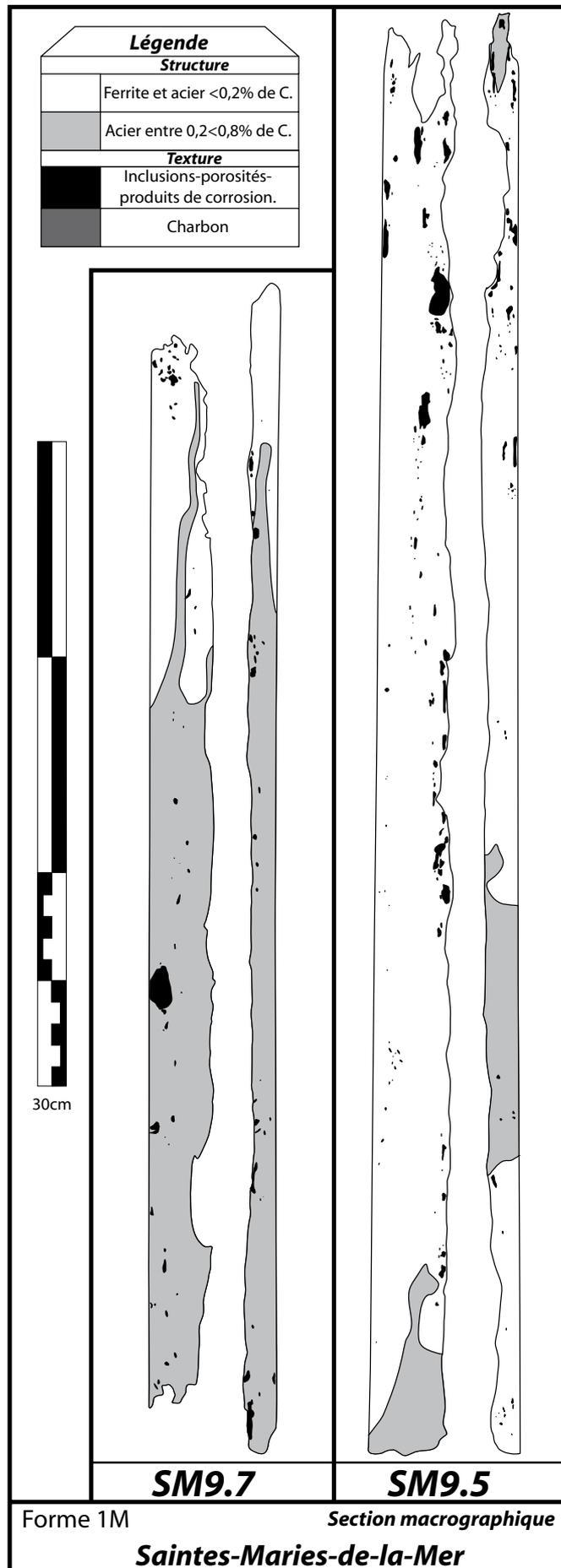


Fig. 177 : la structure des demi-produits de type 1M des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.



Fig. 178 : le demi-produit SM9.6 (type 1M) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

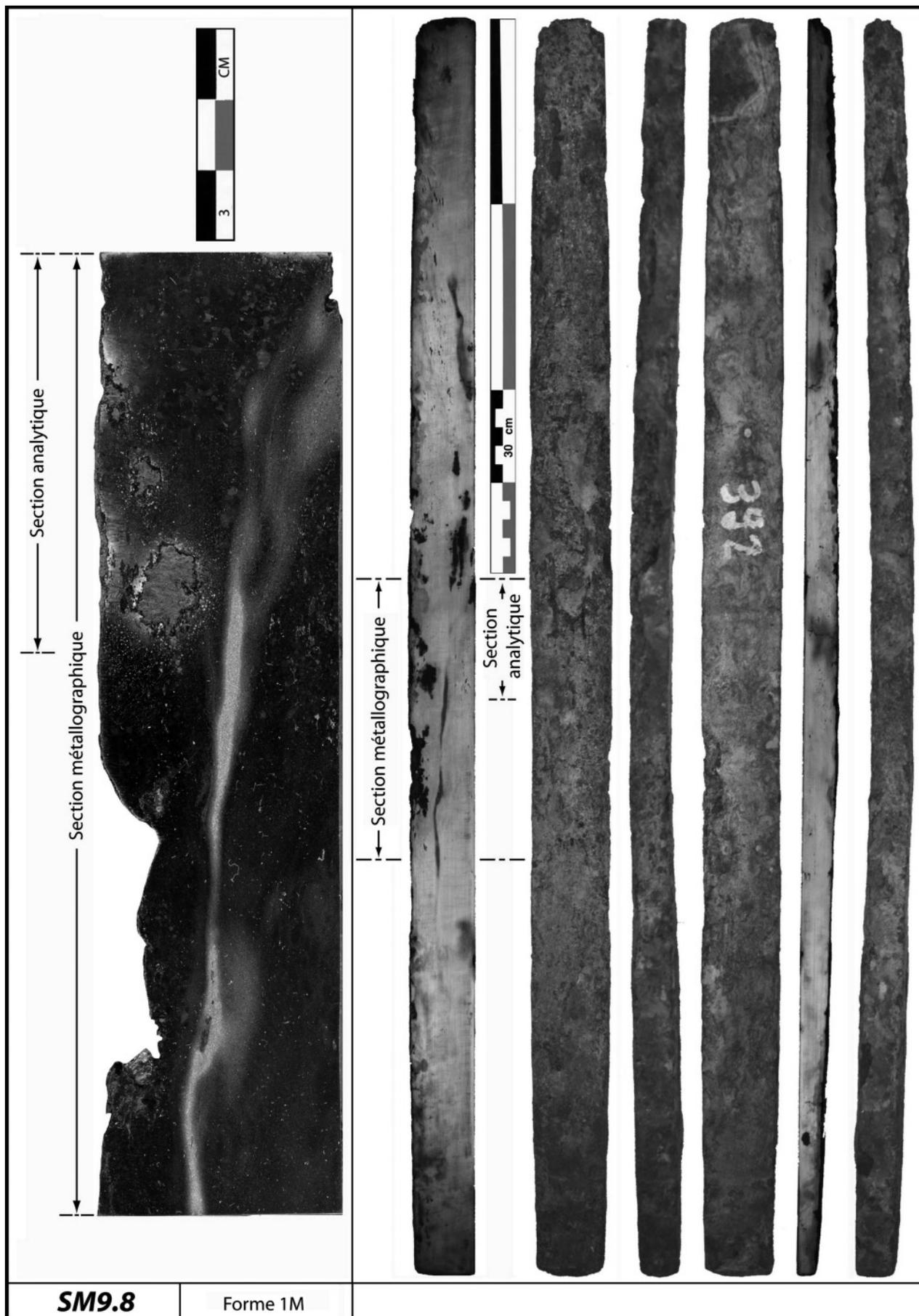


Fig. 179 : le demi-produit SM9.8 (type 1M) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

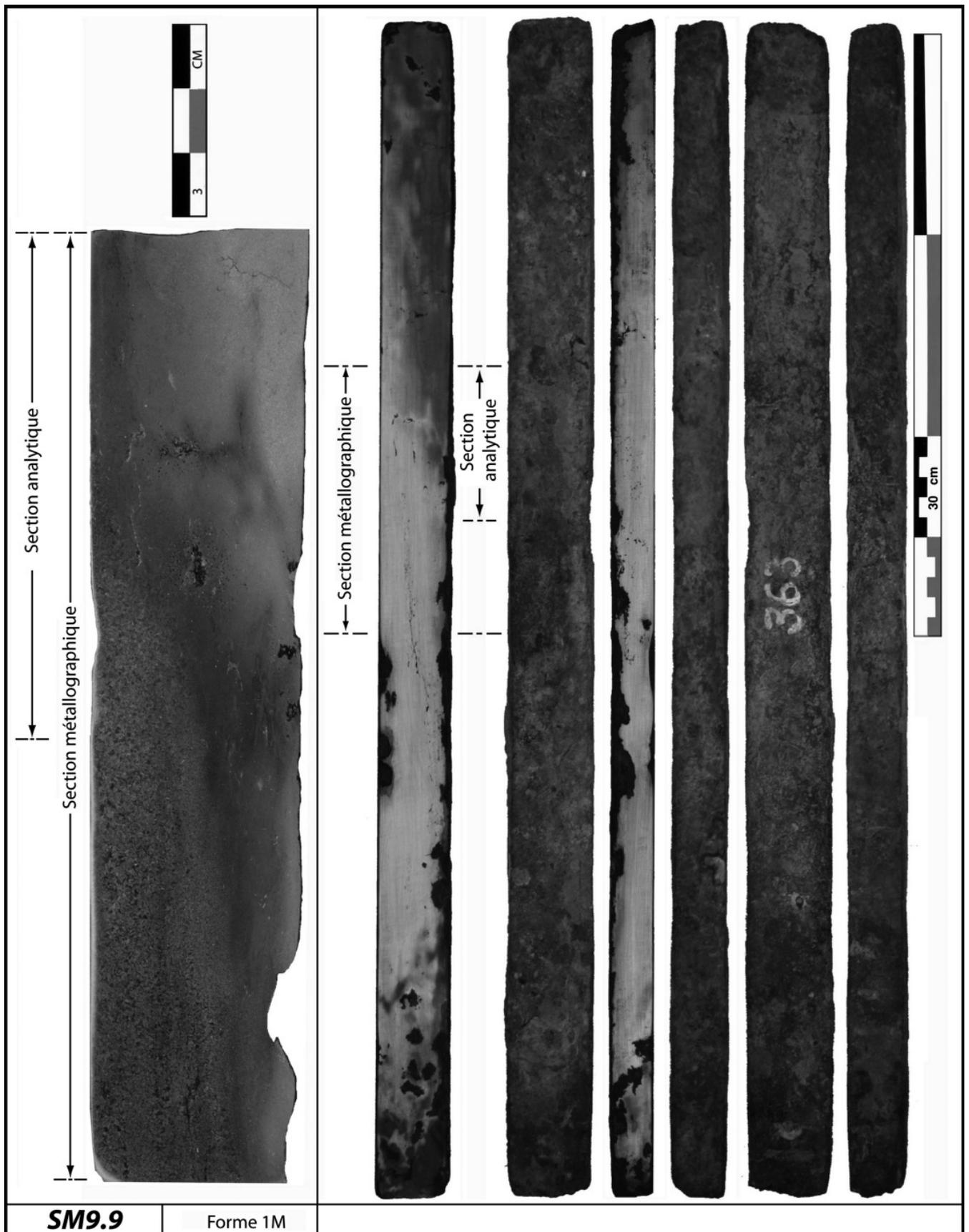


Fig. 180 : le demi-produit SM9.9 (type 1M) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

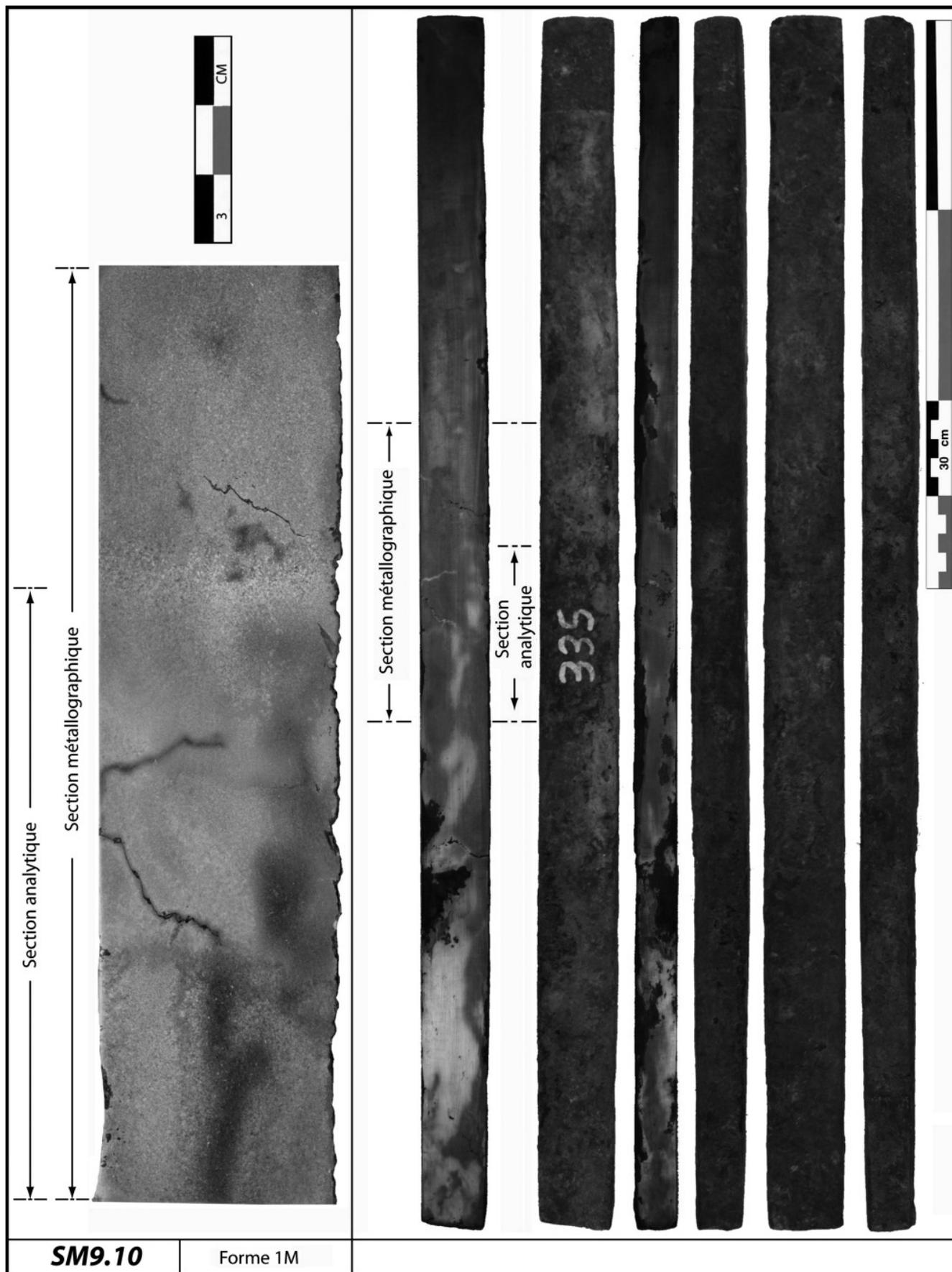


Fig. 181 : le demi-produit SM9.10 (type 1M) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

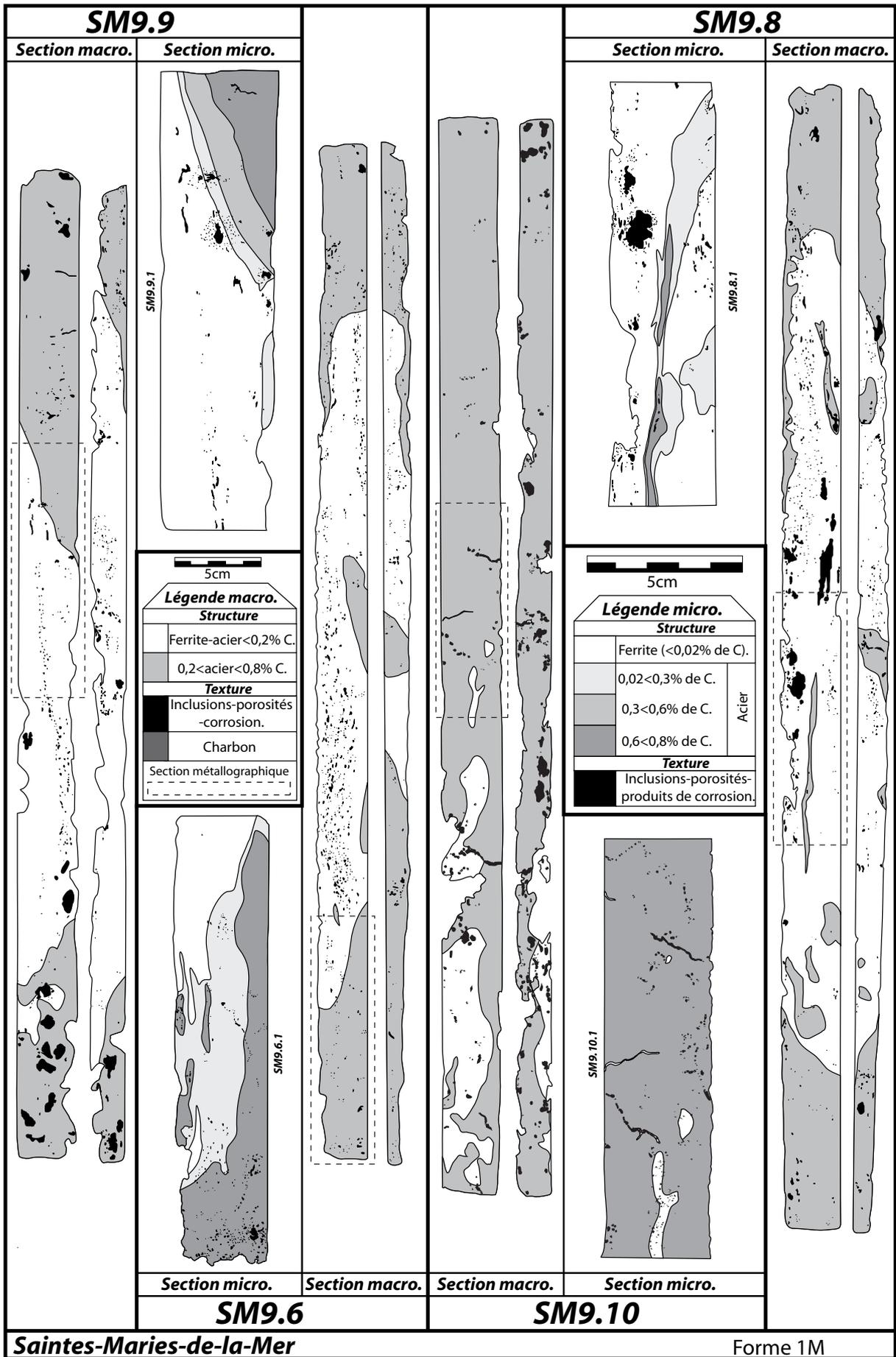


Fig. 182 : la structure des demi-produits de type 1M des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle micrographique.

Type 1M																				
Echantillons		Morphologie				macrographie			Métallographie											
		(mm)		m (g)	V (cm ³)	estimations (%)		n° section		estimations		alliage (% de la surface)								
épaisseurs	n° Inv.	L	I	e	propreté inclusionnaire	estimations (%)	n° section	propreté inclusionnaire	AFNOR NFA 04-106*	%	>0,02	0,02<0,3	0,3<0,6	0,6<0,8	pondère	phosphore (0,1%>P<0,6%)				
SM9	5	665	47	25	3664	781	1	2,2	16	1	0,6	1*	23	0	33	44	0,5	0		
	6	610	44	27	3580	725	1	1,0	48	1	0,6	1*	23	0	33	44	0,5	0		
	7	540	44	26	2510	618	1	2,0	69	1	0,6	1*	76	8	8	7	0,1	0		
	8	667	41	20	4000	547	1	2,2	34	1	0,6	1*	71	2	5	22	0,2	0		
	9	583	42	26	4140	637	1	3,0	32	1	1,0	1*	7	0	0	93	0,7	0		
	10	631	40	26	4582	656	1	2,9	82	1	0,3	1*	44	3	12	42	0,4	0		
	Moyenne		616	43	25	3746	661	1	2,2	47		0,6	1*							
	Ecart type		49	3	3	704	83	0	1	25		0,3	0,0						0,3	0,0
	Coef. de variation (%)		8	6	10	19	12	0	32,6	53		45	0						68	0

Fig. 183 : dimensions et structure des demi-produits de type 1M des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) : données métriques.

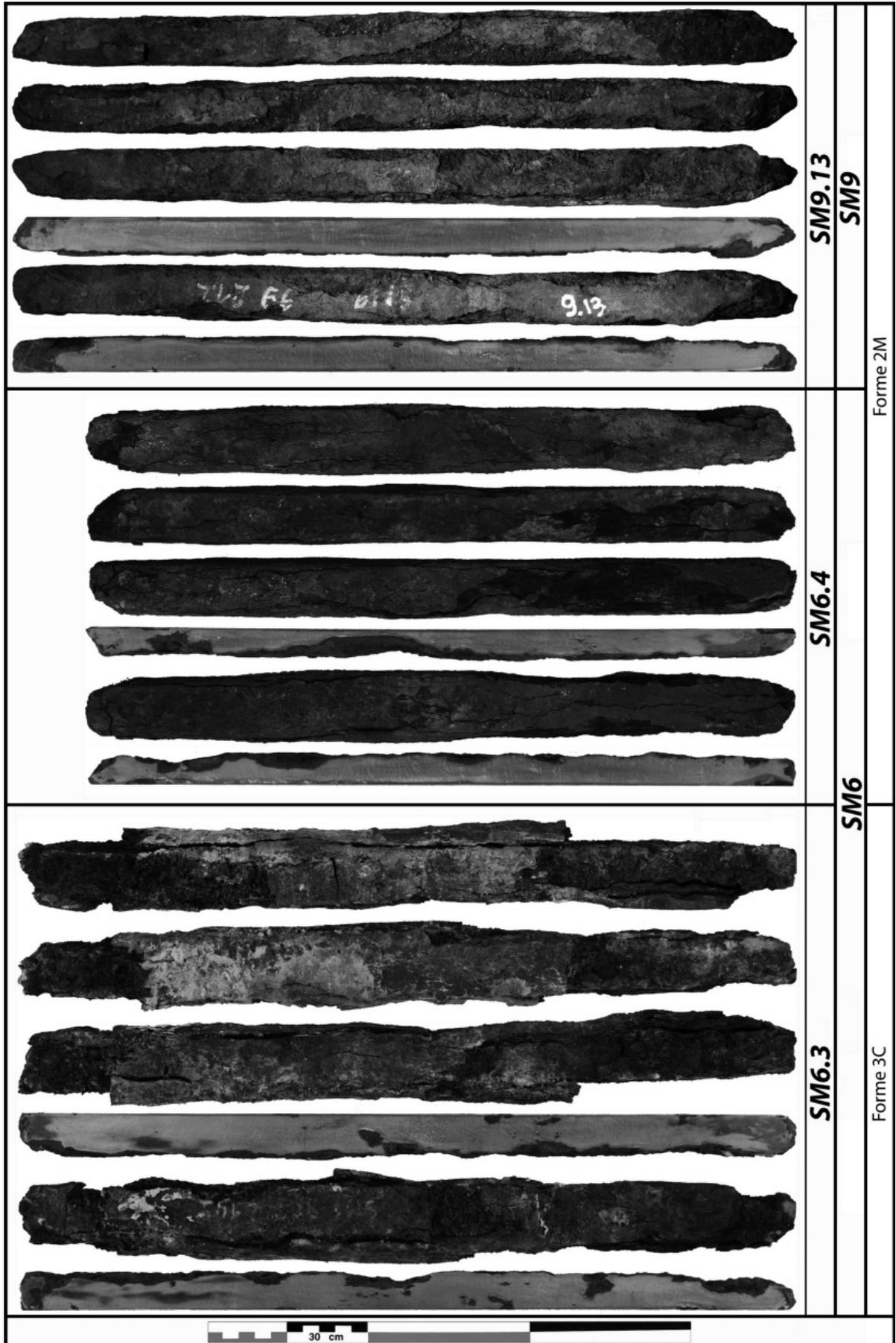


Fig. 184/1 : les demi-produits de types 2M et 3C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.

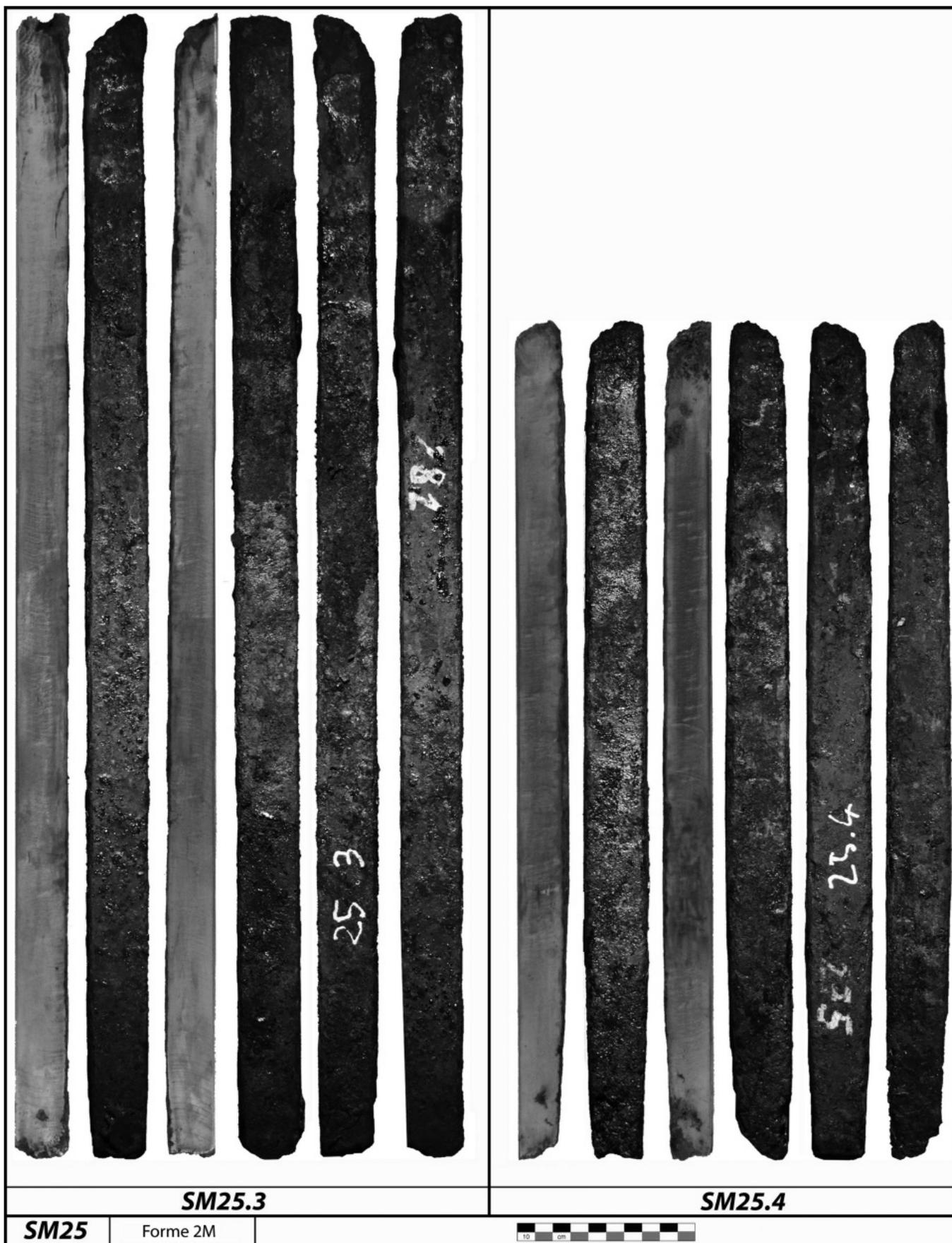


Fig. 184/2 : les demi-produits de type 2M des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.

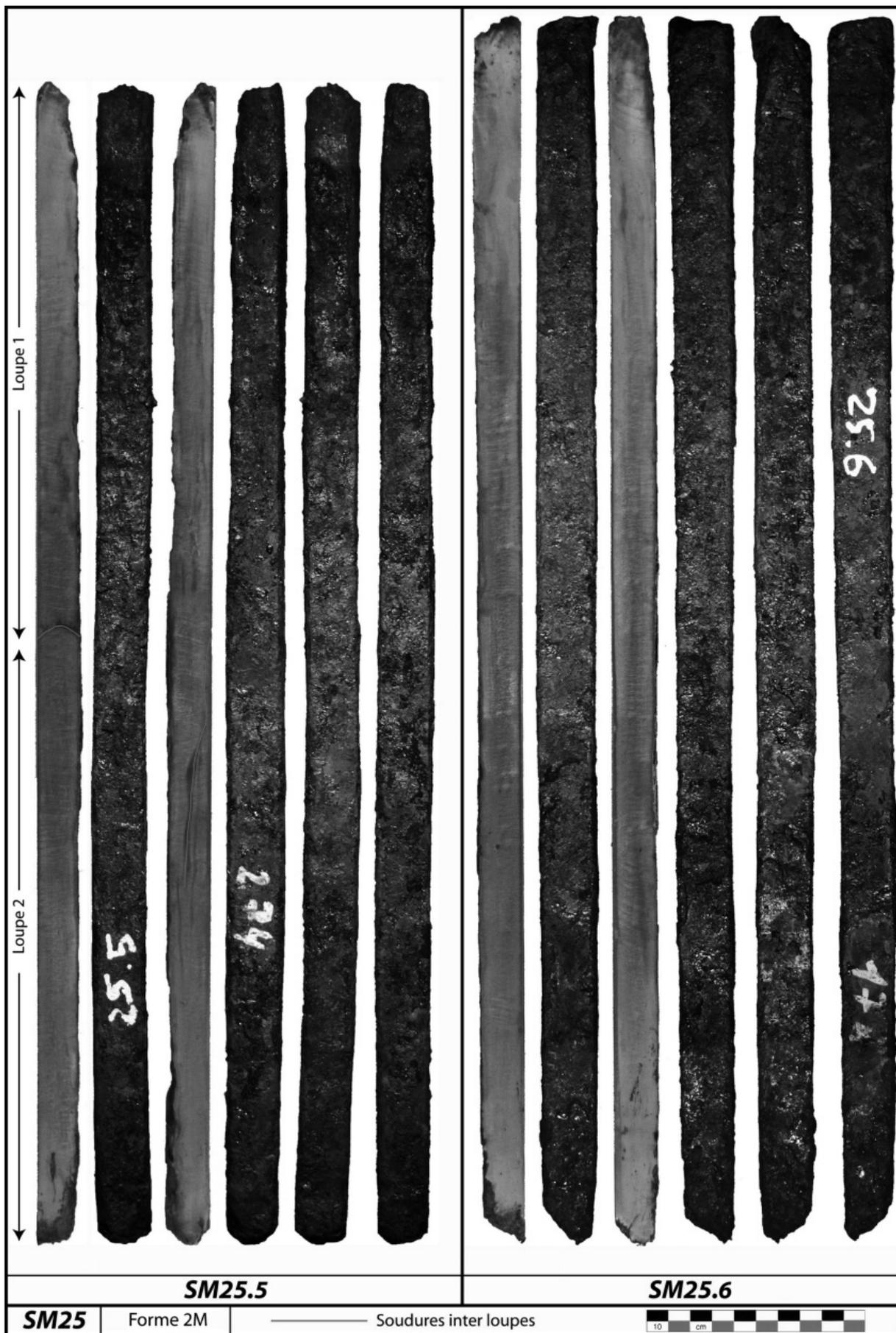


Fig. 184/3 : les demi-produits de type 2M des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.

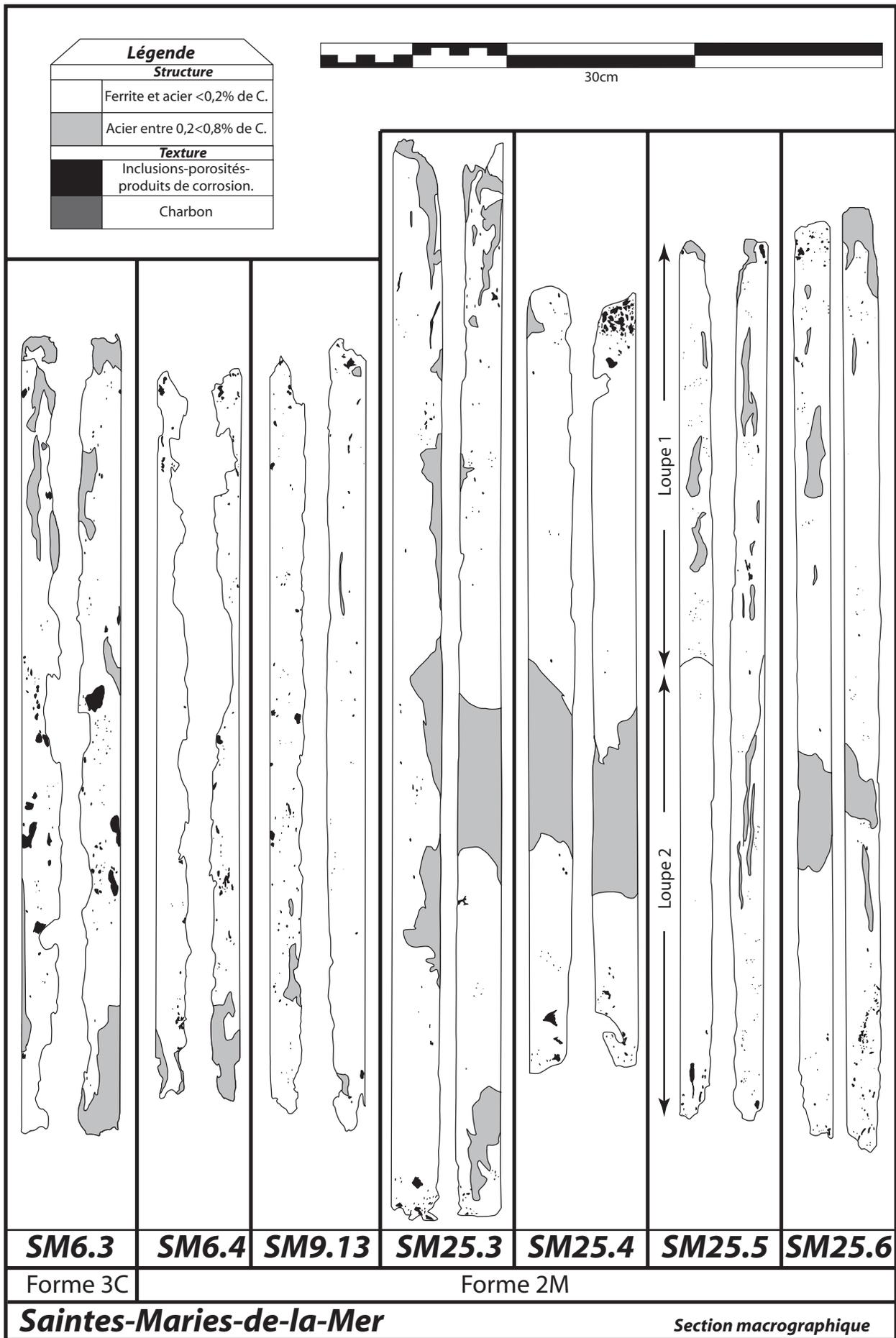


Fig. 185 : la structure des demi-produits de types 2M et 3C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.

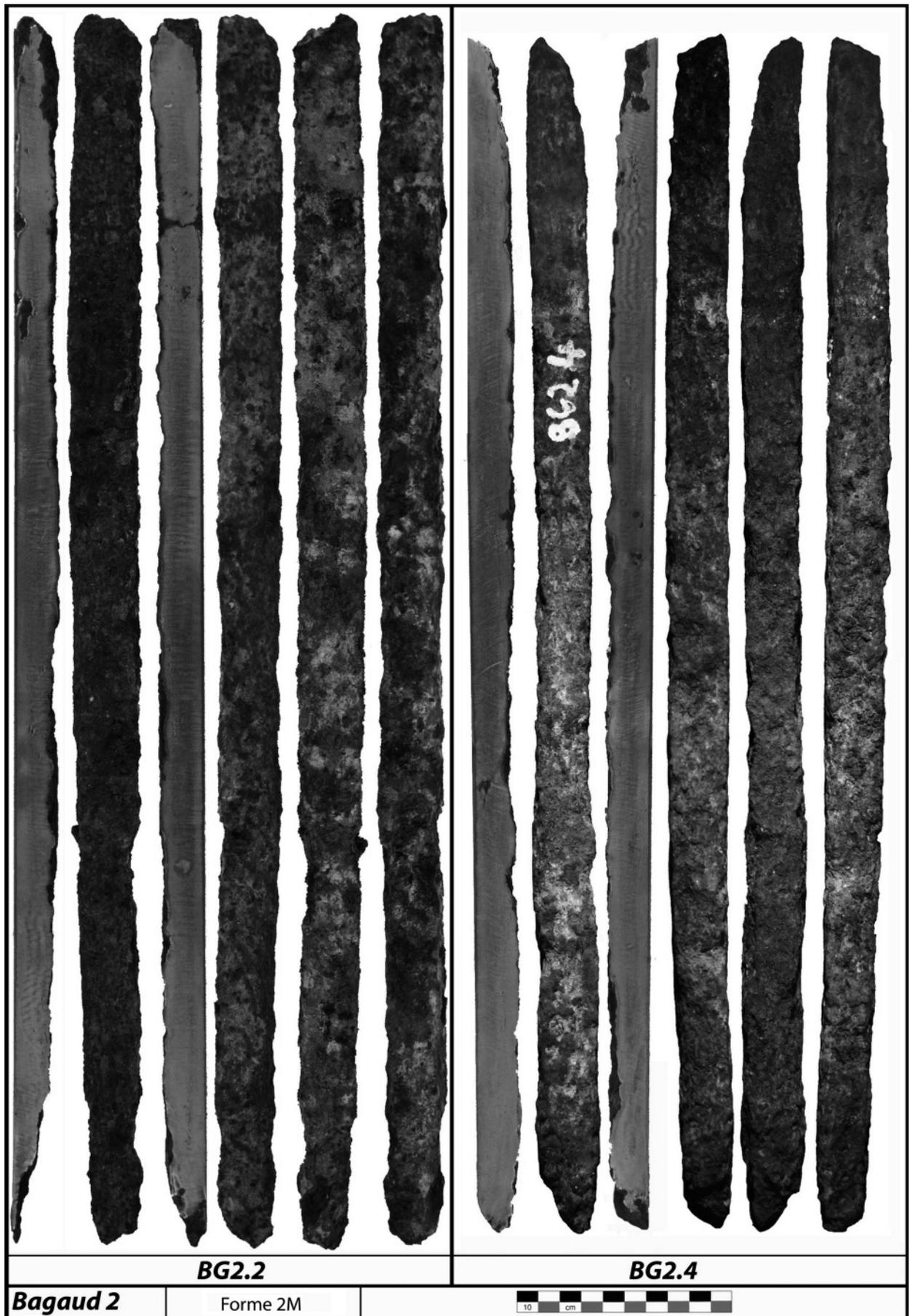


Fig. 186 : les demi-produits de type 2M de Bagaud 2 (Hyères, 83) analysés à l'échelle macrographique.

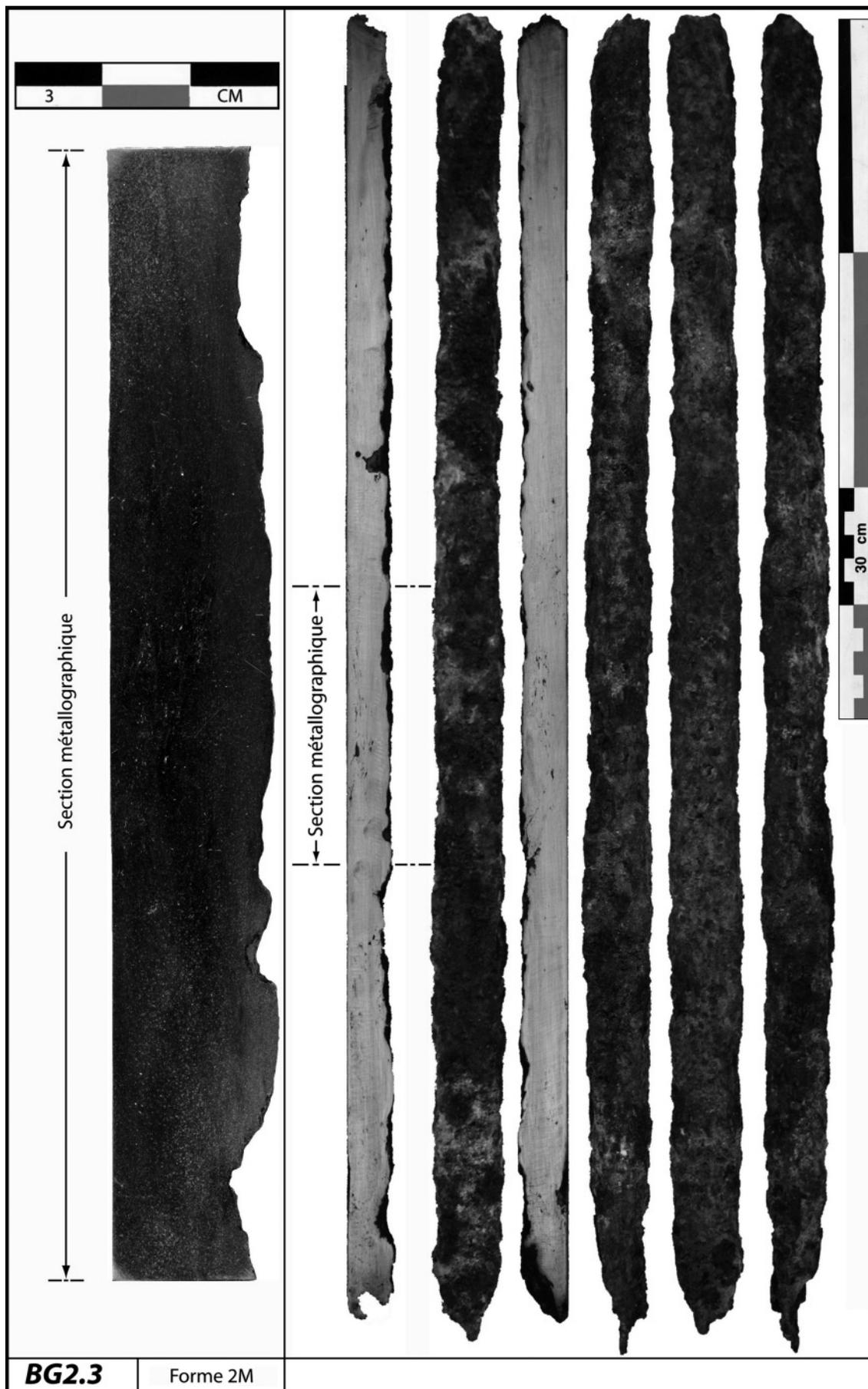


Fig. 187 : le demi-produit BG2.3 (type 2M) de Bagaud 2 (Hyères, 83) analysé à l'échelle micrographique.

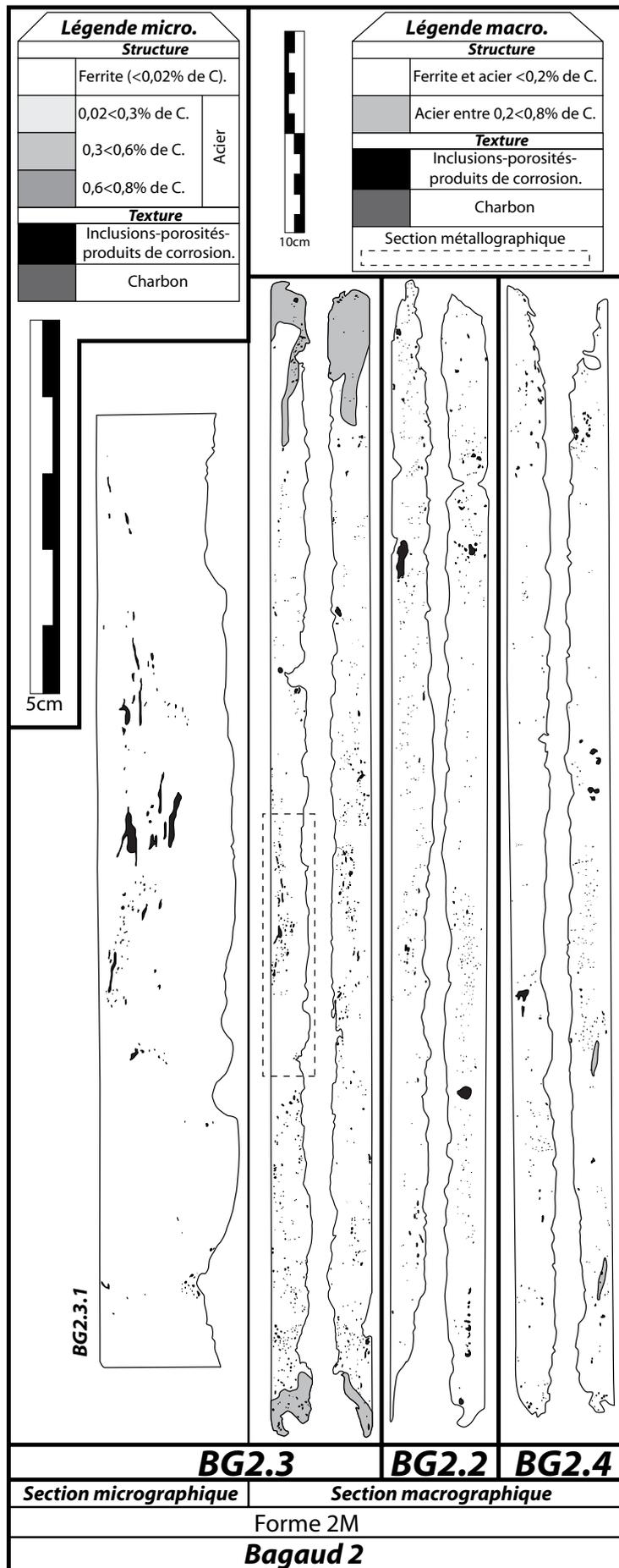


Fig. 188 : la structure des demi-produits de type 2M de Bagaud 2 (Hyères, 83) analysés aux échelles macrographique et micrographique.

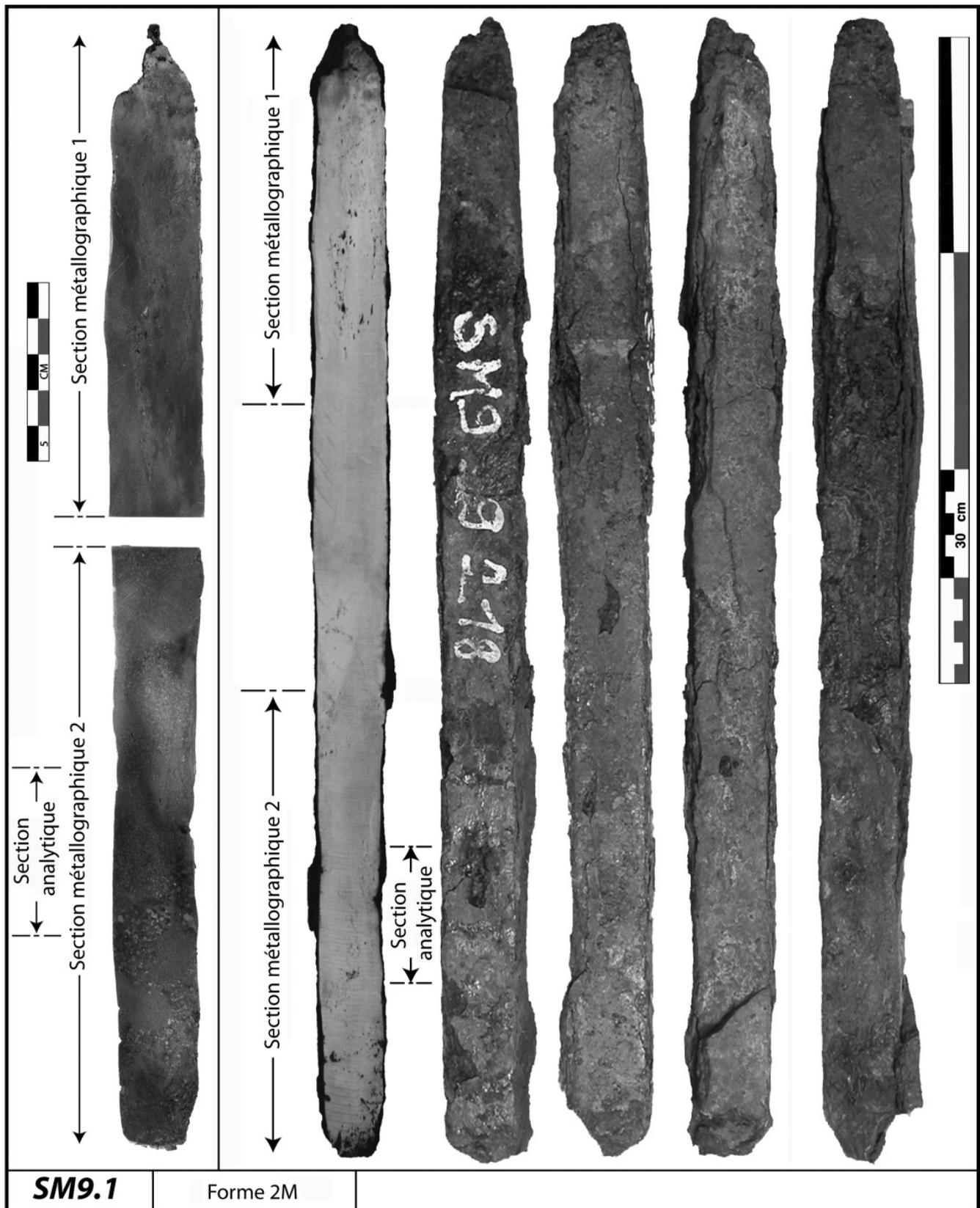


Fig. 189 : le demi-produit SM9.1 (type 2M) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

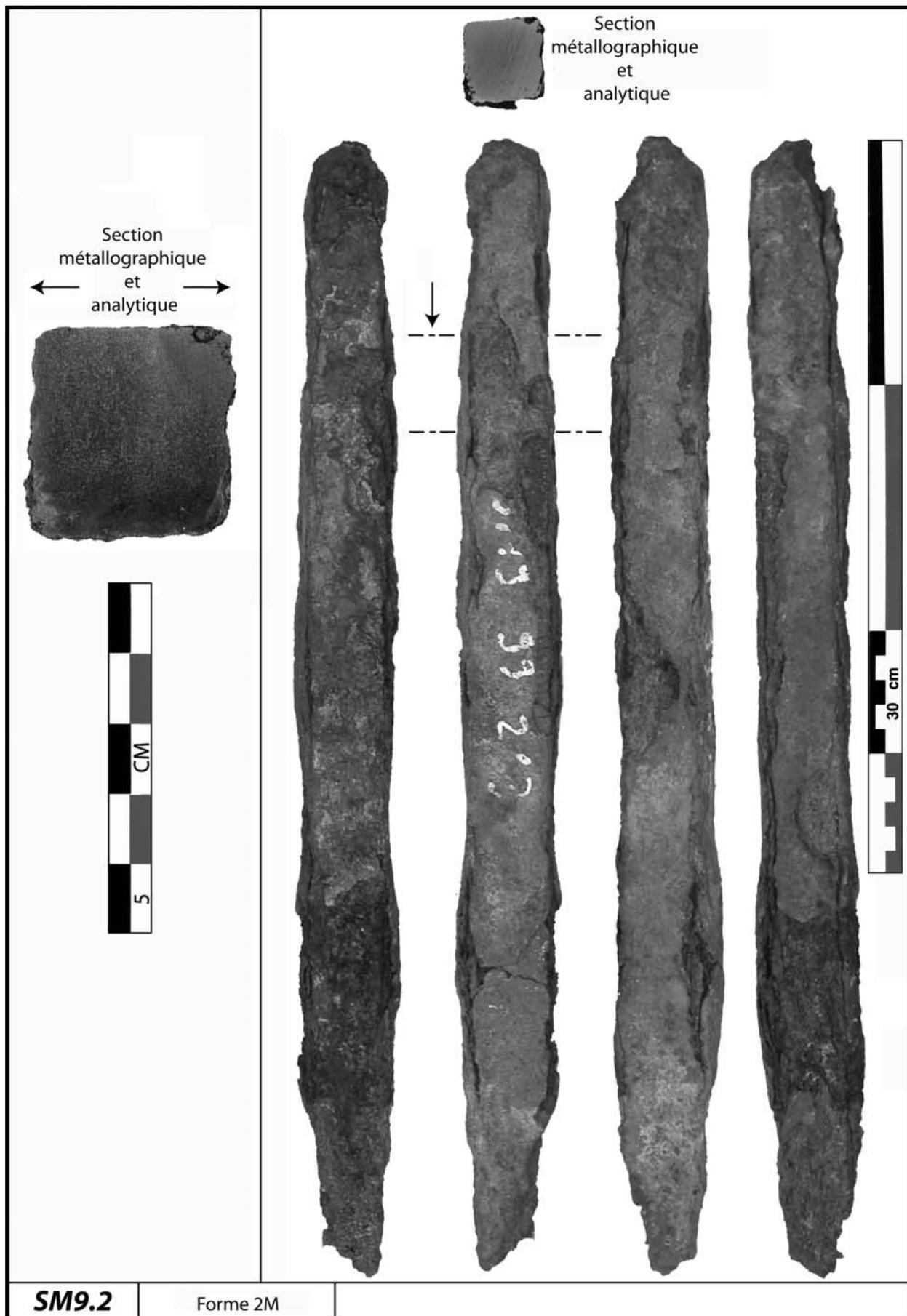


Fig. 190 : le demi-produit SM9.2 (type 2M) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

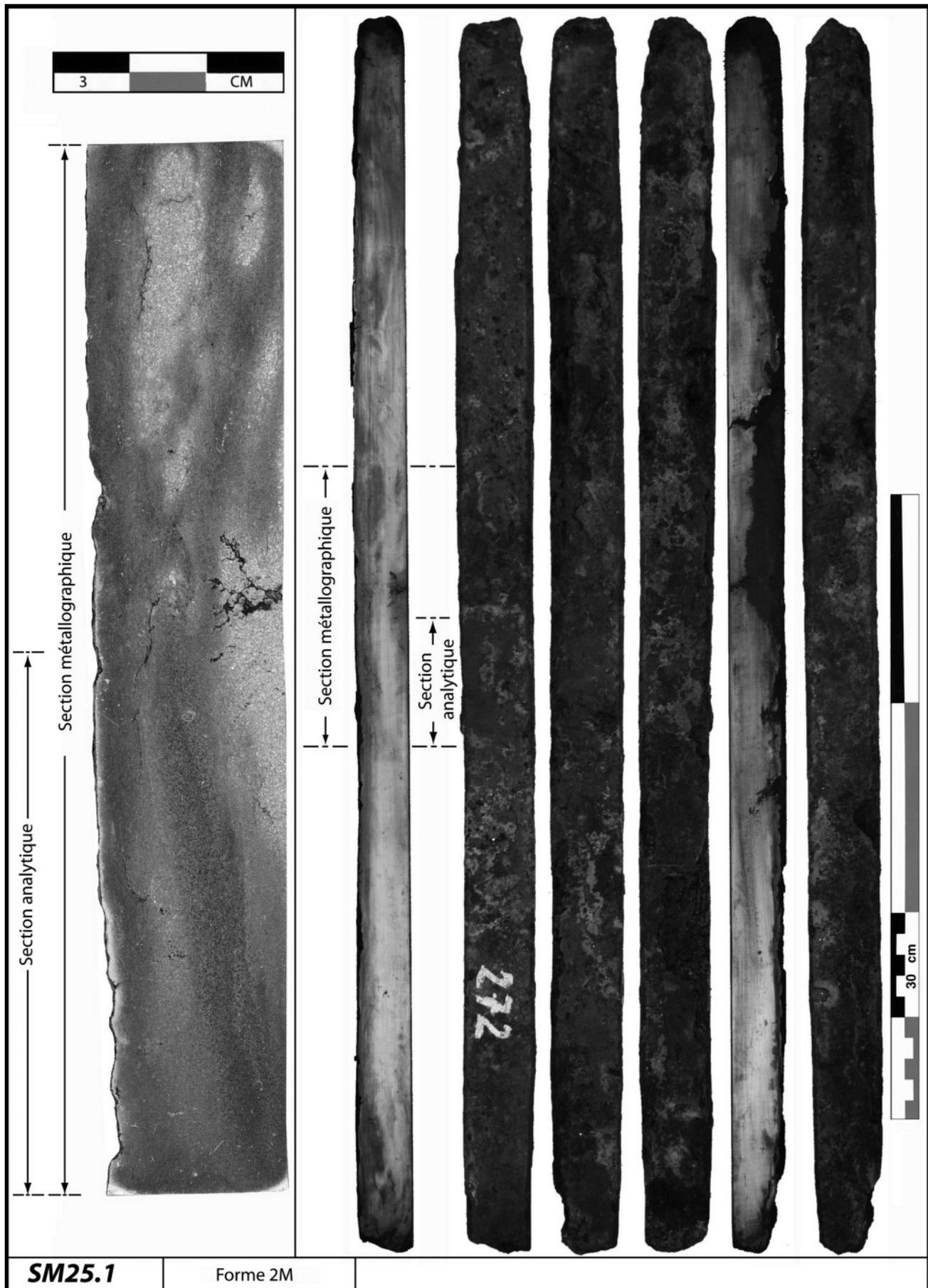


Fig. 191 : le demi-produit SM25.1 (type 2M) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

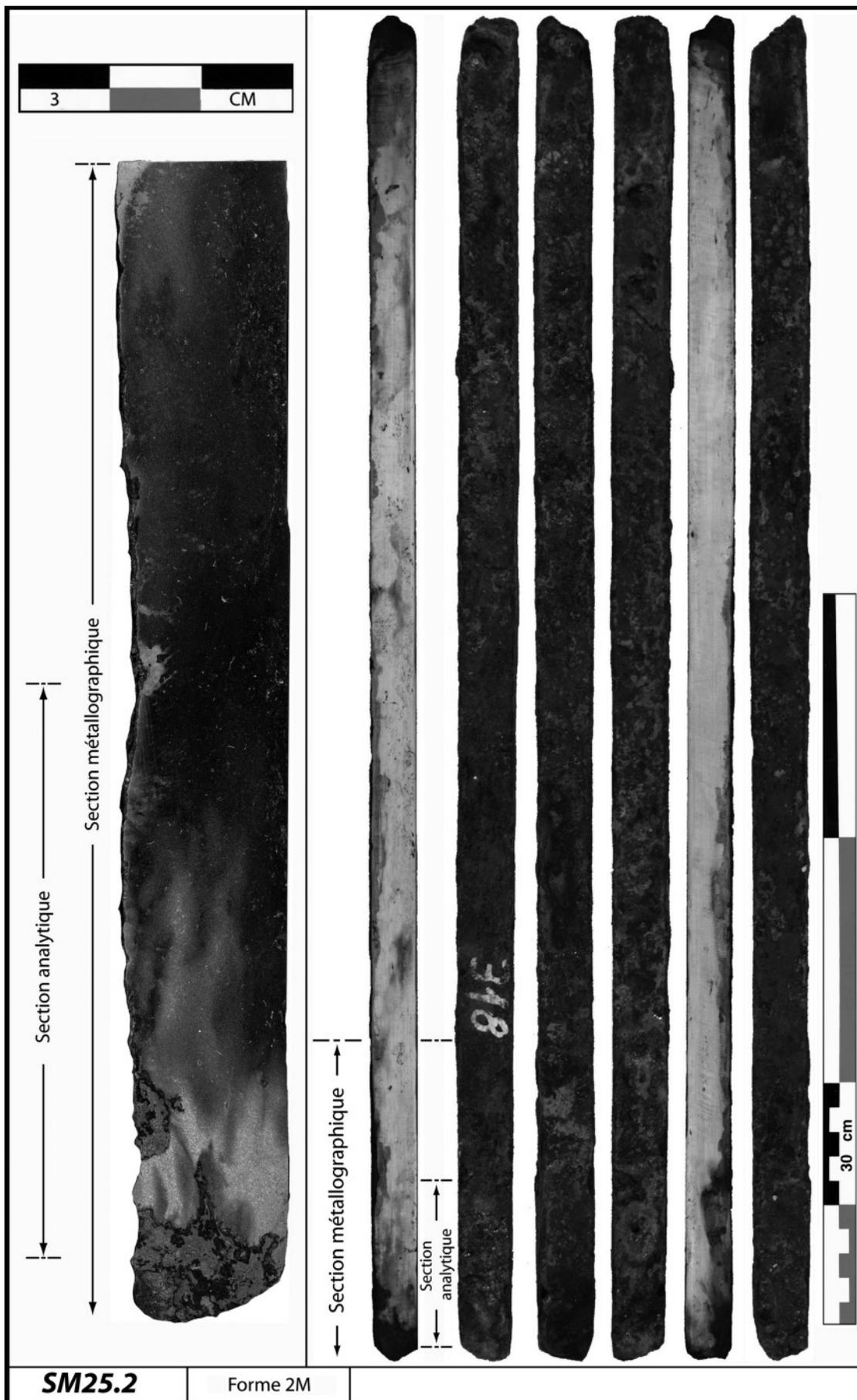


Fig. 192 : le demi-produit SM25.2 (type 2M) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

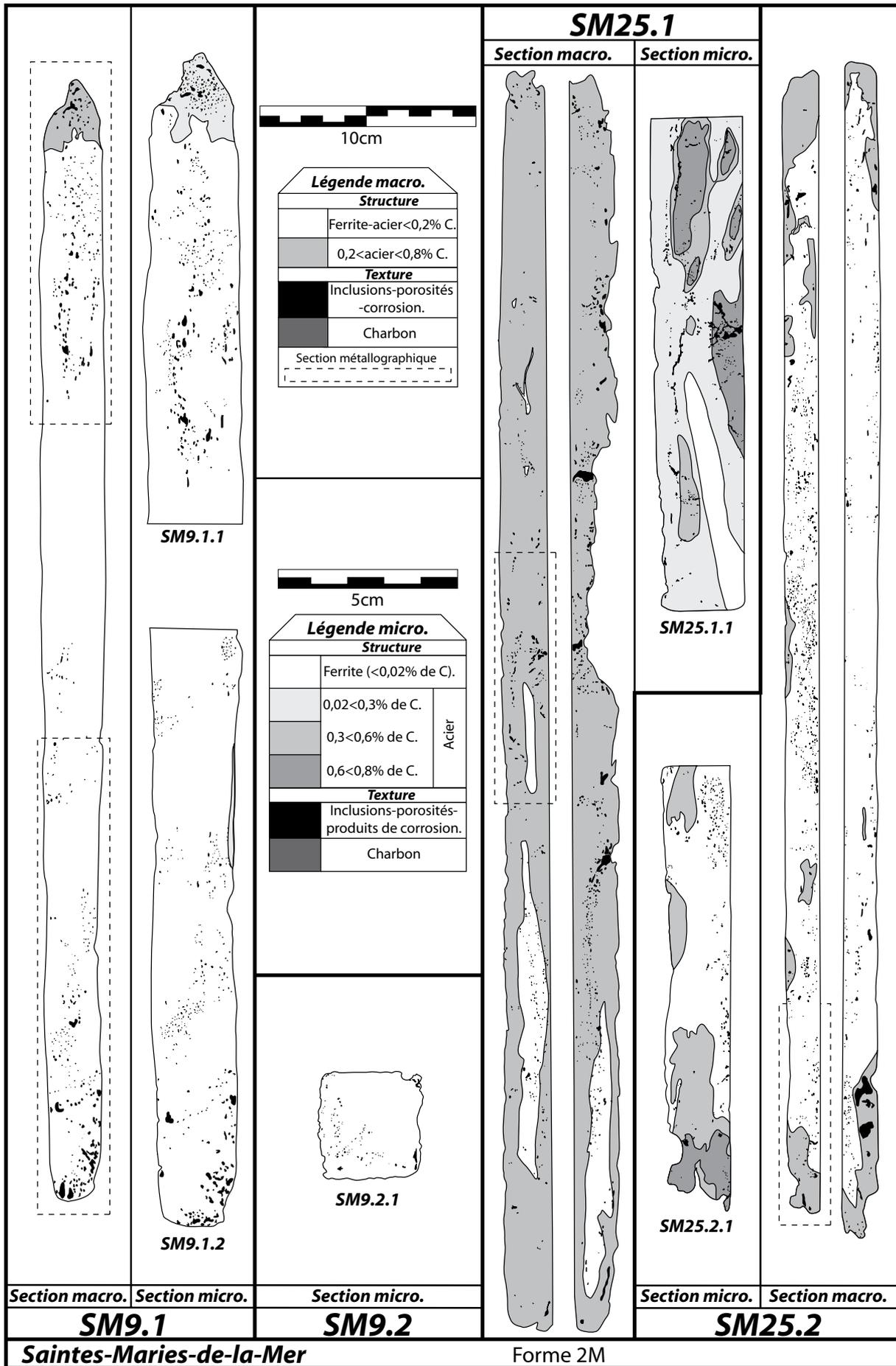


Fig. 193 : la structure des demi-produits de type 2M des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle micrographique.

Type 2M																										
Echantillons		Morphologie										Métallographie														
		(mm)					V (cm3)					macrographie				micrographie										
		L	l	e	m (g)	V (cm3)	nbre		loupes			soudures		estimations (%)		n° section		propriété inclusionnaire		alliages (% de la surface)						
épaves	n° Inv.						mo.	max.	mini.	inter loupes	de repli aux extrémités	propriété inclusionnaire	surface acérée (0,2<0,8 % de C)							>0,02	0,02<0,3	0,3<0,6	0,6<0,8	pondéré	Phosphore (0,1%<P<0,6%)	
SM6	4	433	39	31	2038	523	1	523				1,5	6	1	2,6	3*	91	9	0	0	0	0	0	0	0	
SM9	1	512	39	38	3824	759	1	759				1,6	3	2	1,7	2*	100	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2	470	37	38	2782	661	?	?				?	?	1	0,9	1*	100	0	0	0	0	0	0	0	0	
	13	483	33	31	2310	494	1	494				1,0	1	1	1,1	3*	12	59	11	17	0,4	0	0	0	0	
SM25	1	600	32	32	3884	614	1	614				1,3	95	1	0,5	1*	63	0	23	15	0,2	0	0	0	0	
	2	558	23	23	1914	295	1	295				1,7	14	1	0,6	18										
	3	626	32	32	4540	641	1	641				0,6	18													
	4	492	32	32	3590	504	1	504				1,2	21													
	5	533	25	25	1980	333	2	167	173	160	1	0	0,5	4												
	6	560	26	25	2350	364	1	364				0,5	12													
BG2	2	574	27	27	2644	418	1	418				1,3	0													
	3	570	27	27	2168	416	1	416				1,0	8	1	1,2	3*	100	0	0	0	0,0	0	0	0	0	
	4	558	26	27	2180	392	1	392				0,6	0													
Moyenne		536	31	30	2785	493	1	466	173	160	1	0	1,1	15											0	
Ecart type		55	5	5	874	141	0,3	160				0,4	26												0,0	
Coef. de variation (%)		10	18	16	31	29	27	34				40,8	172												114	0

Fig. 194 : dimensions et structure des demi-produits de type 2M des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) et de Bagaud 2 (Hyères, 83) : données métriques.

Type 3C									
Echantillons		Morphologie					Métallographie		
		(mm)			m (g)	V (cm ³)	macrographie		
		L	l	e			nbre de loupe	estimations (%)	
propreté inclusionnaire	surface acérée (0,2<0,8 % de C)								
SM6	3	470	50	45	3104	1058	1	3,4	13

Fig. 195 : dimensions et structure du demi-produit de type 3M des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) : données métriques.

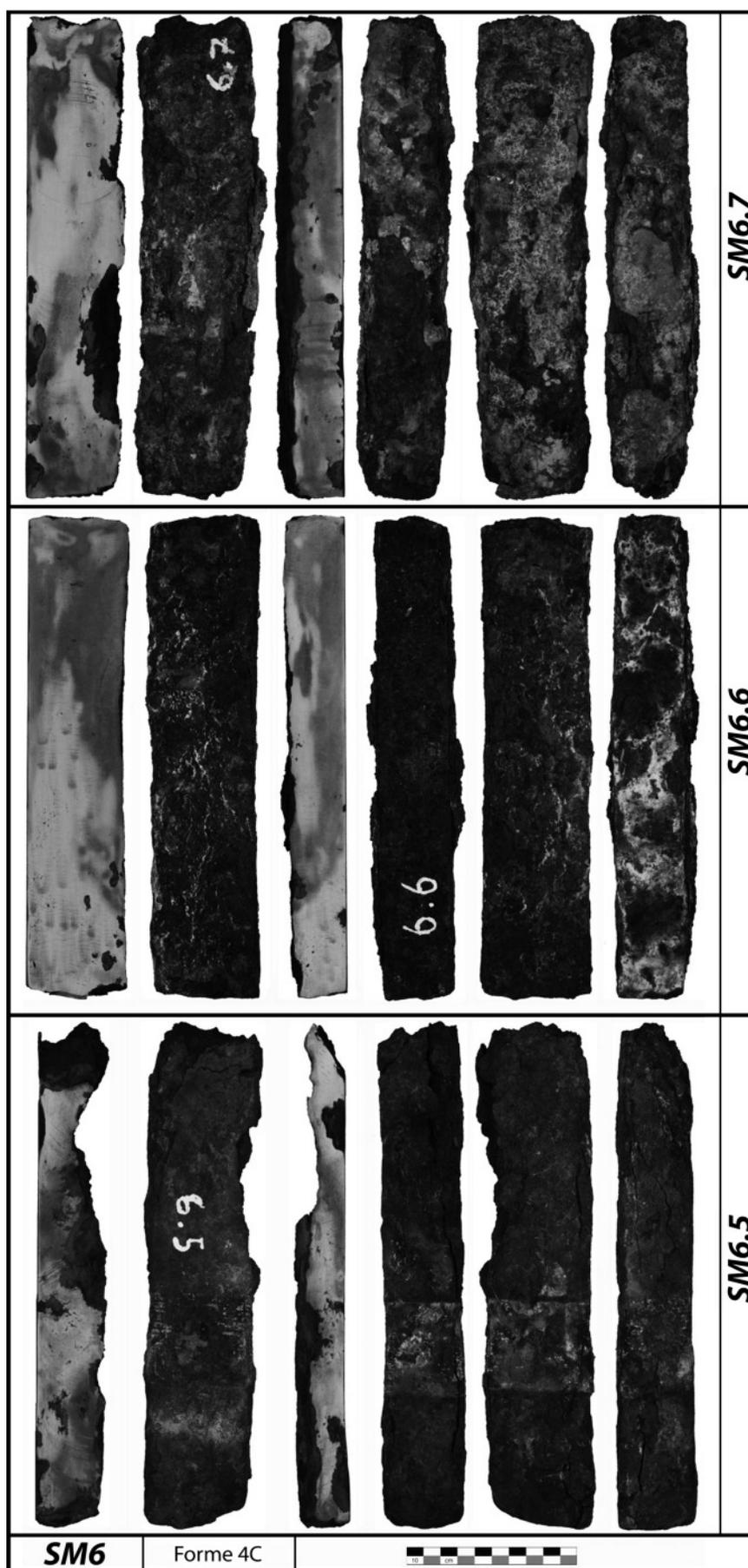


Fig. 196/1 : les demi-produits de type 4C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.

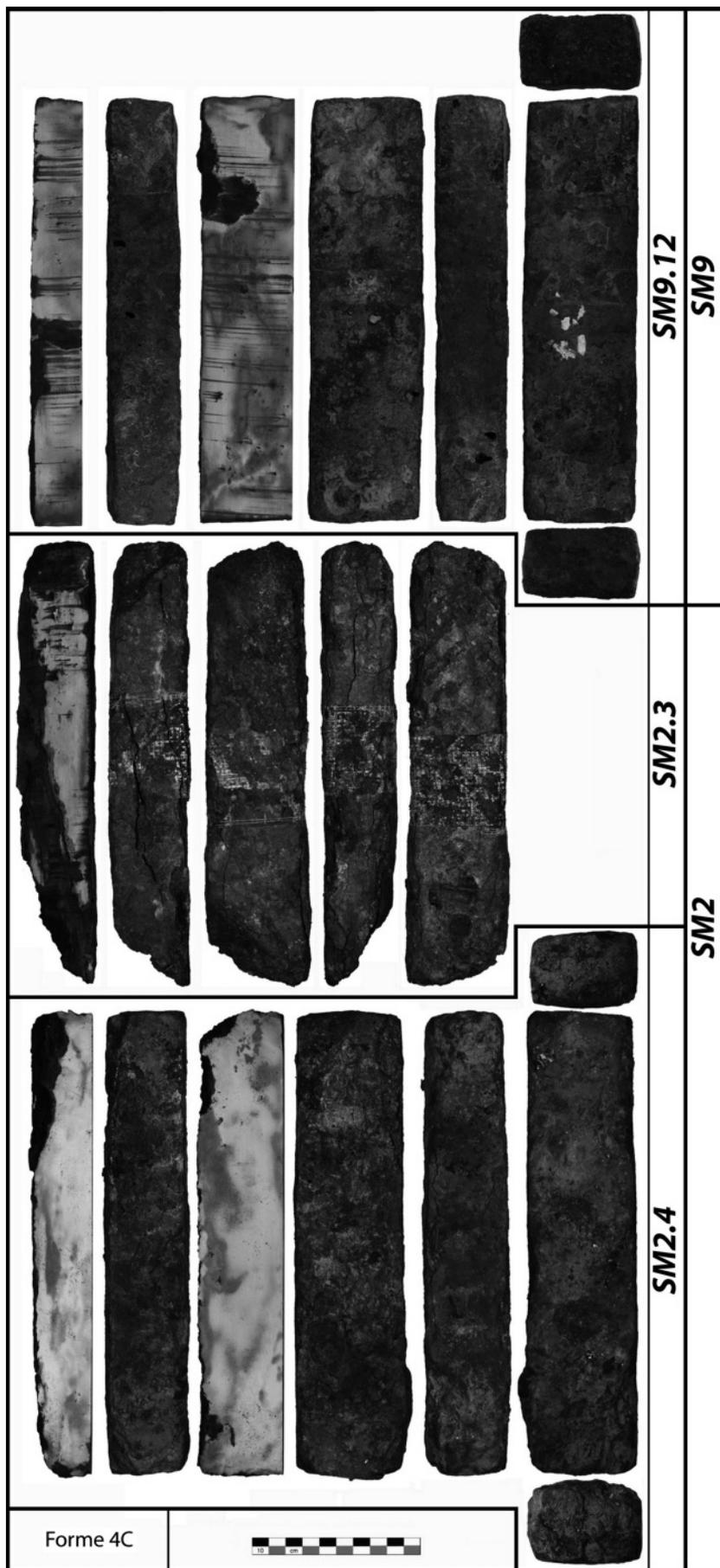


Fig. 196/2 : les demi-produits de type 4C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.

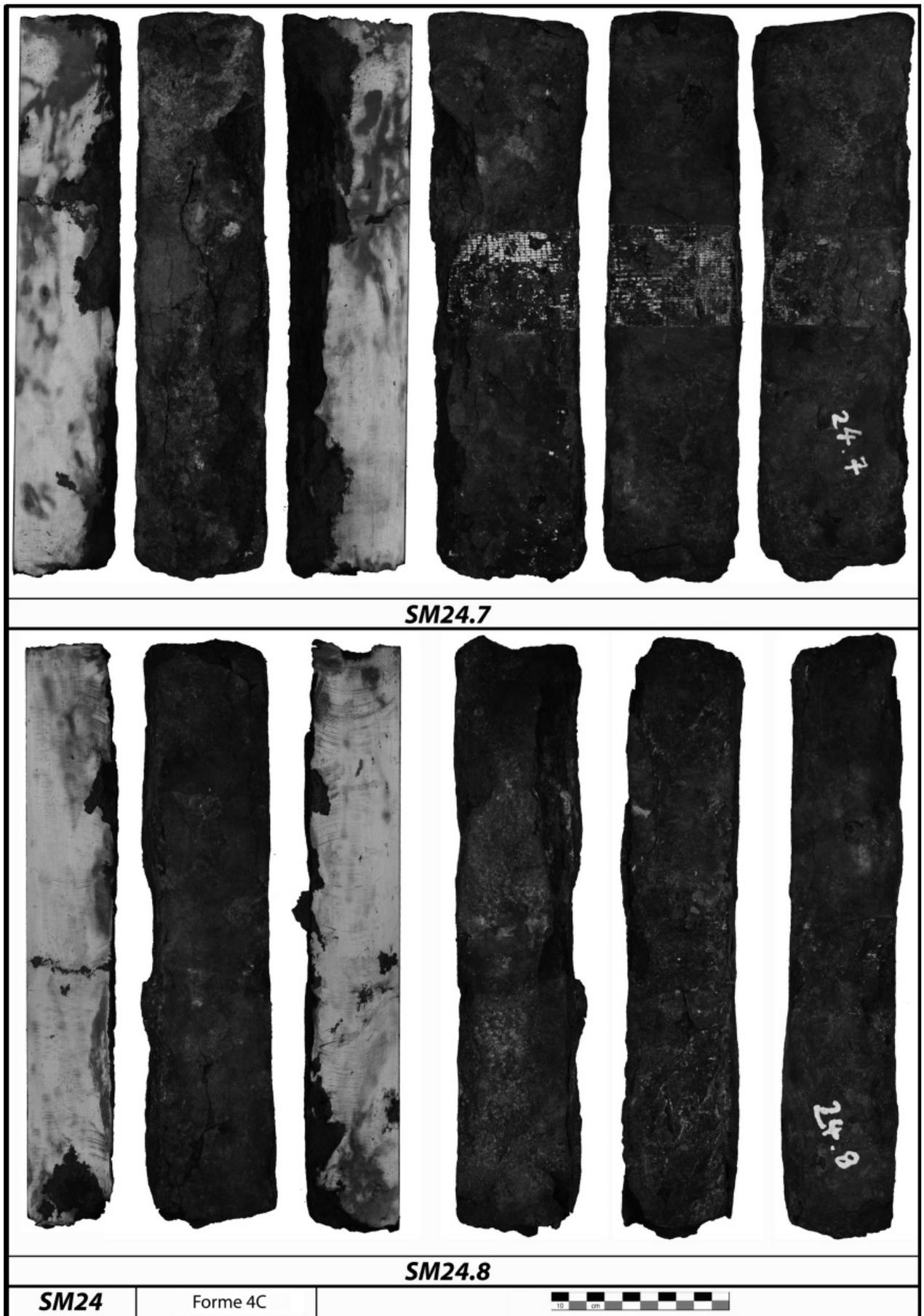


Fig. 196/3 : les demi-produits de type 4C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.

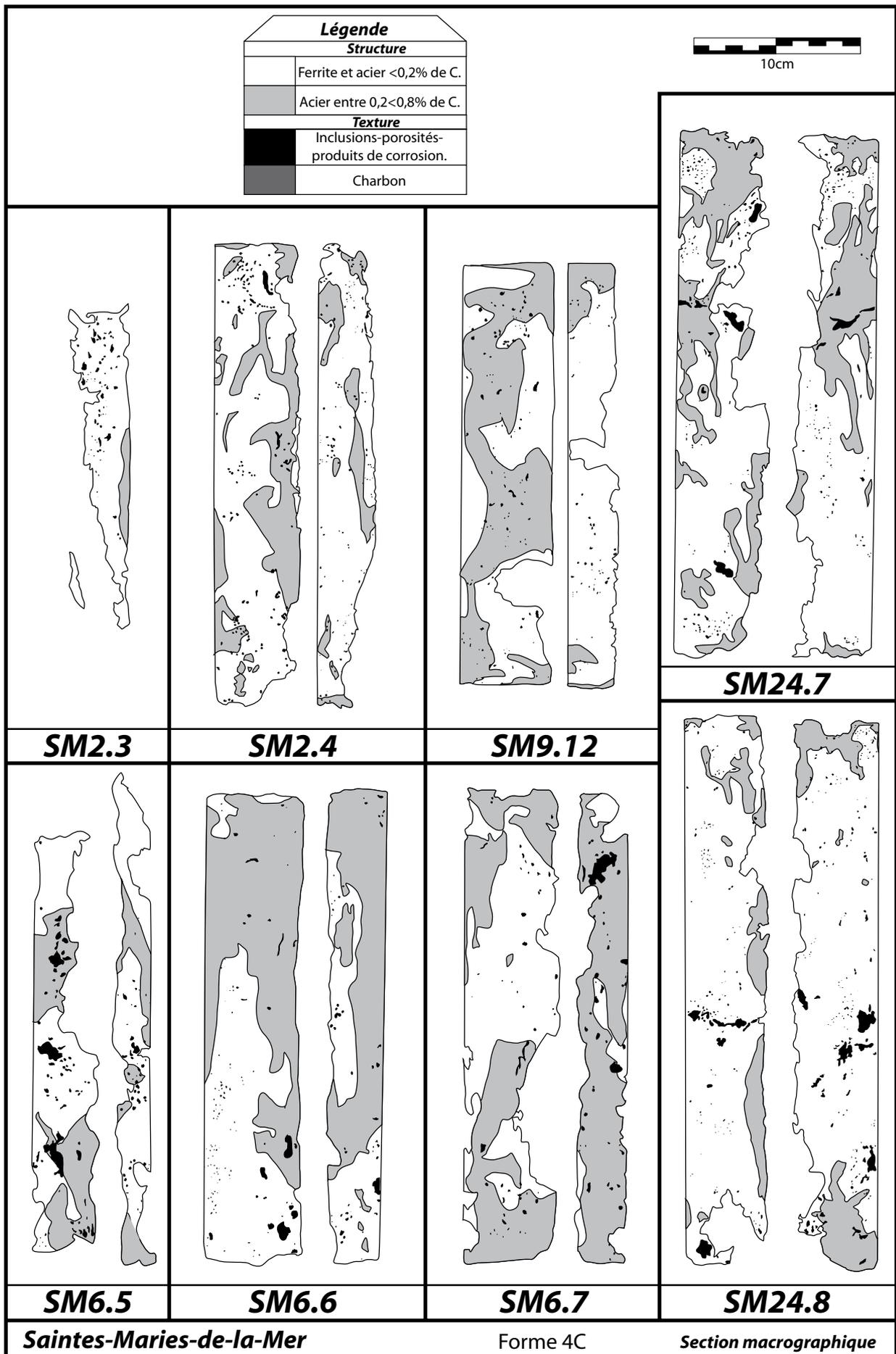


Fig. 197 : la structure des demi-produits de type 4C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.

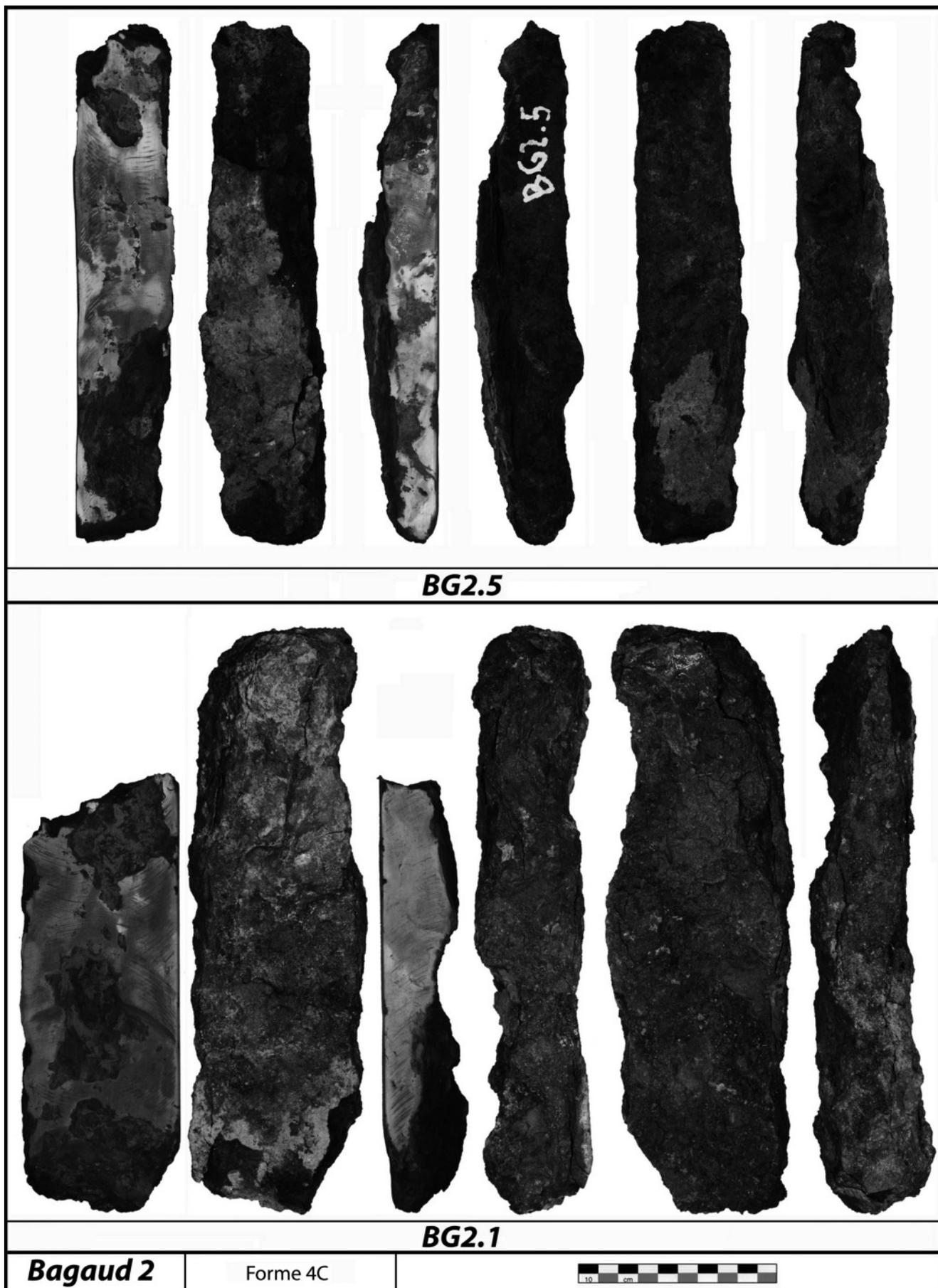


Fig. 198 : les demi-produits de type 4C de Bagaud 2 (Hyères, 83) analysés à l'échelle macrographique.

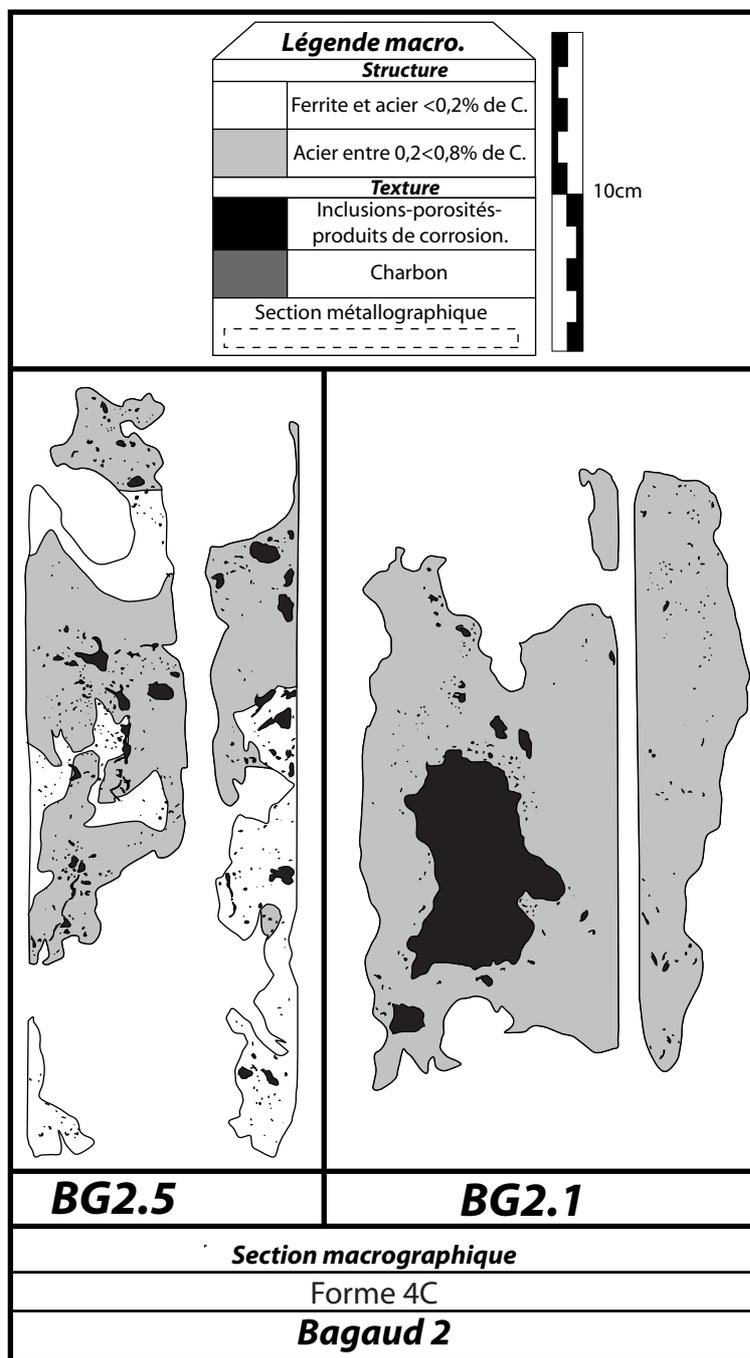


Fig. 199 : la structure des demi-produits de type 4C de Bagaud 2 (Hyères, 83) analysés à l'échelle macrographique.

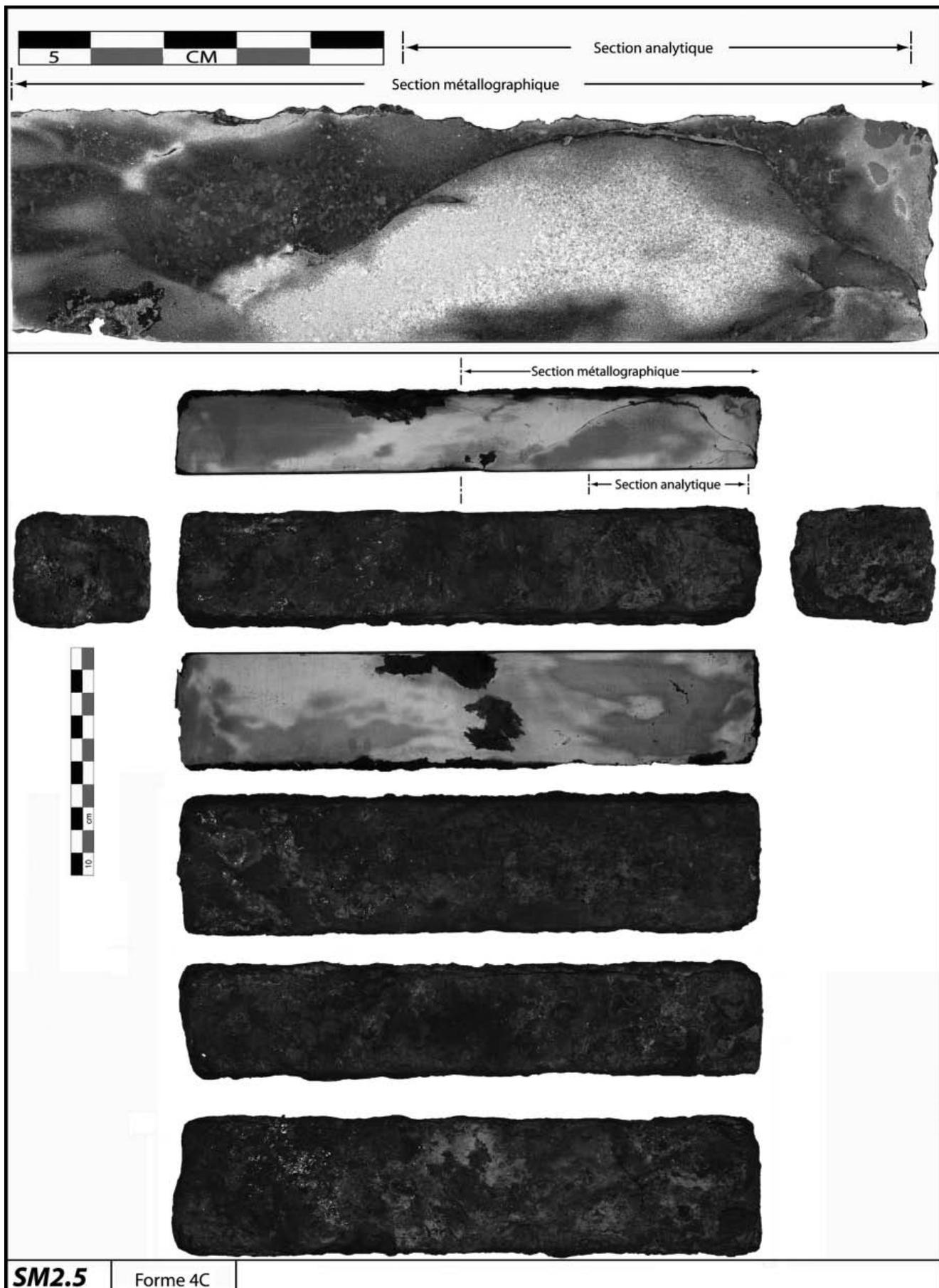


Fig. 200 : le demi-produit SM2.5 (type 4C) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

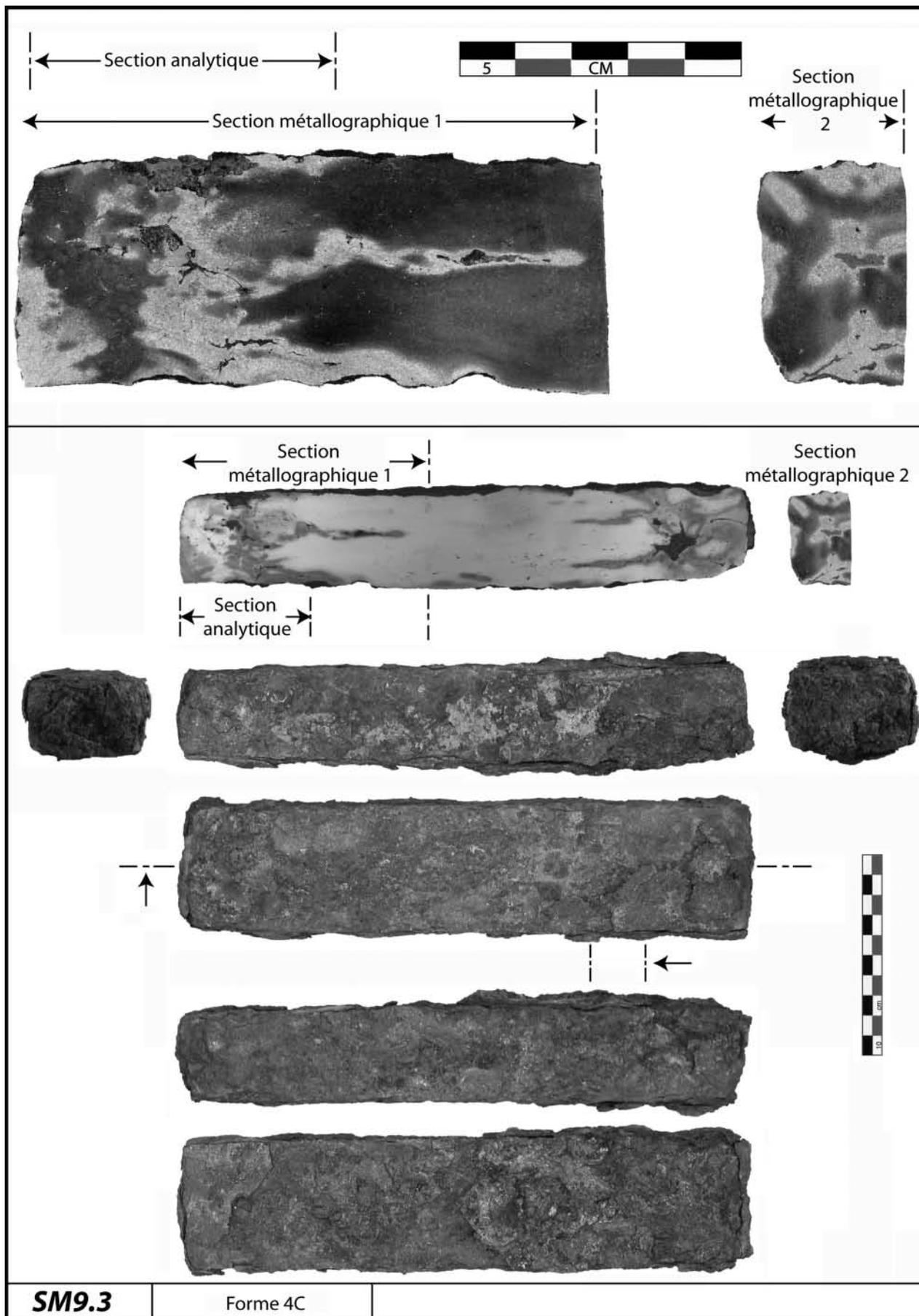


Fig. 201 : le demi-produit SM9.3 (type 4C) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

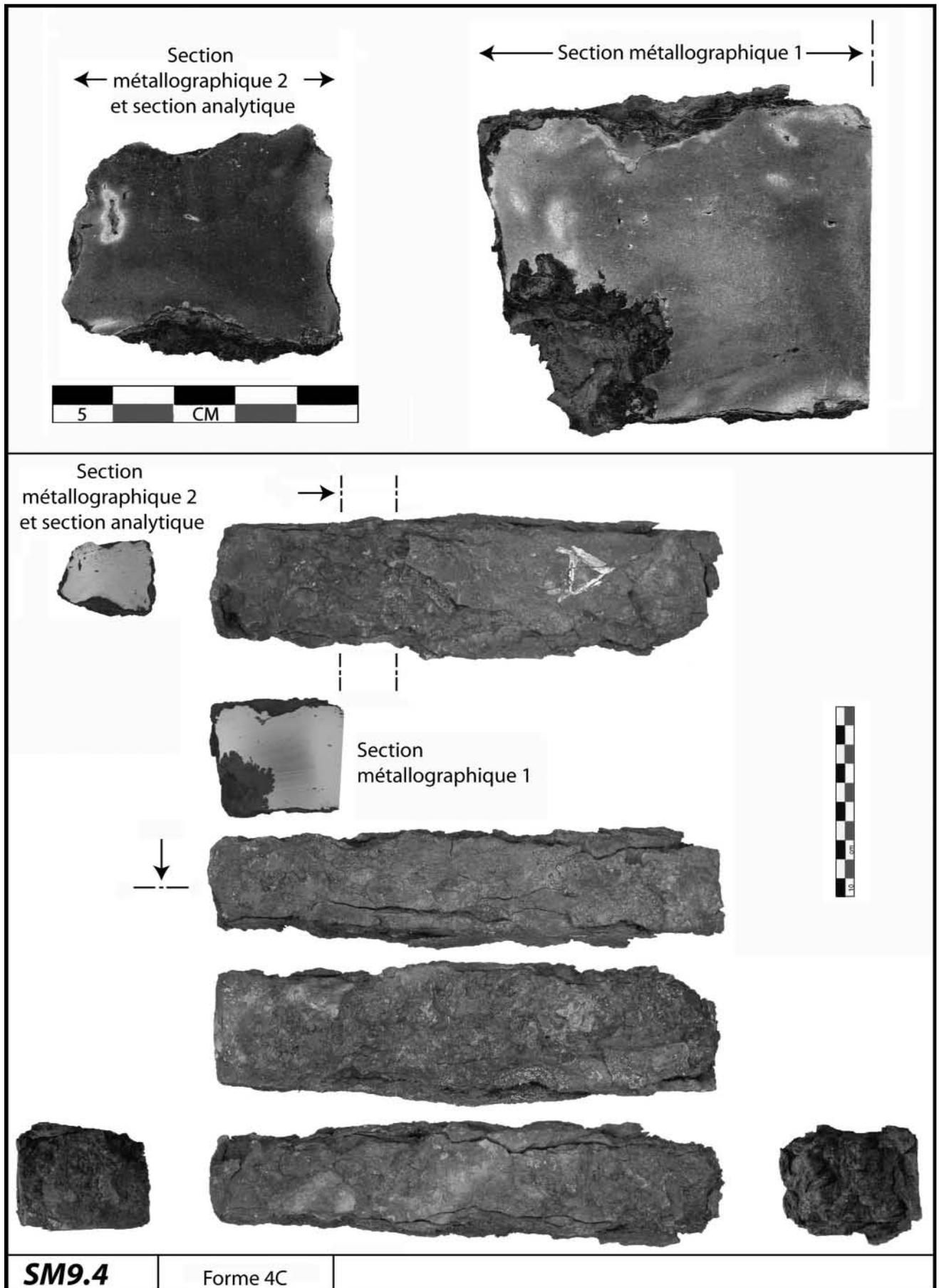


Fig. 202 : le demi-produit SM9.4 (type 4C) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

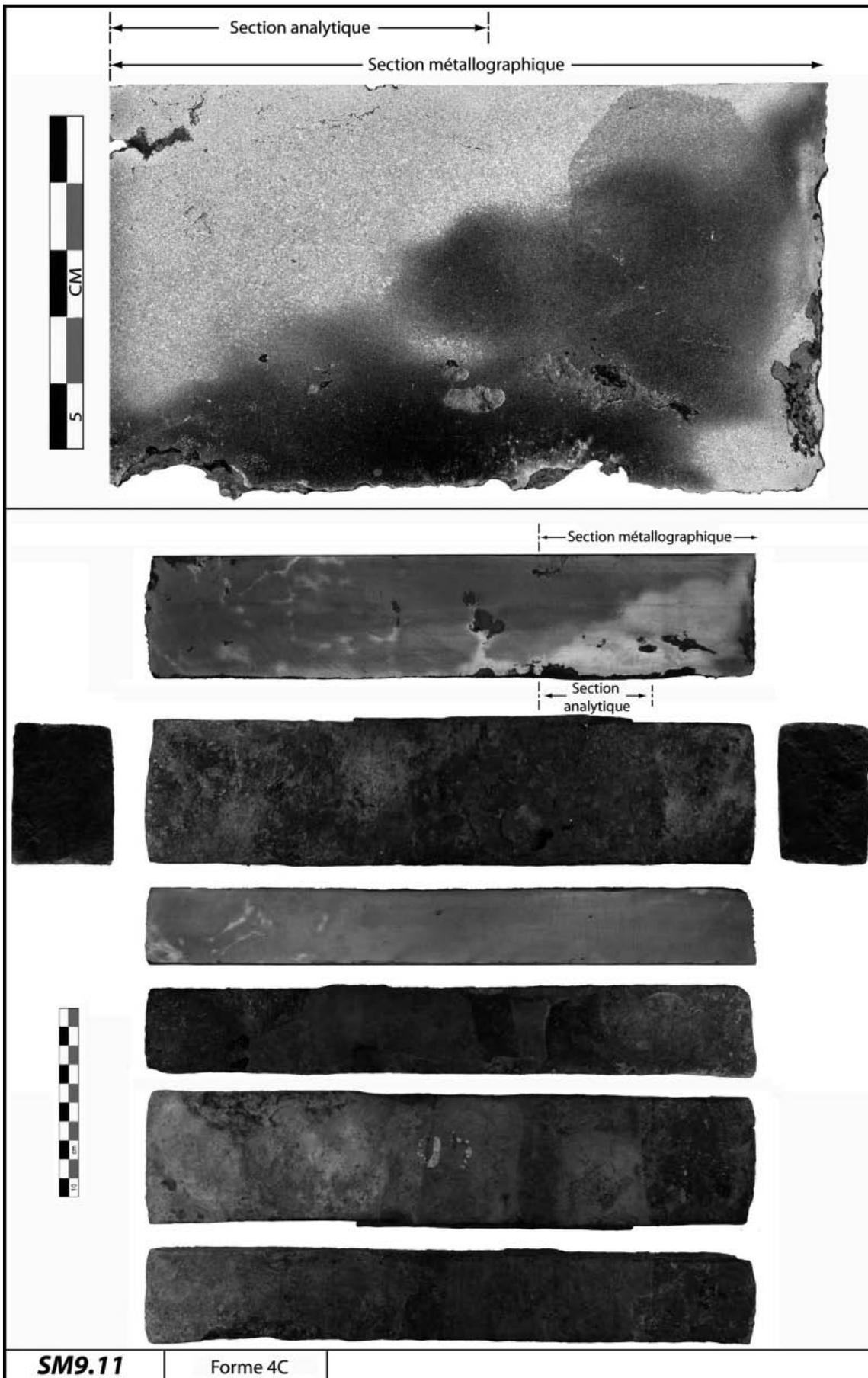


Fig. 203 : le demi-produit SM9.11 (type 4C) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

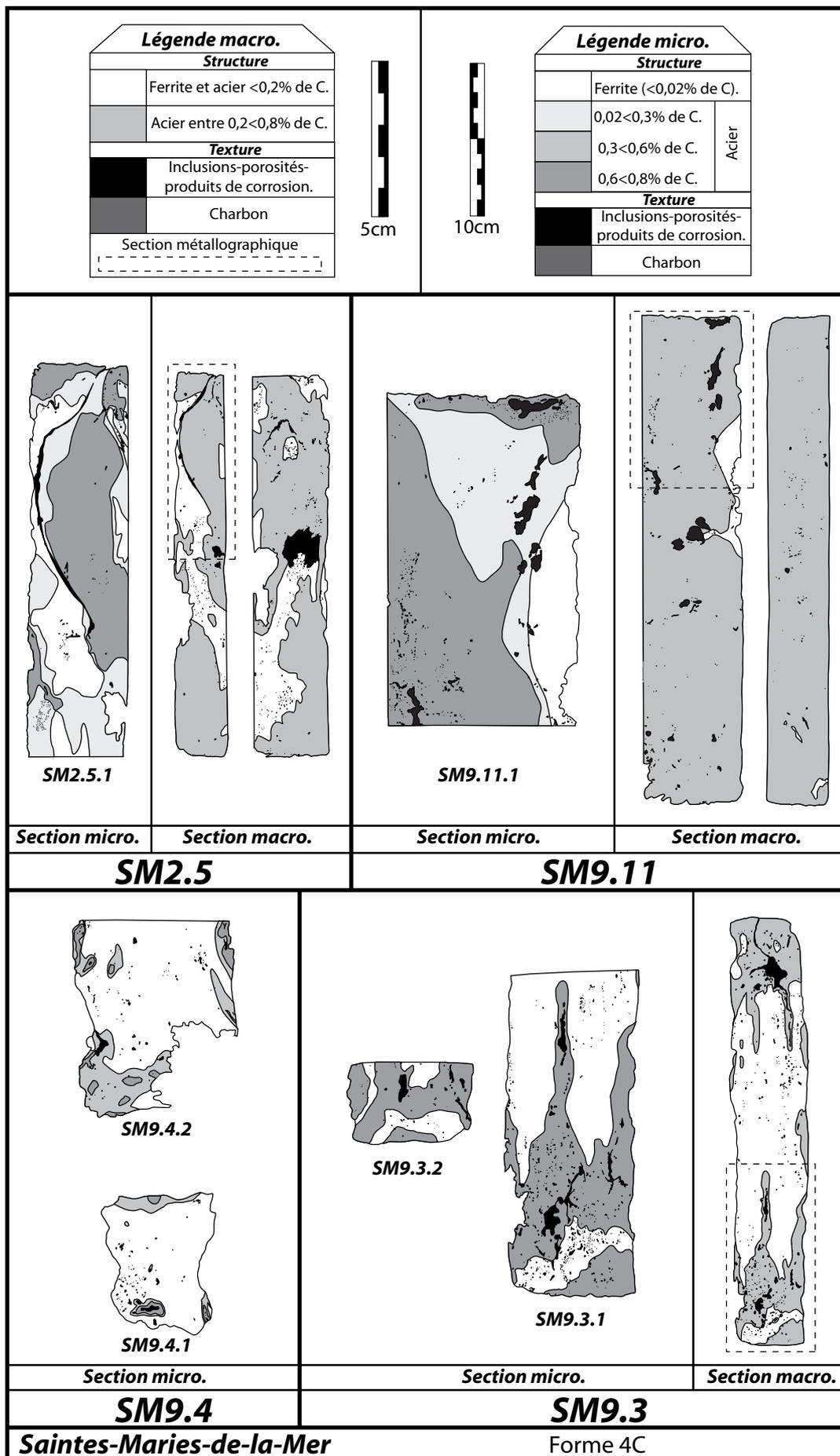


Fig. 204 : la structure des demi-produits de type 4C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle micrographique.

Type 4C																		
Echantillons		Morphologie					Métallographie											
							macrographie			micrographie								
		(mm)			m (g)	V (cm ³)	estimations (%)	n° section	propreté inclusionnaire		alliages (% de la surface)							
									n° de loupe	propreté inclusionnaire	surface acérée (0,2<0,8 % de C)	%	AFNOR NFA 04-106*	% de carbone				phosphore (0,1%<P<0,6%)
L	l	e	>0,02	0,02<0,3	0,3<0,6	0,6<0,8	pondéré											
épaves	n° inv.																	
SM2	3	240	54	40	1976	518	1	2,6	7									
	4	262	62	45	4258	731	1	1,6	22									
	5	236	55	43	3744	558	1	2,4	68	1	1,9	2*	25	0	31	44	0,5	0
SM6	5	280	44	58	2560	715	1	4,4	31									
	6	266	58	39	4240	602	1	1,4	51									
	7	264	63	43	3820	715	1	1,9	54									
SM9	3	260	64	47	4602	782	1	4,0	36	1	3,1	3*	55	0	0	45	0,5	0
										2	3,3	3*	32	0	0	68		0
	4	250	67	50	3200	838	?	?	?	1	1,1	2*	76	0	19	5	0,1	0
										2	1,4	2*	91	0	7	2		0
	11	297	66	42	5855	823	1	0,9	95	1	2,9	1*	15	8	0	77	0,6	0
12	238	62	38	3878	561	1	1,1	37										
SM24	7	280	75	60	6870	1260	1	1,4	27									
	8	300	56	53	5130	890	1	2,3	13									
BG2	1	249	65	38	2478	615	1	4,1	100									
	5	243	50	38	1570	462	1	9,1	57									
Moyenne		262	60	46	4047	739	1	2,3	45		2,3	2,2*	49	1	10	40	0,4	0
Ecart type		21	8	7	1374	196	0	1,2	30		0,9	0,8				0,2	0,0	
Coef. de variation (%)		8	13	16	34	27	0	52,2	66		41	35				54	0	

Fig. 205 : dimensions et structure des demi-produits de type 4C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) et de Bagaud 2 (Hyères, 83) : données métriques.

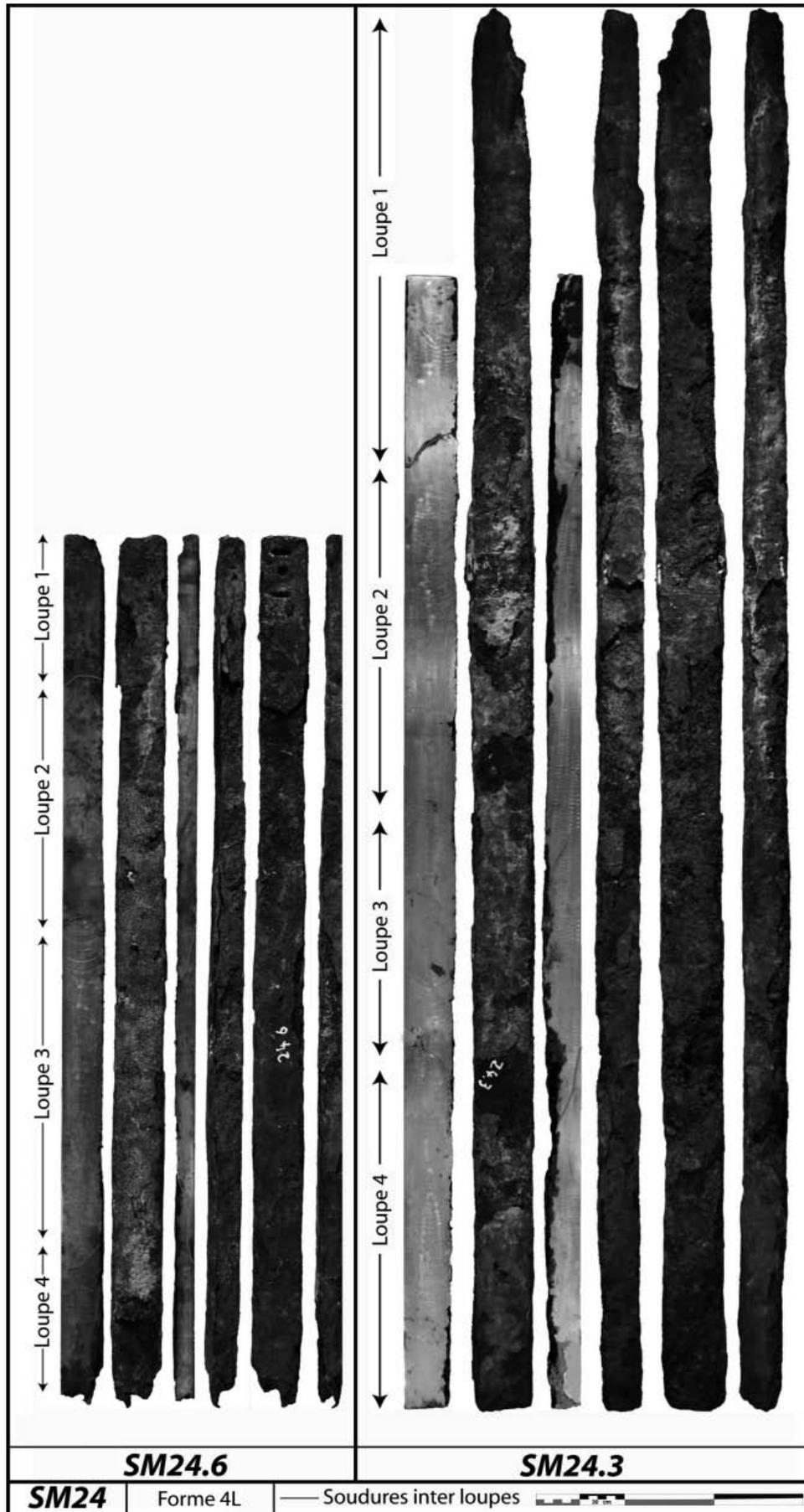


Fig. 206/1 : les demi-produits de type 4L des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.

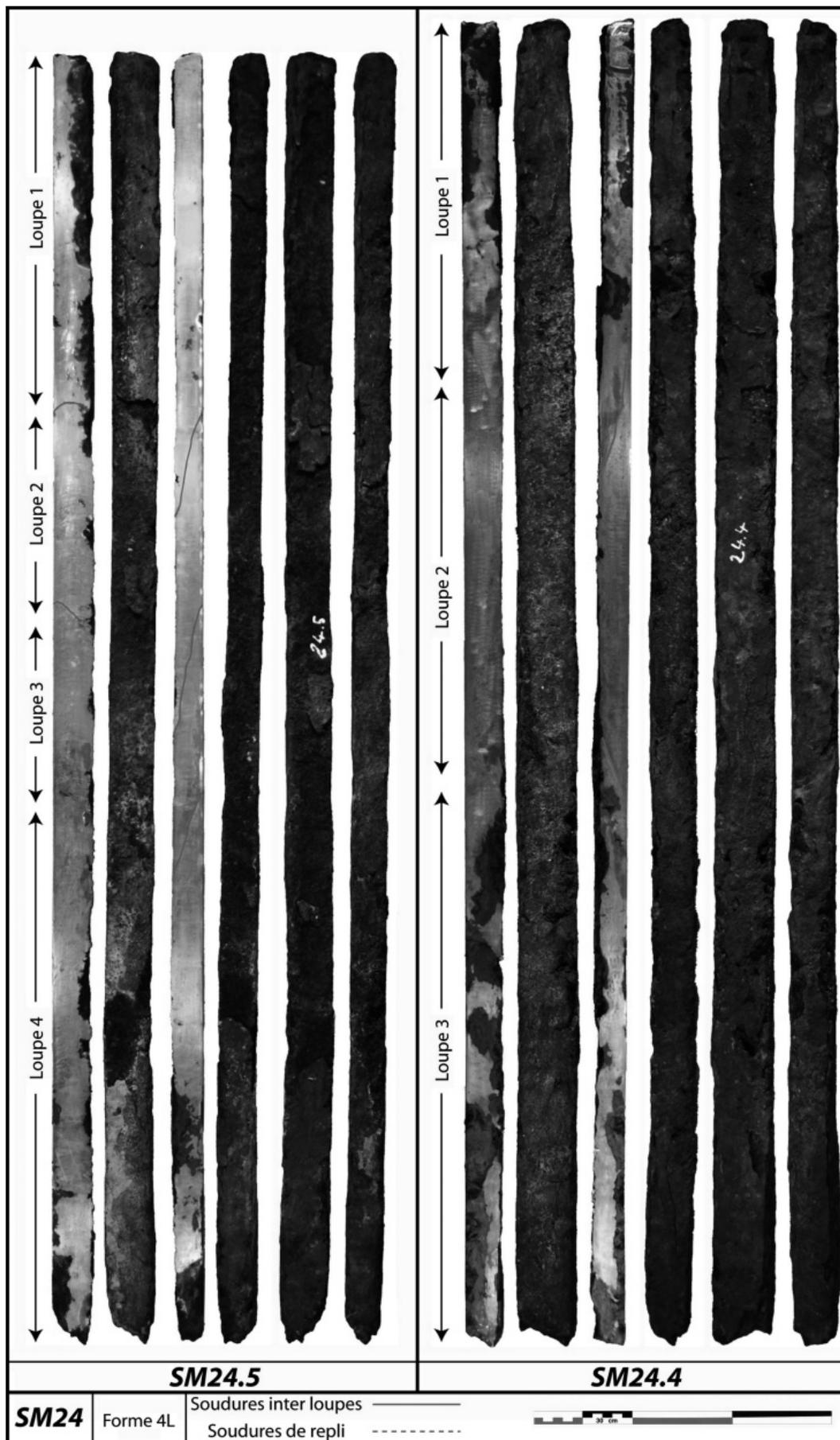


Fig. 206/2 : les demi-produits de type 4L des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.

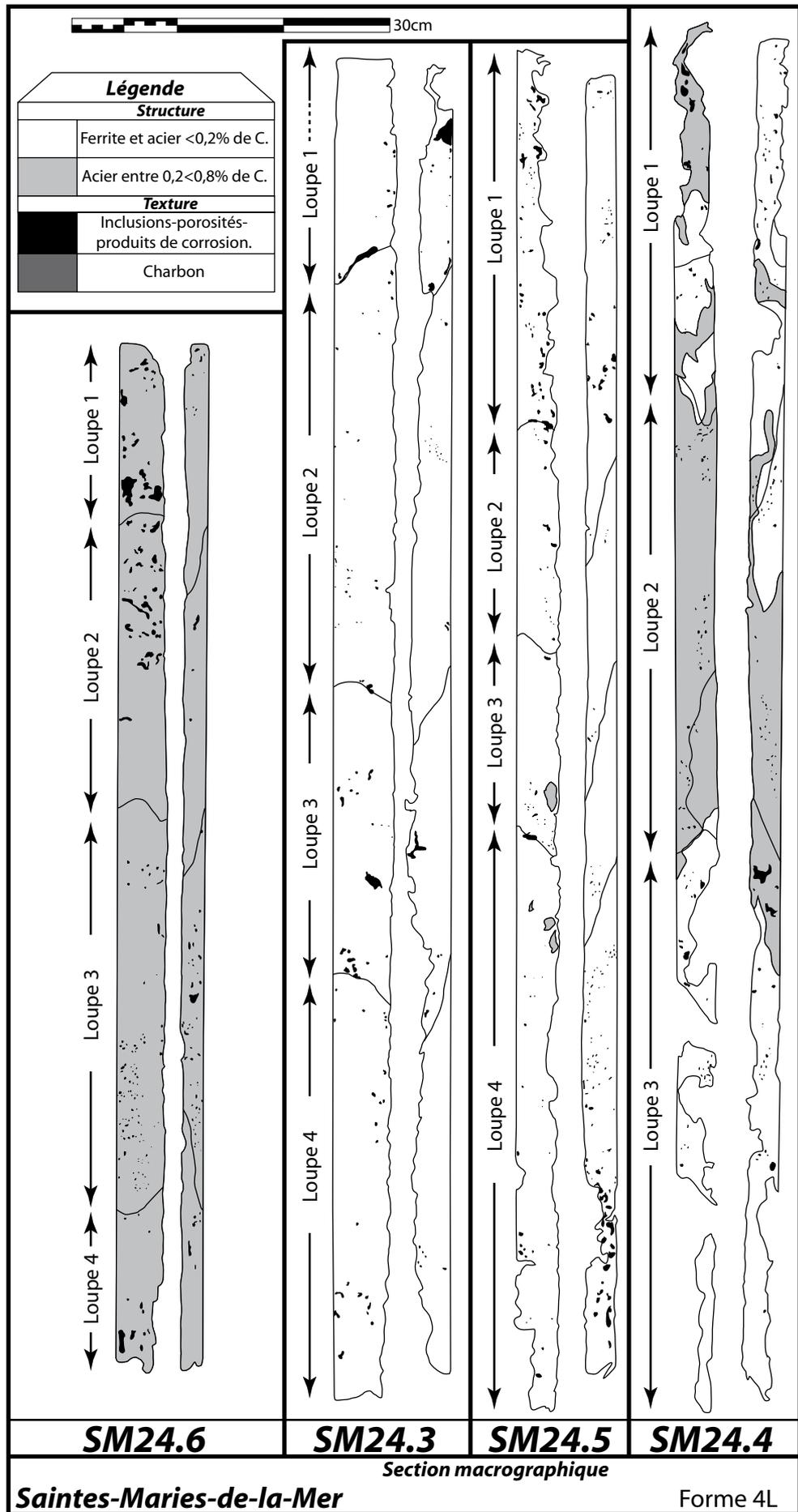


Fig. 207 : la structure des demi-produits de type 4L des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.

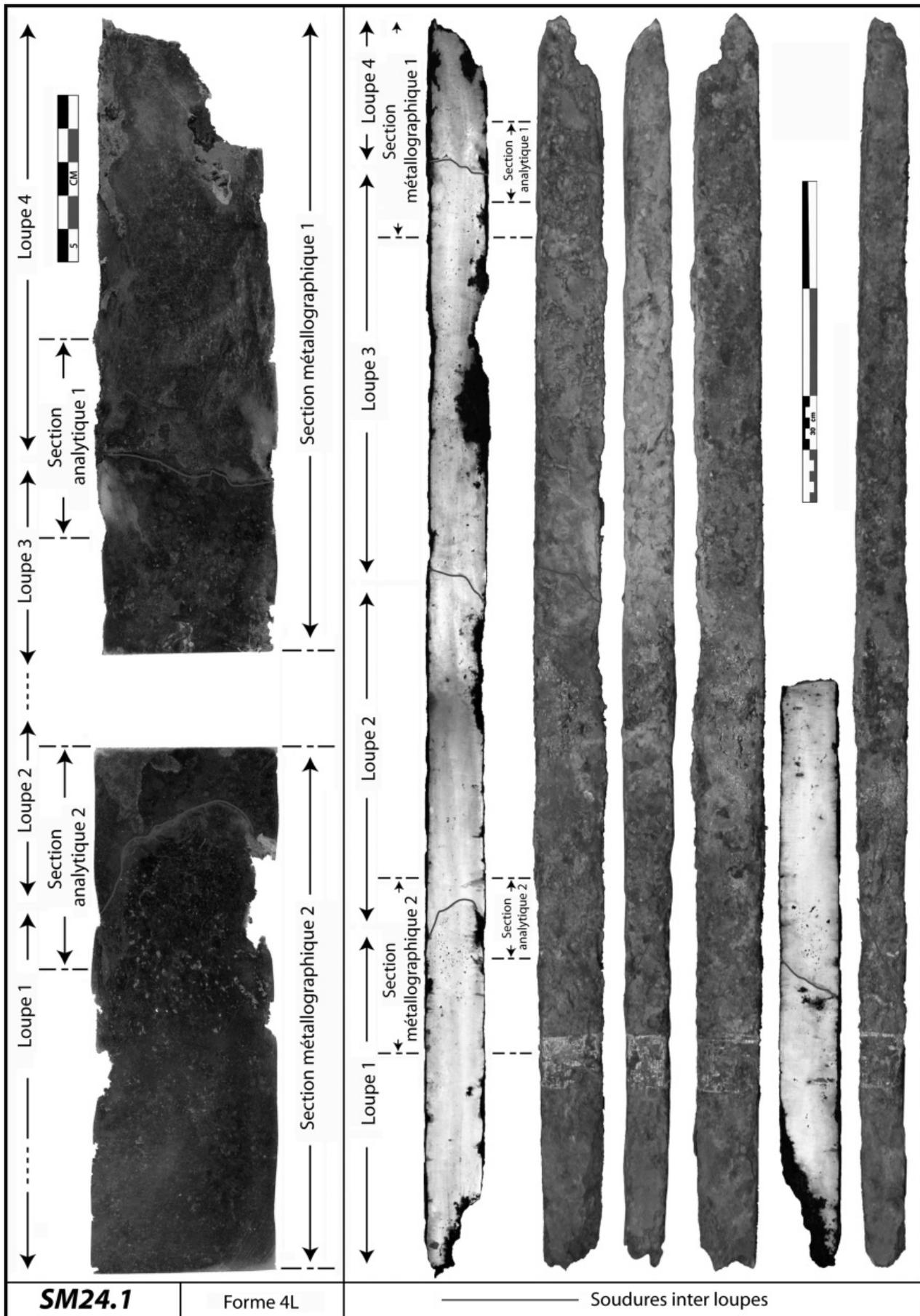


Fig. 208 : le demi-produit SM24.1 (type 4L) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

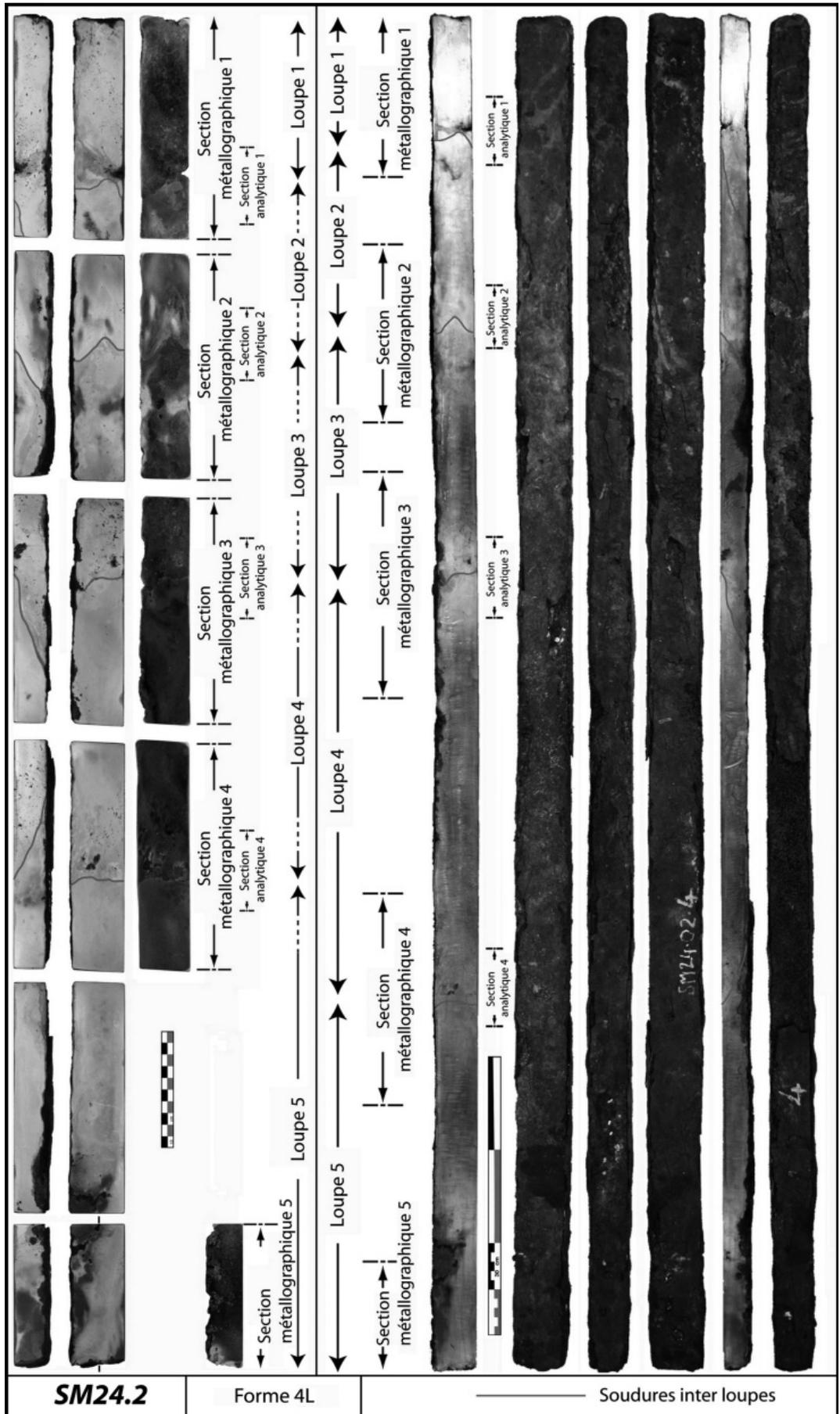


Fig. 209 : le demi-produit SM24.2 (type 4L) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

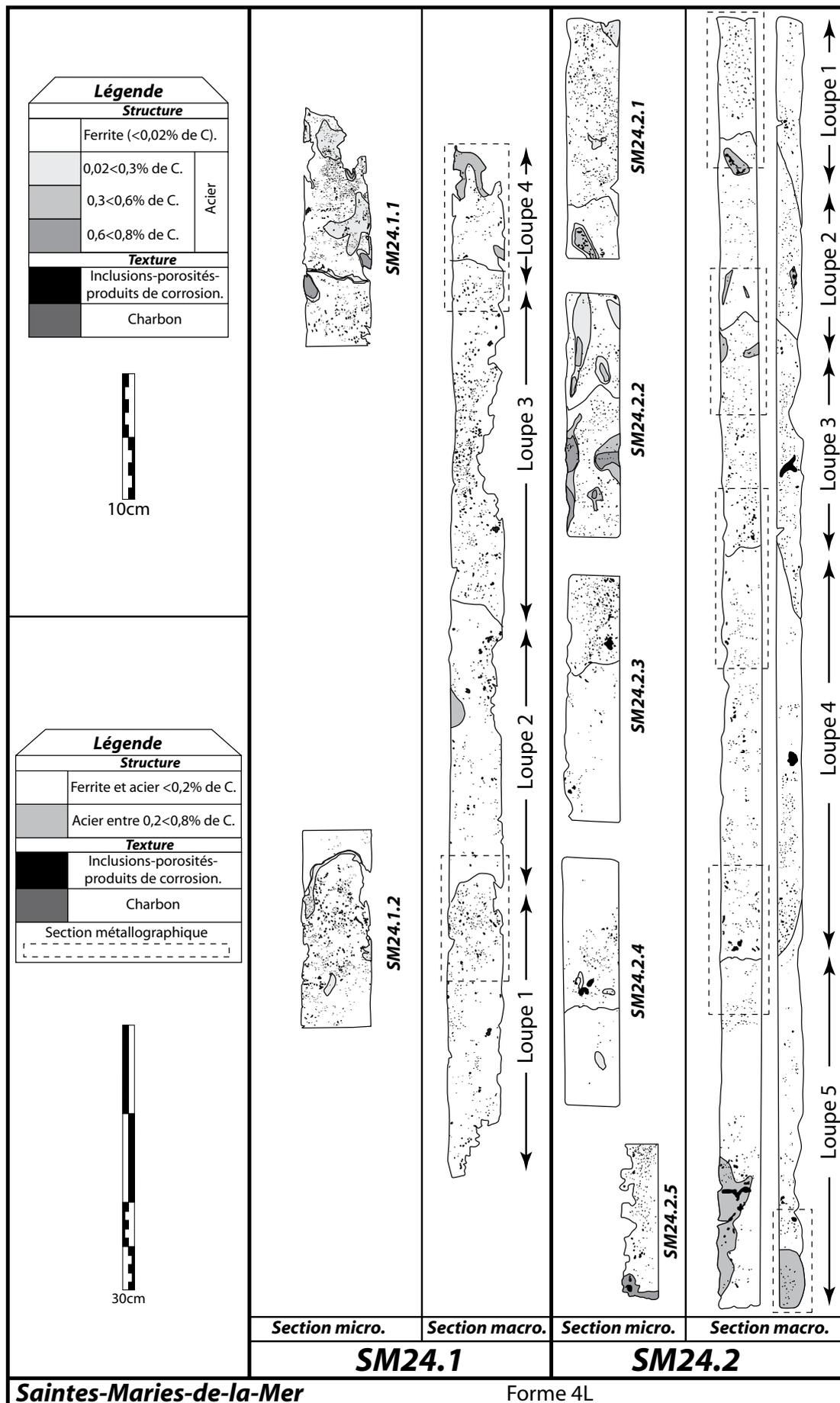


Fig. 210 : la structure des demi-produits de type 4L des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle micrographique.

Type 4L																											
Echantillons		Morphologie						Métallographie																			
		(mm)			V (cm3)			loupes			soudures			estimations (%)			n° section										
		L	I	e	m (g)	V (cm3)		moy.		max.		mini.		inter loupes		de rempli aux extrémités		qualité		propreté inclusionnaire		estimations (%)		micrographie			
épaves		n° inv.		n° inv.		n° inv.		n° inv.		n° inv.		n° inv.		n° inv.		n° inv.		n° inv.		n° inv.		n° inv.		n° inv.			
SM24		1	1160	58	40	13950	2691	4	825	905	745	3	0	+++	1,8	2	1	1,4	3*	80	18	0	2	100	100		
		2	1483	56	43	2290	3571	5	714	1081	489	4	0	+++	1,9	5	2	1,3	1*	77	10	7	6	100	100		
		3	1624	66	47	27140	5038	4	1259	1594	949	3	0	+++	1,2	0	4	3,4	4*	92	0	0	8	?	?		
		4	1358	57	43	17870	3328	3	1109	1402	912	2	1	+++	1,3	42	2	1,6	3*	94	6	0	0	100	100		
		5	1352	47	36	13920	2288	4	572	944	342	3	0	+++	1,6	0	4	2,8	4*	94	4	2	0	100	100		
Moyenne		1332	56	40	14108	3079	4	817	1082	618	3	0	+++	1,8	23	4	2,0	2,4*	83	0,1			0,1				
Ecart type		219	6	6	8308	1202	0,6	318	370	292	0,5		33		0,0		1,4		40,8			12					
Coef. de variation (%)		16	11	16	59	39	16	39	34	47	29,7		144		41		58		12			49					

Fig. 211 : dimensions et structure des demi-produits de type 4L des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) : données métriques.

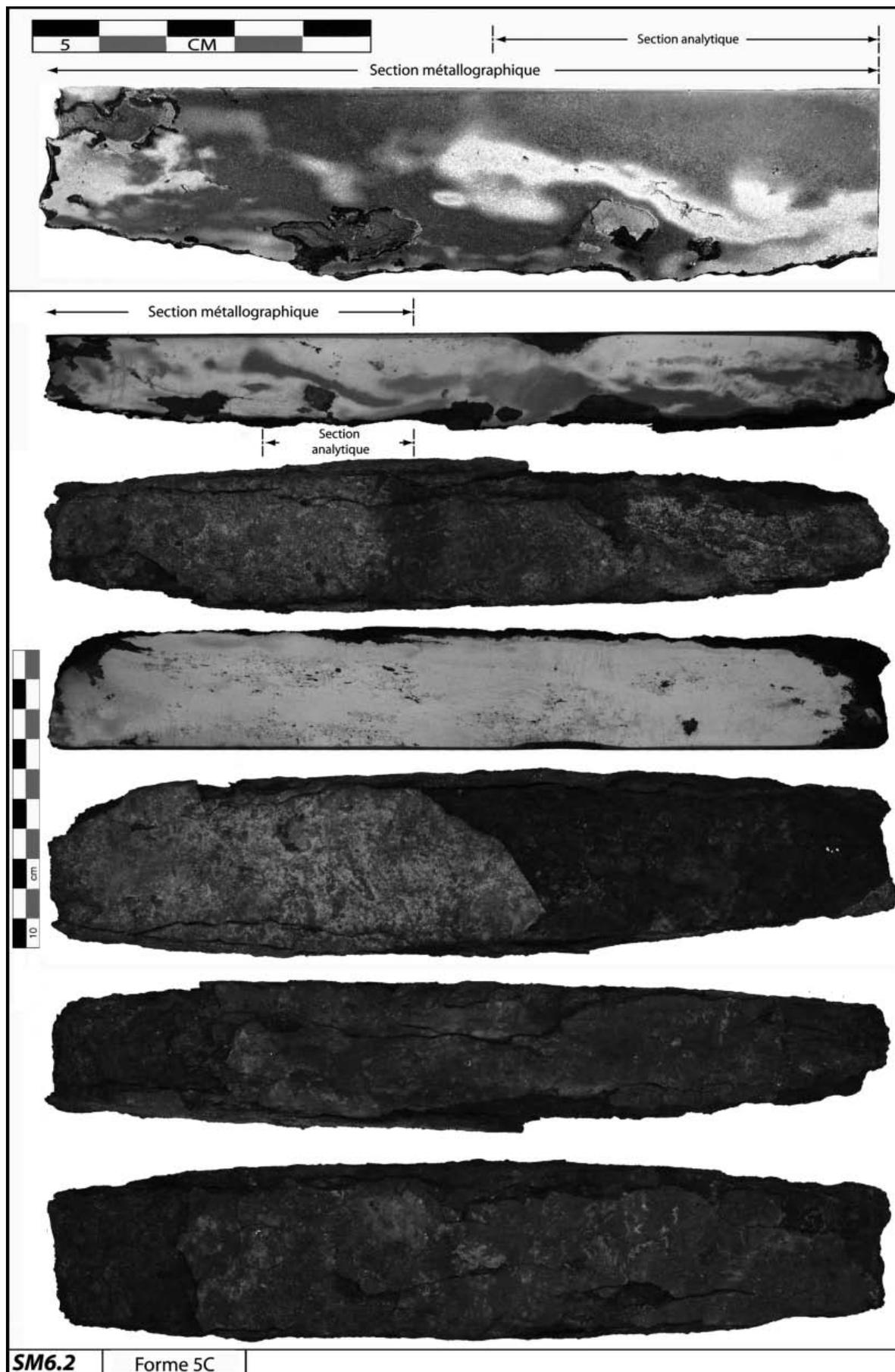


Fig. 212 : le demi-produit SM6.2 (type 5C) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

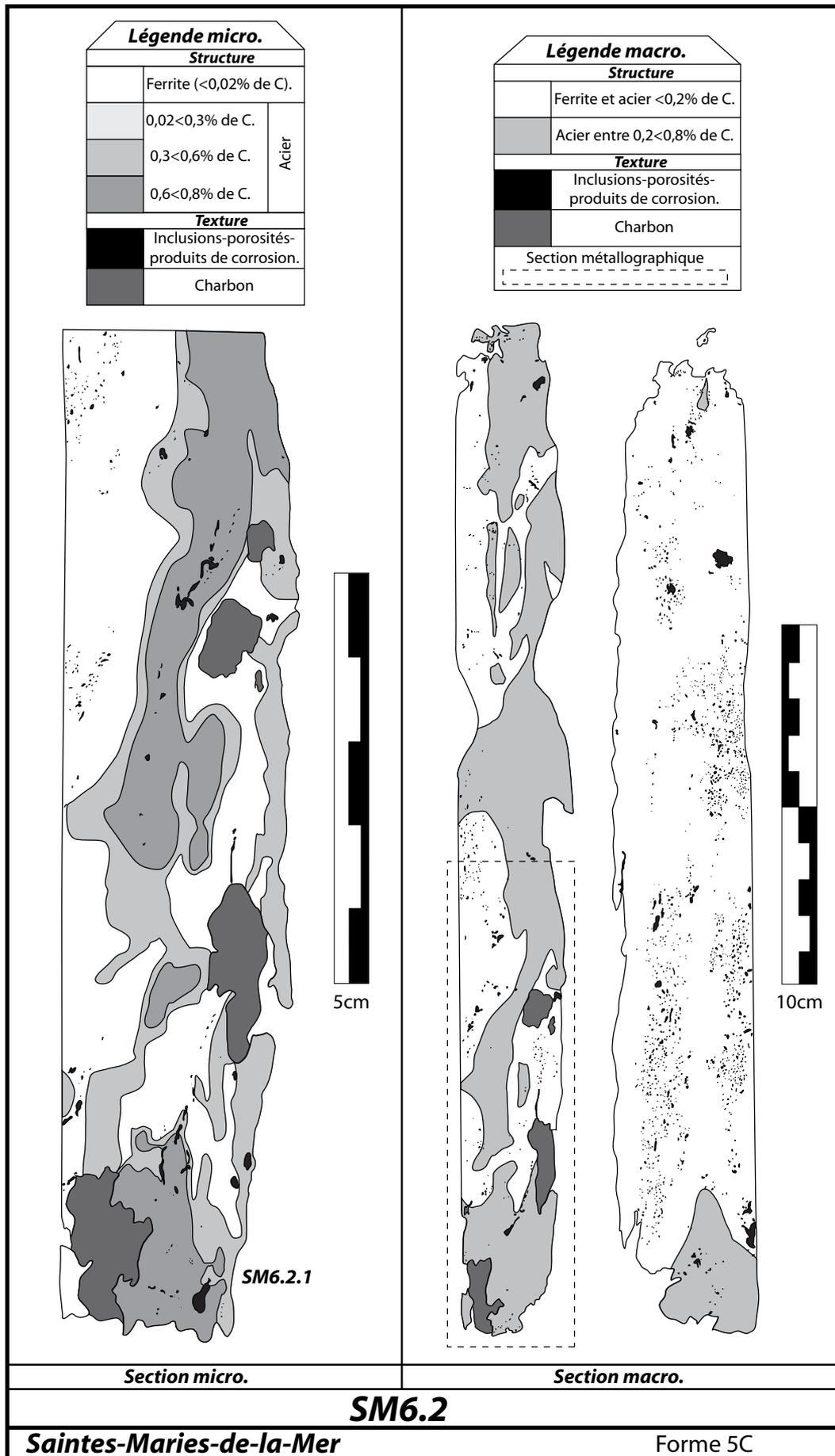


Fig. 213 : la structure du demi-produit de type 5C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

Type 5C																		
Echantillons		Morphologie					Métallographie											
		(mm)			m (g)	V (cm ³)	macrographie				micrographie							
							nbre de loupe	estimations (%)		n° section	propreté inclusionnaire		estimations					
		épaves	n° inv.	L	l	e		propreté inclusionnaire	surface aciée (0,2<0,8 % de C)		%	AFNOR NFA 04-106*	% de carbone				phosphore (0,1%<P<0,6%)	
SM6	2						272			48			36	2838	470	1		1,9

Fig. 214 : dimensions et structure du demi-produit de type 5C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) : données métriques.

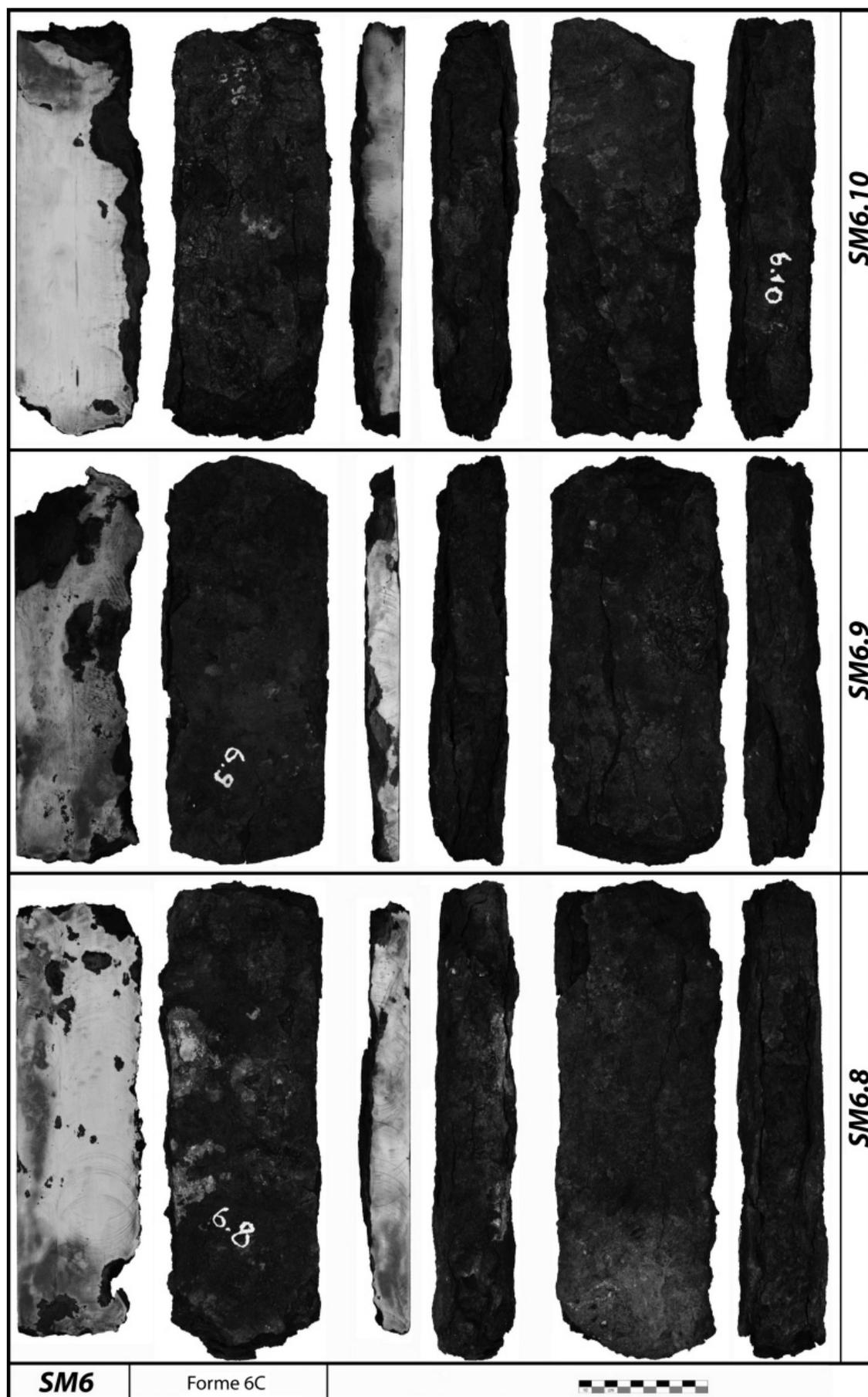


Fig. 215 : les demi-produits de type 5C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés à l'échelle macrographique.

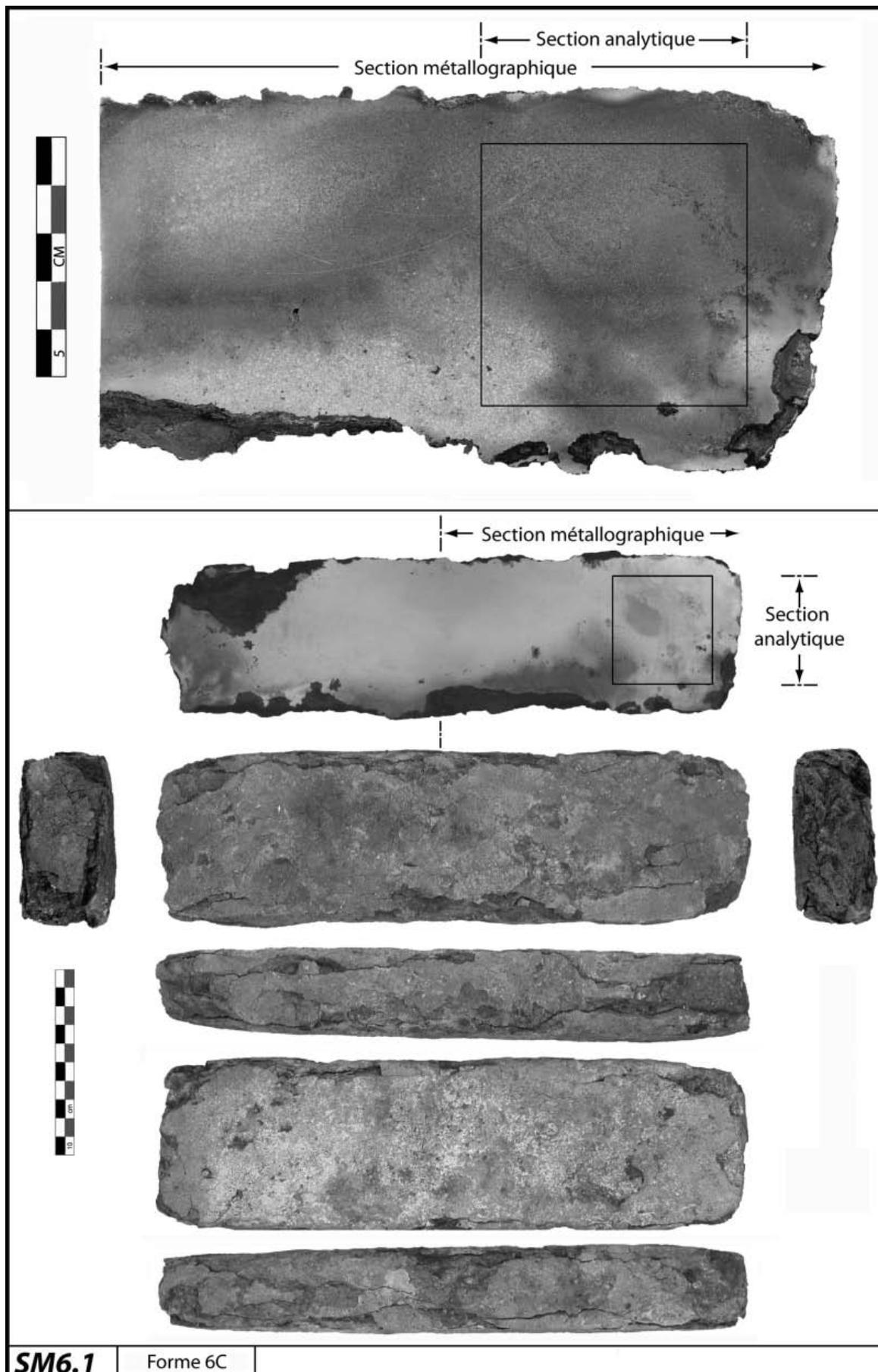


Fig. 216 : le demi-produit SM6.1 (type 6C) des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysé à l'échelle micrographique.

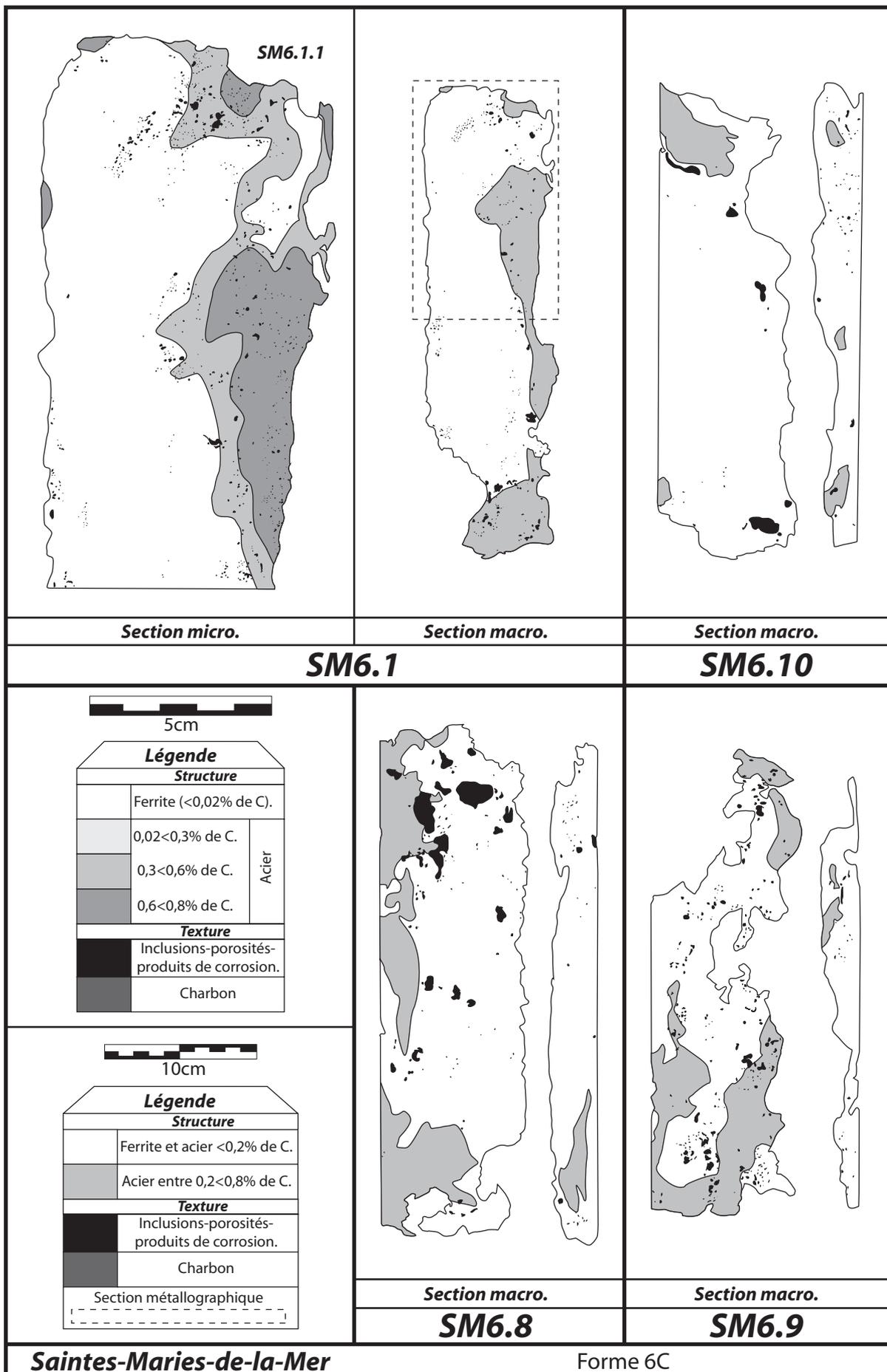


Fig. 217 : la structure des demi-produits de type 6C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) analysés aux échelles macrographique et micrographique.

Type 6C																			
Echantillons		Morphologie					Métallographie												
		(mm)			m (g)	V (cm ³)	macrographie			micrographie									
		épaves	n° inv.	L			l	e	nbre de loupe	estimations (%)		propreté inclusionnaire		estimations					
					propreté inclusionnaire	surface acérée (0,2<0,8 % de C)				n° section	%	AFNOR NFA 04-106*	% de carbone						phosphore (0,1%<P<0,6%)
>0,02	0,02<0,3												0,3<0,6	0,6<0,8	pondéré				
SM6	1	320	89	43	4910	1225	1	0,9	25	1	0,5	1*	71	0	15	14	0,2	0	
	8	354	150	47	8120	2496	1	3,6	19										
	9	280	115	40	4890	1288	1	2,3	27										
	10	295	105	52	6790	1611	1	1,4	7										
Moyenne		312	115	46	6178	1655	1	2,1	20	0,5	1*	71	0	15	14	0,2	0		
Ecart type		32	26	5	1572	586	0	1,2	9										
Coef. de variation (%)		10	23	11	25	35	0	57,8	46										

Fig. 218 : dimensions et structure des demi-produits de type 6C des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) : données métriques.

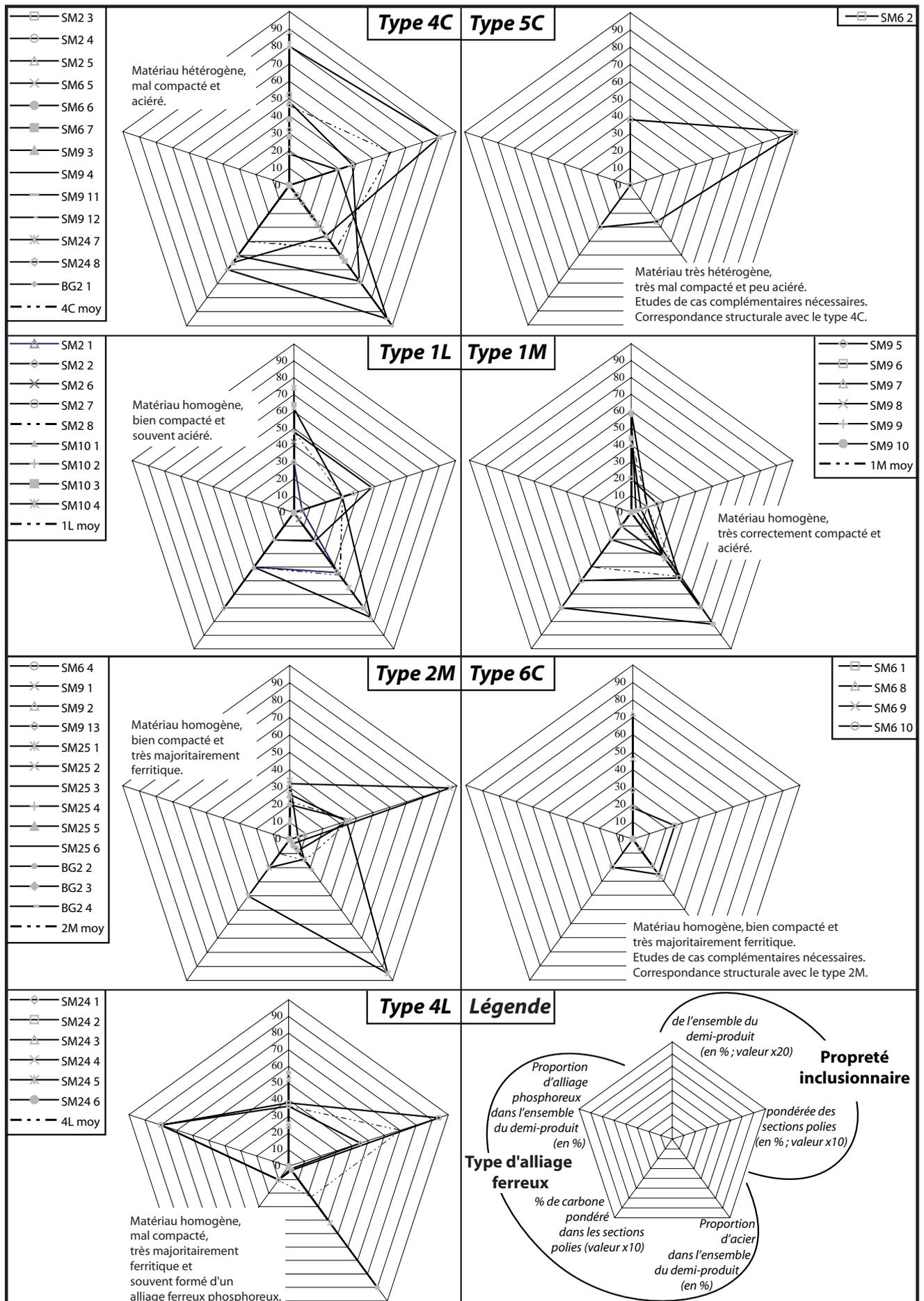


Fig. 219 : résumé des principales caractéristiques structurales de chaque type de demi-produits assimilé à la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer.

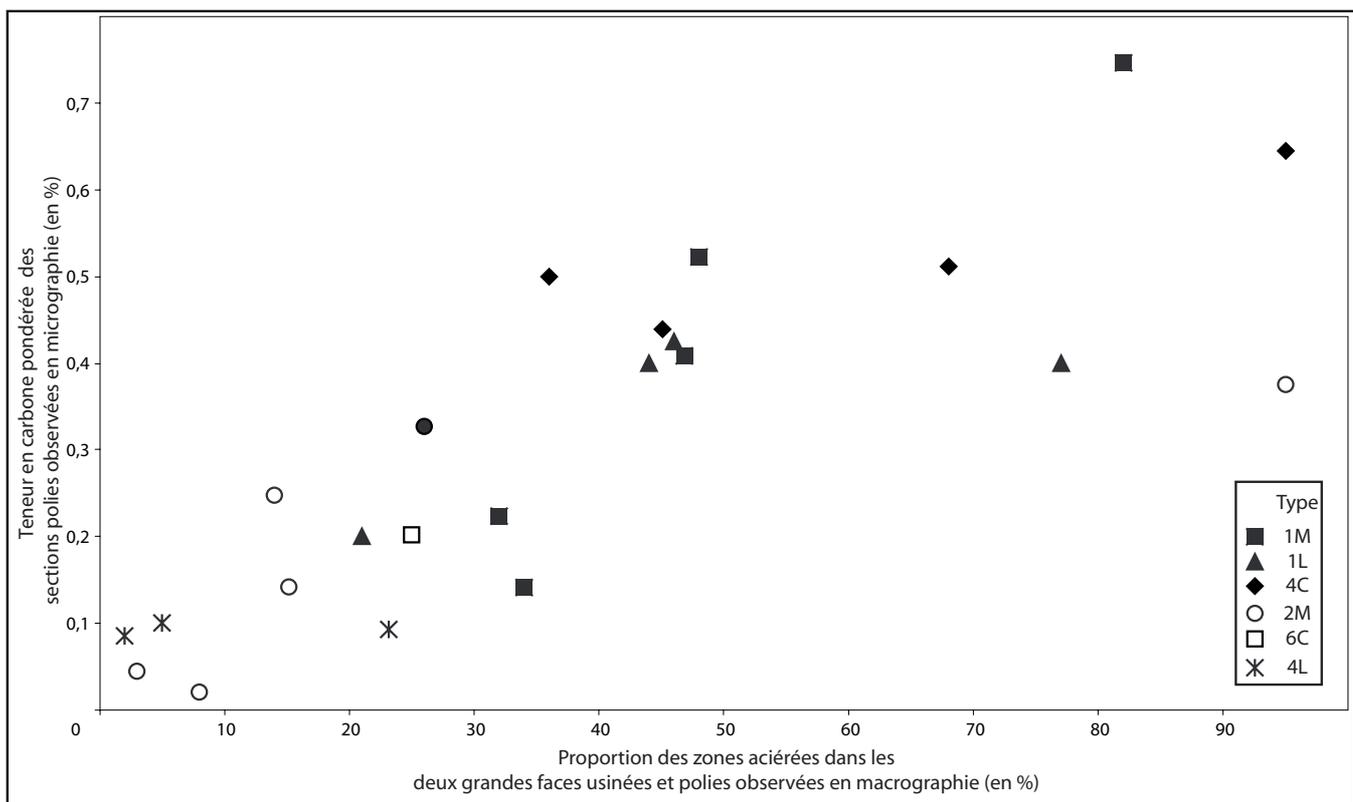


Fig. 220 : rapport entre le % de carbone pondéré (observation microscopique des sections polies) et la proportion des zones aciérées (observation macroscopique des deux grandes faces) dans chaque demi-produit assimilé à la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer.

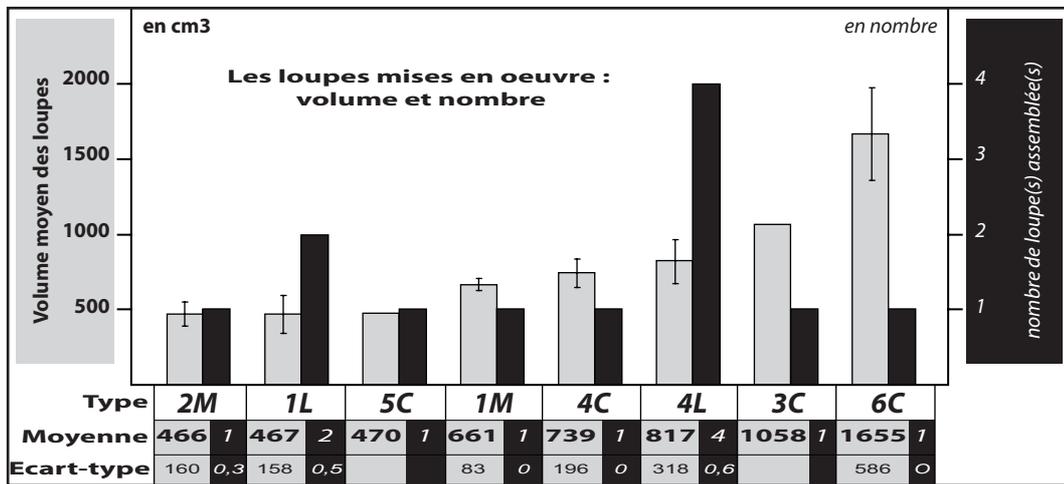


Fig. 221 : volume et nombre de loupe(s) mise(s) en œuvre dans chaque type morphologique de demi-produits assimilé à la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer.

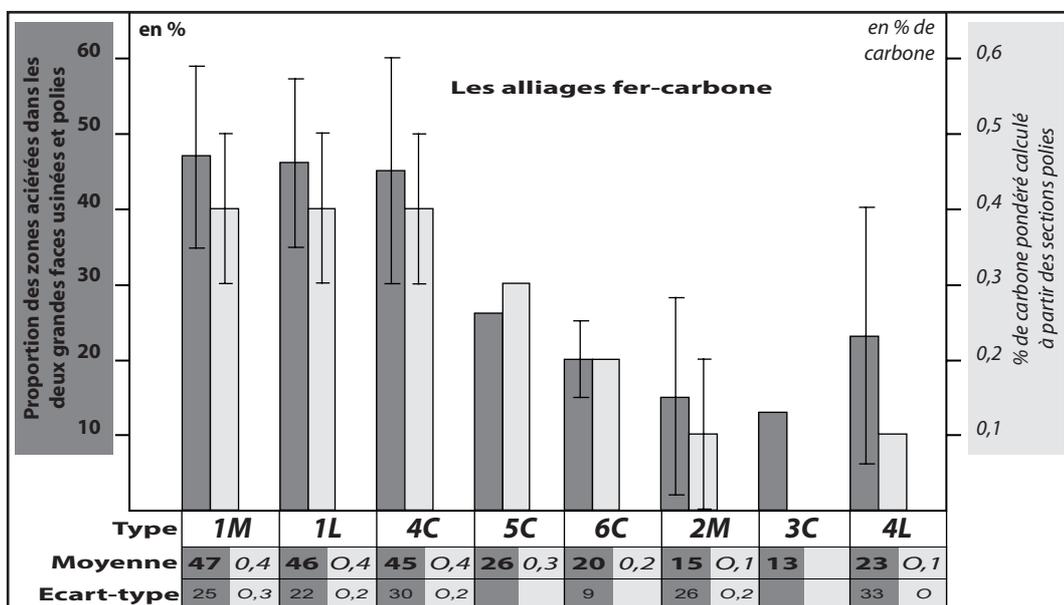


Fig. 222 : la qualité des alliages fer-carbone de chaque type morphologique de demi-produits assimilé à la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer : proportion des zones aciérées et teneur en carbone pondérée.

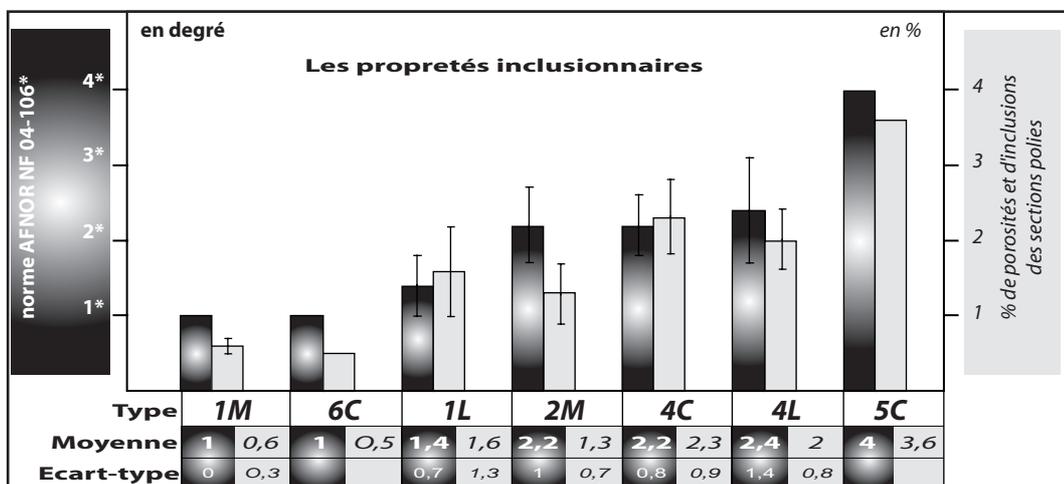


Fig. 223 : la propreté inclusionnaire de chaque type morphologique de demi-produits assimilé à la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer.

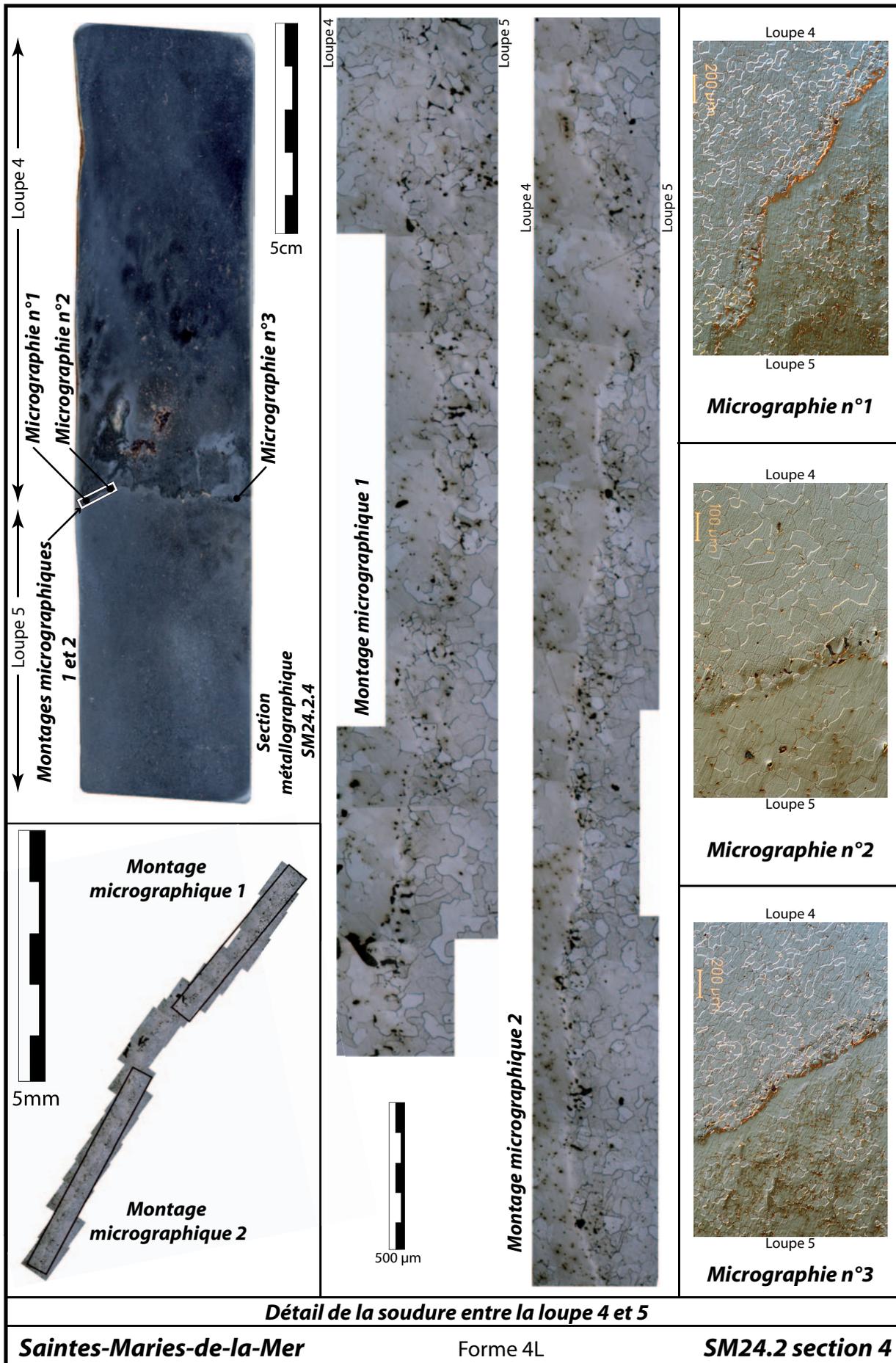


Fig. 224 : détail de la soudure entre les loupes n°4 et n°5 du demi-produit SM24.2 : un exemple de soudure inter-loupe.

Types morphologiques	Synthèse des analyses métallographiques			Classement typo-métallographique		Domaines de destination fonctionnelle			
	Matériaux mis en oeuvre		Travail de mise en forme et d'épuration	Familles	Valeurs ajoutées				
	types d'alliage	nombre de loupes mises en oeuvre	propretés inclusionnaires						
3C	87 % de ferrite (0,02 % de C)	1	basse	ferritique	basse	tout ou partie d'objets ductiles	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			demi-produit ferritique de qualité	
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	tout ou partie d'objets résistants et durs	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		demi-produit aciéré de qualité		
4L	83% en alliage phosphoreux (0,1% < P < 0,6%)	4	moyenne	phosphoreux	élevée	éléments métalliques de gros œuvre			

Fig. 225 : les demi-produits assimilés à la typologie des Saintes-Maries-de-la-Mer : synthèse métallographique, classement typo-métallographique et destinations fonctionnelles.

TYPE 1L	SM2 1 1L1	SM2 1 1L2	SM2 1 2L2	SM2 1 2L3	SM2 2 2
	%E*	%E*	%E*	%E*	%E*
MgO	2,42	3,58	1,07	0,22	2,91
Al2O3	13,20	16,32	6,93	2,94	14,26
SiO2	54,41	56,86	33,79	15,64	58,72
P2O5	0,50	0,62	1,29	1,51	0,59
S03	0,55	0,62	1,10	1,00	0,63
K2O	4,33	3,67	2,72	1,35	3,38
CaO	5,83	5,02	3,24	1,83	4,25
TiO2	0,33	0,48	0,28	0,20	0,56
MnO	0,97	0,59	2,04	1,06	1,56
FeO	17,47	12,25	47,52	74,24	13,14
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Al2O3/SiO2	0,24	0,29	0,21	0,19	0,24
K2O/CaO	0,74	0,73	0,84	0,74	0,80
MgO/Al2O3	0,18	0,22	0,15	0,08	0,20
TYPE 1L (suite)	SM10 1 1L1	SM10 1 2L1	SM10 1 2L2	SM10 1 3L2	SM10 2 1L11
%E*	%E*	%E*	%E*	%E*	%E*
Na2O	0,71	1,41	0,25	0,57	0,83
MgO	1,87	4,79	4,17	2,56	3,39
Al2O3	8,47	10,54	10,23	5,26	7,81
SiO2	40,79	49,23	48,29	27,97	39,89
P2O5	0,56	0,31	0,28	0,47	0,29
S03	0,30	0,33	0,26	0,25	0,25
Cl	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
K2O	2,90	3,08	3,24	1,53	3,36
CaO	2,30	5,48	5,21	3,63	4,31
TiO2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
V	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Cr	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
MnO	1,83	1,31	1,08	1,77	1,09
FeO	40,05	23,32	25,94	55,92	38,72
Total	100,79	100,80	99,95	100,93	100,95
Al2O3/SiO2	0,21	0,21	0,21	0,19	0,20
K2O/CaO	1,26	0,56	0,62	0,42	0,78
MgO/Al2O3	0,22	0,45	0,41	0,49	0,43
TYPE 1L (suite)	SM10 2 1L12	SM10 2 2L1	SM10 2 2L2	SM10 2 3L2	SM10 2 3L2
%E*	%E*	%E*	%E*	%E*	%E*
Na2O	0,39	0,27	0,80	1,14	1,14
MgO	1,00	0,84	2,03	4,05	4,05
Al2O3	4,45	3,76	7,49	9,75	9,75
SiO2	21,52	20,45	35,90	48,89	48,89
P2O5	0,30	0,26	0,25	0,32	0,32
S03	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Cl	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
K2O	1,42	1,47	2,14	3,17	3,17
CaO	2,08	2,29	2,41	3,66	3,66
TiO2	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
V	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Cr	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
MnO	0,70	0,97	1,29	1,15	1,15
FeO	67,99	69,46	47,32	27,40	27,40
Total	101,10	101,00	100,89	100,78	100,78
Al2O3/SiO2	0,21	0,18	0,21	0,20	0,20
K2O/CaO	0,68	0,64	0,89	0,87	0,87
MgO/Al2O3	0,23	0,22	0,27	0,42	0,42

Fig. 226 : moyenne pondérée des composés chimiques majeurs présents dans les inclusions de chaque section analytique des demi-produits du type 1L.

TYPE 1M	SM9 6	SM9 8	SM9 9	SM 9 10
	%E*	%E*	%E*	%E*
<i>Na2O</i>	0,69	0,25	0,30	1,24
<i>MgO</i>	1,81	0,26	0,29	3,58
<i>Al2O3</i>	10,58	4,84	3,38	12,30
<i>SiO2</i>	32,90	25,65	18,84	49,38
<i>P2O5</i>	0,25	0,31	0,65	0,26
<i>S03</i>	0,25	0,25	0,25	0,25
<i>Cl</i>	0,25	0,25	0,25	0,25
<i>K2O</i>	2,31	1,10	1,21	3,99
<i>CaO</i>	3,33	0,77	2,37	6,92
<i>TiO2</i>	0,25	0,26	0,25	0,28
<i>V</i>	0,25	0,25	0,25	0,25
<i>Cr</i>	0,25	0,25	0,25	0,25
<i>MnO</i>	2,14	0,50	0,35	0,72
<i>FeO</i>	45,58	65,81	71,97	21,21
<i>Total</i>	100,83	100,74	100,60	100,87
<i>Al2O3/SiO2</i>	0,32	0,19	0,18	0,25
<i>K2O/CaO</i>	0,69	1,44	0,51	0,58
<i>MgO/Al2O3</i>	0,17	0,05	0,08	0,29

Fig. 227 : moyenne pondérée des composés chimiques majeurs présents dans les micro-inclusions de chaque section analytique des demi-produits du type 1M.

TYPE 2M	SM9 1 2	SM9 2 1		
	%E*	%E*		
<i>MgO</i>	0,21	0,39		
<i>Al2O3</i>	3,55	4,14		
<i>SiO2</i>	23,17	34,39		
<i>P2O5</i>	2,21	0,81		
<i>S03</i>	0,73	0,82		
<i>K2O</i>	1,22	1,72		
<i>CaO</i>	1,86	2,61		
<i>TiO2</i>	0,28	0,31		
<i>MnO</i>	1,59	0,21		
<i>FeO</i>	65,18	54,62		
<i>Total</i>	100,00	100,00		
<i>Al2O3/SiO2</i>	0,15	0,12		
<i>K2O/CaO</i>	0,66	0,66		
<i>MgO/Al2O3</i>	0,06	0,09		
TYPE 2M (suite)	SM25 1	SM25 2	BG2 3	
	%E*	%E*	%E*	
<i>Na2O</i>	0,92	0,73	0,25	
<i>MgO</i>	1,48	0,83	0,25	
<i>Al2O3</i>	11,64	6,48	1,87	
<i>SiO2</i>	52,33	32,62	16,81	
<i>P2O5</i>	0,25	0,90	0,32	
<i>S03</i>	0,25	0,25	0,26	
<i>Cl</i>	0,25	0,25	0,25	
<i>K2O</i>	2,37	1,84	0,31	
<i>CaO</i>	4,22	2,65	0,92	
<i>TiO2</i>	0,27	0,25	0,25	
<i>V</i>	0,25	0,25	0,25	
<i>Cr</i>	0,25	0,25	0,25	
<i>MnO</i>	1,04	1,33	3,67	
<i>FeO</i>	25,20	52,18	75,46	
<i>Total</i>	100,73	100,82	101,11	
<i>Al2O3/SiO2</i>	0,22	0,20	0,11	
<i>K2O/CaO</i>	0,56	0,69	0,34	
<i>MgO/Al2O3</i>	0,13	0,13	0,13	

Fig. 228 : moyenne pondérée des composés chimiques majeurs présents dans les micro-inclusions de chaque section analytique des demi-produits du type 2M.

TYPE 4C	SM9 3 1	SM9 4 1
	%E*	%E*
<i>MgO</i>	2,11	1,43
<i>Al2O3</i>	11,62	8,11
<i>SiO2</i>	43,75	40,07
<i>P2O5</i>	0,63	1,22
<i>S03</i>	0,58	0,80
<i>K2O</i>	3,10	2,33
<i>CaO</i>	2,53	1,88
<i>TiO2</i>	0,32	0,22
<i>MnO</i>	0,45	2,21
<i>FeO</i>	34,90	41,73
<i>Total</i>	100,00	100,00
<i>Al2O3/SiO2</i>	0,27	0,20
<i>K2O/CaO</i>	1,23	1,24
<i>MgO/Al2O3</i>	0,18	0,18
TYPE 4C (suite)	SM2 5	SM9 11
	%E*	%E*
<i>Na2O</i>	1,03	1,60
<i>MgO</i>	1,73	3,49
<i>Al2O3</i>	8,91	13,34
<i>SiO2</i>	47,19	51,58
<i>P2O5</i>	0,31	0,29
<i>S03</i>	0,25	0,25
<i>Cl</i>	0,25	0,25
<i>K2O</i>	4,05	3,13
<i>CaO</i>	9,27	5,29
<i>TiO2</i>	0,25	0,25
<i>V</i>	0,25	0,25
<i>Cr</i>	0,25	0,25
<i>MnO</i>	1,53	1,20
<i>FeO</i>	25,72	19,63
<i>Total</i>	100,99	100,80
<i>Al2O3/SiO2</i>	0,19	0,26
<i>K2O/CaO</i>	0,44	0,59
<i>MgO/Al2O3</i>	0,19	0,26

Fig. 229 : moyenne pondérée des composés chimiques majeurs présents dans les micro-inclusions de chaque section analytique des demi-produits du type 4C.

TYPE 4L	SM24 1 L1	SM24 1 L3	SM24 1 L4		
	%E*	%E*	%E*		
<i>MgO</i>	0,21	0,85	0,85		
<i>Al2O3</i>	2,95	6,91	5,49		
<i>SiO2</i>	15,25	29,85	30,80		
<i>P2O5</i>	10,75	7,39	8,61		
<i>S03</i>	0,77	0,66	0,89		
<i>K2O</i>	0,76	2,20	2,07		
<i>CaO</i>	1,58	2,82	4,97		
<i>TiO2</i>	0,20	0,27	0,31		
<i>MnO</i>	0,27	0,40	1,33		
<i>FeO</i>	67,26	48,66	44,69		
<i>Total</i>	100,00	100,01	100,00		
<i>Al2O3/SiO2</i>	0,19	0,23	0,18		
<i>K2O/CaO</i>	0,48	0,78	0,42		
<i>MgO/Al2O3</i>	0,07	0,12	0,16		
TYPE 4L (suite)	SM24 2 L1	SM24 2 L2	SM24 2 L3	SM24 2 L4	SM24 2 L5
	%E*	%E*	%E*	%E*	%E*
<i>Na2O</i>	0,32	0,27	0,27	0,28	0,31
<i>MgO</i>	0,28	0,64	0,28	0,63	1,21
<i>Al2O3</i>	3,57	5,83	3,14	4,13	9,20
<i>SiO2</i>	21,10	26,61	25,93	38,18	47,73
<i>P2O5</i>	8,78	1,14	0,63	0,76	2,09
<i>S03</i>	0,25	0,25	0,25	0,27	0,42
<i>Cl</i>	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
<i>K2O</i>	1,29	1,63	1,29	1,65	2,05
<i>CaO</i>	2,85	3,04	2,00	1,71	2,03
<i>TiO2</i>	0,25	0,25	0,25	0,25	0,39
<i>V</i>	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
<i>Cr</i>	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
<i>MnO</i>	0,59	0,25	2,33	3,30	2,16
<i>FeO</i>	60,87	60,18	63,64	49,03	32,53
<i>Total</i>	100,90	100,83	100,77	100,93	100,86
<i>Al2O3/SiO2</i>	0,17	0,22	0,12	0,11	0,19
<i>K2O/CaO</i>	0,45	0,54	0,65	0,96	1,01
<i>MgO/Al2O3</i>	0,08	0,11	0,09	0,15	0,13

Fig. 230 : moyenne pondérée des composés chimiques majeurs présents dans les micro-inclusions de chaque section analytique des demi-produits du type 4L.

TYPE 5C	SM6 2
	%E*
<i>Na2O</i>	0,54
<i>MgO</i>	0,45
<i>Al2O3</i>	4,75
<i>SiO2</i>	31,14
<i>P2O5</i>	0,25
<i>S03</i>	0,25
<i>Cl</i>	0,25
<i>K2O</i>	2,02
<i>CaO</i>	3,39
<i>TiO2</i>	0,25
<i>V</i>	0,25
<i>Cr</i>	0,25
<i>MnO</i>	3,40
<i>FeO</i>	53,81
<i>Total</i>	101,00
<i>Al2O3/SiO2</i>	0,15
<i>K2O/CaO</i>	0,60
<i>MgO/Al2O3</i>	0,10

Fig. 231 : moyenne pondérée des composés chimiques majeurs présents dans les micro-inclusions de chaque section analytique des demi-produits du type 5C.

TYPE 6C	SM6 1
	%E*
<i>MgO</i>	1,19
<i>Al2O3</i>	5,50
<i>SiO2</i>	29,67
<i>P2O5</i>	0,58
<i>S03</i>	0,67
<i>K2O</i>	1,74
<i>CaO</i>	4,80
<i>TiO2</i>	0,20
<i>MnO</i>	2,63
<i>FeO</i>	53,02
<i>Total</i>	100,00
<i>Al2O3/SiO2</i>	0,19
<i>K2O/CaO</i>	0,36
<i>MgO/Al2O3</i>	0,22

Fig. 232 : moyenne pondérée des composés chimiques majeurs présents dans les micro-inclusions de chaque section analytique des demi-produits du type 6C.

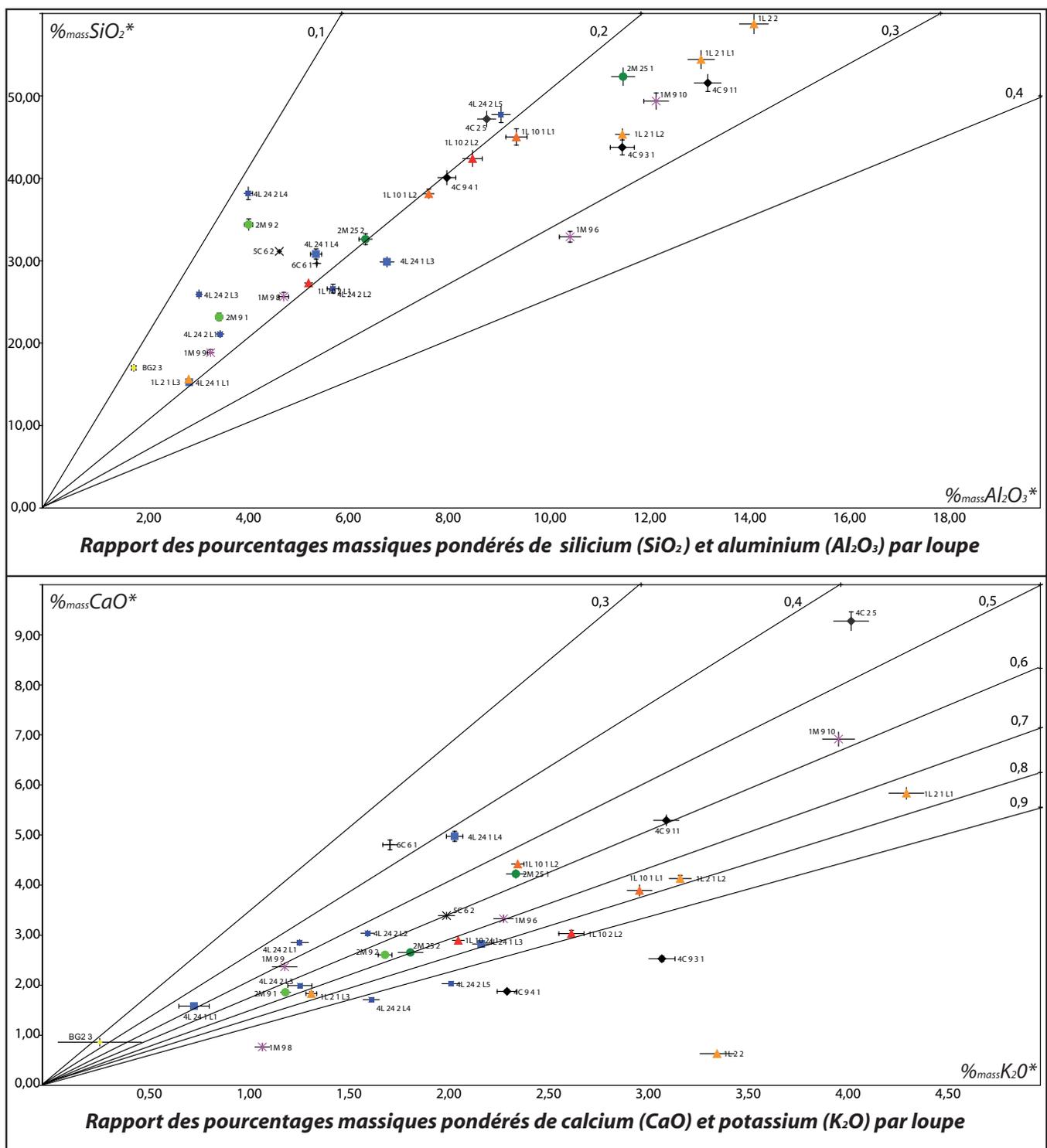


Fig. 233 : rapports des composés chimiques majeurs constituant les micro-inclusions non prises en compte pour différencier les groupes de loupes.

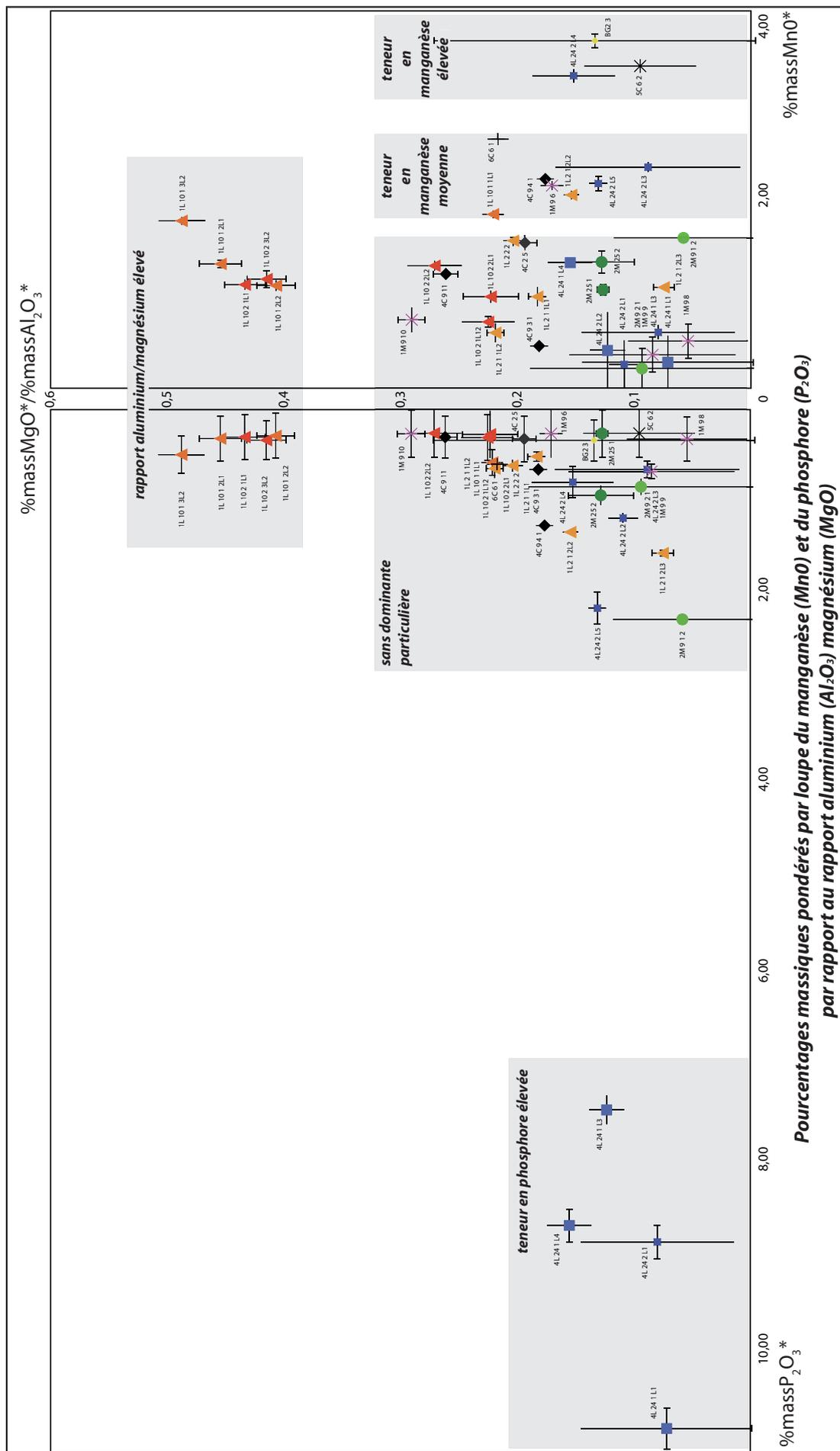


Fig. 234 : rapports et teneurs des composés chimiques majeurs constituant les micro-inclusions prises en compte pour différencier les groupes de loupes.

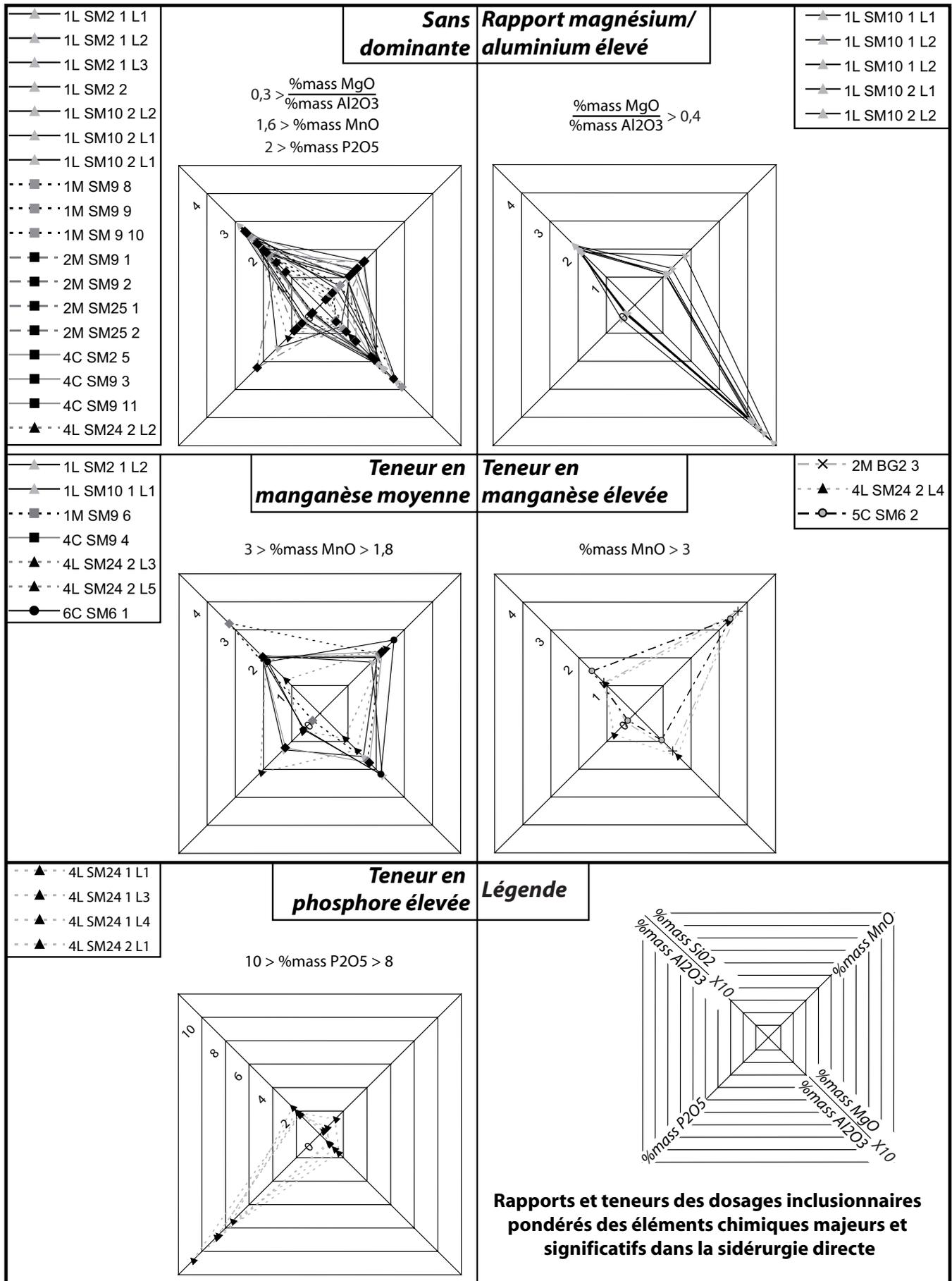


Fig. 235 : résumé des principales caractéristiques chimiques de chaque demi-produit par groupes de loupes discriminés.

Mesures LA-ICP-MS d'après Coustures et al. 2006, p. 254																									
Demi-produits des Saintes-Maries-de-la-Mer	Na2O	MgO	Al2O3	SiO2	P2O5	K2O	CaO	TiO2	Cr2O3	MnO	FeO	NiO	CuO	BaO	Total	origine attribuée à partir des éléments mineurs	Type	Al2O3/SiO2	K2O/CaO	MgO/Al2O3	MnO	P2O5	correspondances avec les groupes chimiques discriminés dans notre analyse à partir des éléments majeurs		
SM2-61-2	0,56	0,64	5,80	34,04	0,67	3,10	7,36	0,02	0,00	1,57	46,21	0,00	0,01	0,07	100,04	Martys	4C	0,16	0,40	0,16	2,34	0,52			groupes chimiques discriminés dans notre analyse à partir des éléments majeurs
SM2-61-1	0,49	1,23	5,65	36,55	0,37	2,71	7,25	0,17	0,03	3,10	41,92	0,03	0,00	0,13	99,66										
SM9-98-50-82-1	0,66	0,60	5,25	35,33	0,56	2,00	8,91	0,01	0,00	4,51	42,30	0,00	0,07	0,00	100,21										
SM9-98-50-82-3	0,56	1,56	5,88	34,39	0,71	1,86	8,42	0,15	0,05	11,16	35,42	0,00	0,01	0,01	100,19	?	4C	0,17	0,26	0,21	9,62	0,38			groupe "teneur MnO élevée"
SM9-98-50-82-4	0,74	1,51	6,01	35,86	0,25	2,33	8,33	0,15	0,01	9,67	35,05	0,00	0,08	0,00	100,00										
SM9-98-50-82-5	1,07	2,08	9,55	53,20	0,00	3,92	12,35	0,29	0,00	13,13	4,22	0,05	0,00	0,07	99,94										
SM10-98-8-2	0,41	1,42	5,43	31,68	0,60	1,75	2,60	0,06	0,00	1,50	53,96	0,00	0,00	0,00	99,43	Martys	1L	0,19	0,75	0,26	0,99	0,32			groupe "sans dominante"
SM10-98-8-4	0,92	3,14	11,89	58,44	0,03	4,34	5,21	0,41	0,07	0,48	14,04	0,01	0,09	0,00	99,08										
SM9-99-248-3	0,15	0,28	3,47	30,27	0,61	0,98	2,86	0,14	0,00	1,43	59,91	0,05	0,00	0,03	100,18										
SM9-99-248-2	0,16	0,29	2,90	29,53	0,79	1,10	2,97	0,18	0,03	1,46	60,71	0,01	0,04	0,00	100,18	? Martys ?	2M	0,13	0,40	0,07	1,26	0,82			groupe "sans dominante"
SM9-99-248-1	0,25	0,14	4,54	24,95	1,05	1,95	3,95	0,41	0,00	0,89	61,92	0,00	0,00	0,00	100,05										
SM9-55-4	0,01	1,69	1,91	29,51	0,05	0,28	2,93	0,10	0,05	3,52	60,35	0,00	0,12	0,00	100,53										
SM9-55-3	0,45	0,00	16,21	35,05	1,90	5,86	14,20	0,27	0,00	0,75	24,27	0,00	0,00	0,00	98,99	?	4C	0,26	0,25	0,44	2,14	0,98			groupe "rapport MgO/Al2O3 élevé"

Fig. 236 : les résultats des analyses chimiques micro-inclusionnaires pratiquées par Marie-Pierre Coustures sur cinq demi-produits des Saintes-Maries-de-la-Mer (13) et leurs correspondances avec les groupes de loupes discriminés.

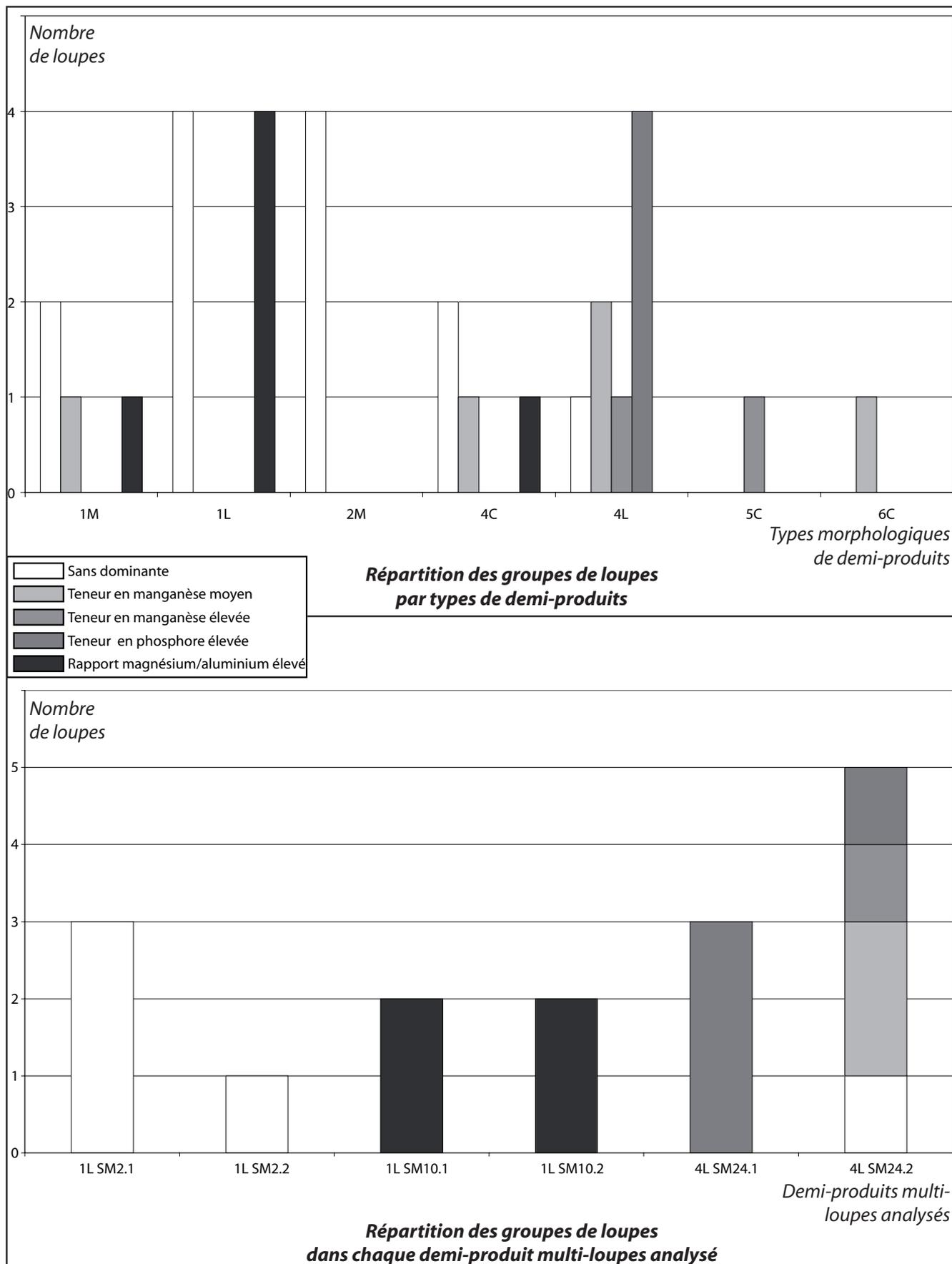


Fig. 237 : distribution des groupes de loupes par types de demi-produits et dans chaque demi-produit multi-loupe.

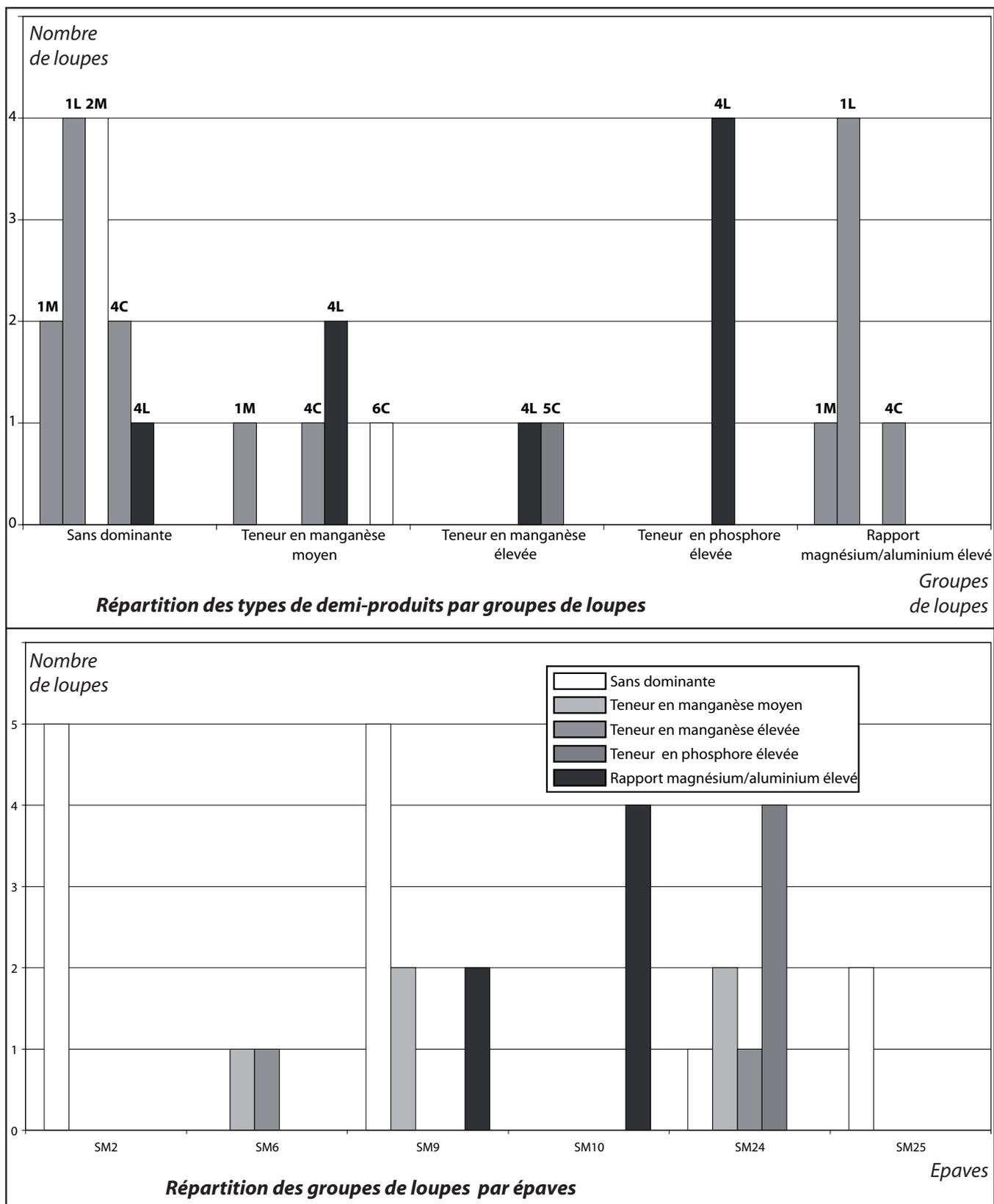


Fig. 238 : distribution des types de demi-produits par groupes de loupes et des groupes de loupes par épaves.

2. DES DEMI-PRODUITS EN COURS DE FAÇONNAGE ET D'UTILISATION

Demi-produits en contexte d'utilisation du Haut-Empire																			
n°	Contexte		Morphologie					Métallographie (micrographie et macrographie) : estimations											
	site	datation	état	(mm)		m (g)	V (cm ³)	correspondance typologique	masses de référence		qualité des soudures	propreté inclusionnaire		alliages (% de la surface)					
				L	I	e			nature	nbr		en %	AFNOR NFA 04-106*	>0,02	0,2<0,3	0,3<0,6	0,6<0,8	pondère	phosphore (0,1%<P<0,6%)
9799.1	Ambrussum	25-50	en cours d'épuration	114	33	17	400	64	loupe	1		1,9	2*	75	10	15		0,17	0
9797.2		50-75	débité	75	40	10	170	30	feuilles	6	+++	0,5	1*	80		20		0,12	0
2045.14	Lumel-Viel	~150	débité	30	17	11	30	6	feuilles	7	+++	0,4	1*	95	5			0,03	0
2045.8				180	28	28	740	141	2M	loupe	1		2,8	3*	99		1		0,02
1230.1	Auribelle-Basse	100-150	intact	62	35	20	240	43	feuilles	4	+++	0,8	1*	2	45	50	3	0,41	0

Fig. 239 : dimensions, structure et correspondance typologique des demi-produits du Haut-Empire découverts en contexte de forge : données métriques.

Demi-produits en contexte d'utilisation de l'Antiquité tardive																		
Contexte		Morphologie						Métallographie (micrographie et macrographie) : estimations										
n°	site	datation	état	(mm)		m (g)	V (cm3)	corres-pondance typologique	masses de référence	propriété inclusionnaire		alliages (% de la surface)						
				L	I e					en %	AFNOR NFA 04-106*	>0,02	0,02<0,3	0,3<0,6	0,6<0,8	phosphore (0,1%<P<0,6%)		
3291.2	La Madeleine II	~350-450	en cours d'épuration	68	55	30	190	112	loupe	1	5,4	5*	20	40	40	40	0,52	0
1176.1	Roc de Pampelune	475-575	en cours d'épuration	75	52	27	190	105			6,1	6*		60	40	0,62	0	
2505.1			intact	43	36	11	110	17		loupe	1	1,1	1*	30	35	0,46	0	
2194.1			débité	40	37	19	100	28				3,1	3*	50	50	0,41	0	
2535.1			intact	157	26	15	340	61				0,7	1*	2	3	5	90	0,75

Fig. 240 : dimensions, structure et correspondance typologique des demi-produits de l'Antiquité tardive découverts en contexte de forge : données métriques.

Roc de Pampelune	1176.1	2194.1	2535.1	2505.1
	%E*	%E*	%E*	%E*
<i>Na2O</i>	0,58	0,80	0,60	0,27
<i>MgO</i>	0,52	3,60	6,86	1,25
<i>Al2O3</i>	8,05	4,02	13,61	4,85
<i>SiO2</i>	37,07	50,58	34,87	19,86
<i>P2O5</i>	1,94	1,31	0,25	0,84
<i>S03</i>	0,25	0,54	0,25	0,25
<i>Cl</i>	0,25	0,25	0,25	0,25
<i>K2O</i>	3,99	0,85	1,73	1,50
<i>CaO</i>	19,16	23,43	14,50	10,23
<i>TiO2</i>	0,25	0,25	0,25	0,34
<i>V</i>	0,25	0,25	0,25	0,25
<i>Cr</i>	0,25	0,25	0,25	0,25
<i>MnO</i>	0,25	0,25	0,25	0,25
<i>FeO</i>	28,16	14,56	27,04	60,86
<i>Total</i>	100,97	100,93	100,95	101,26
<i>Al2O3/SiO2</i>	0,22	0,08	0,39	0,24
<i>K2O/CaO</i>	0,21	0,04	0,12	0,15
<i>MgO/Al2O3</i>	0,06	0,90	0,50	0,26

Fig. 241 : moyenne pondérée des composés chimiques majeurs présents dans les micro-inclusions des demi-produits analysés du Roc de Pampelune (Argelliers, 34).

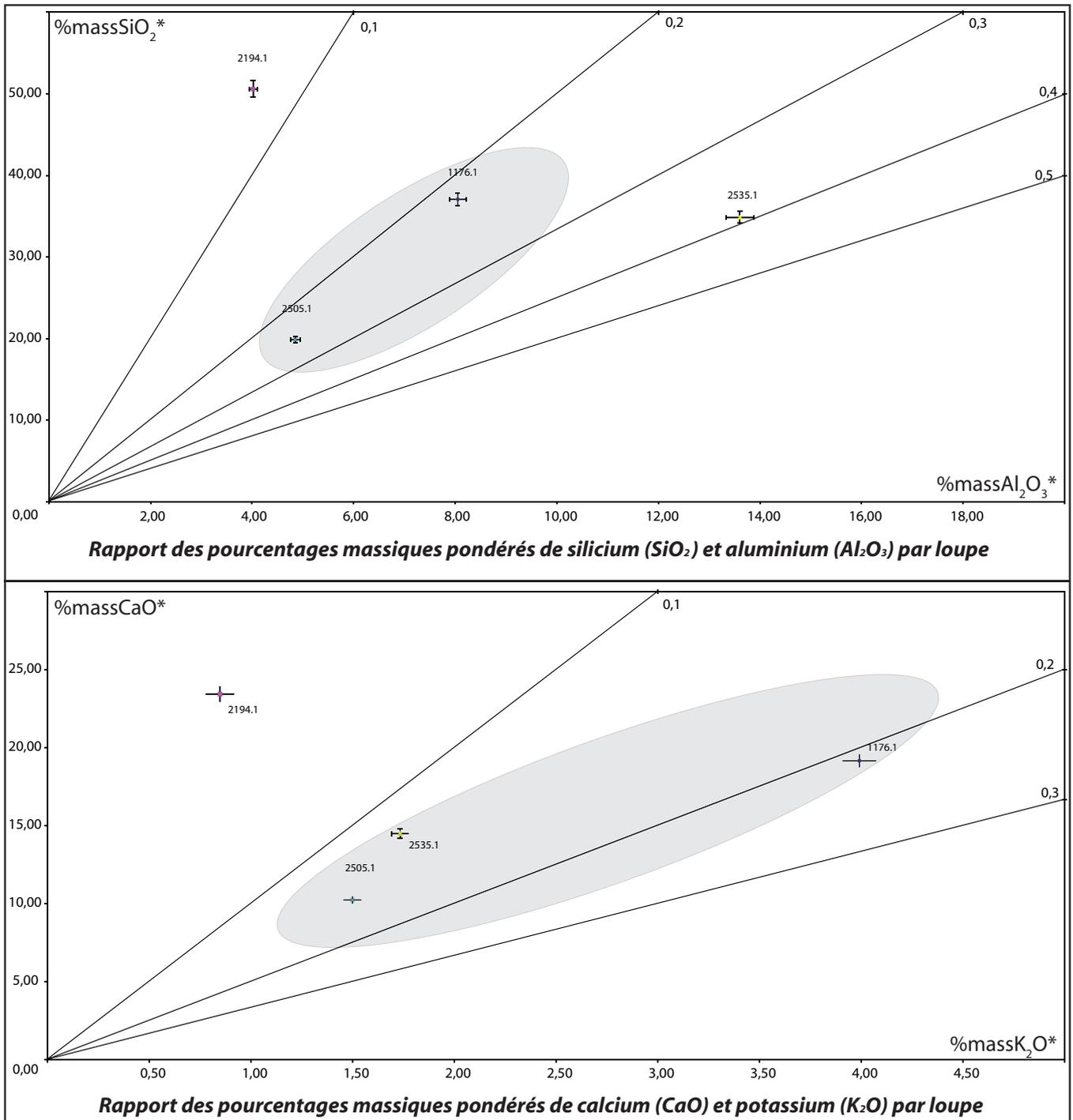


Fig. 242/1 : rapports des composés chimiques majeurs constituant les micro-inclusions des demi-produits du Roc de Pampelune (Argelliers, 34) prises en compte pour différencier les groupes de loupes.

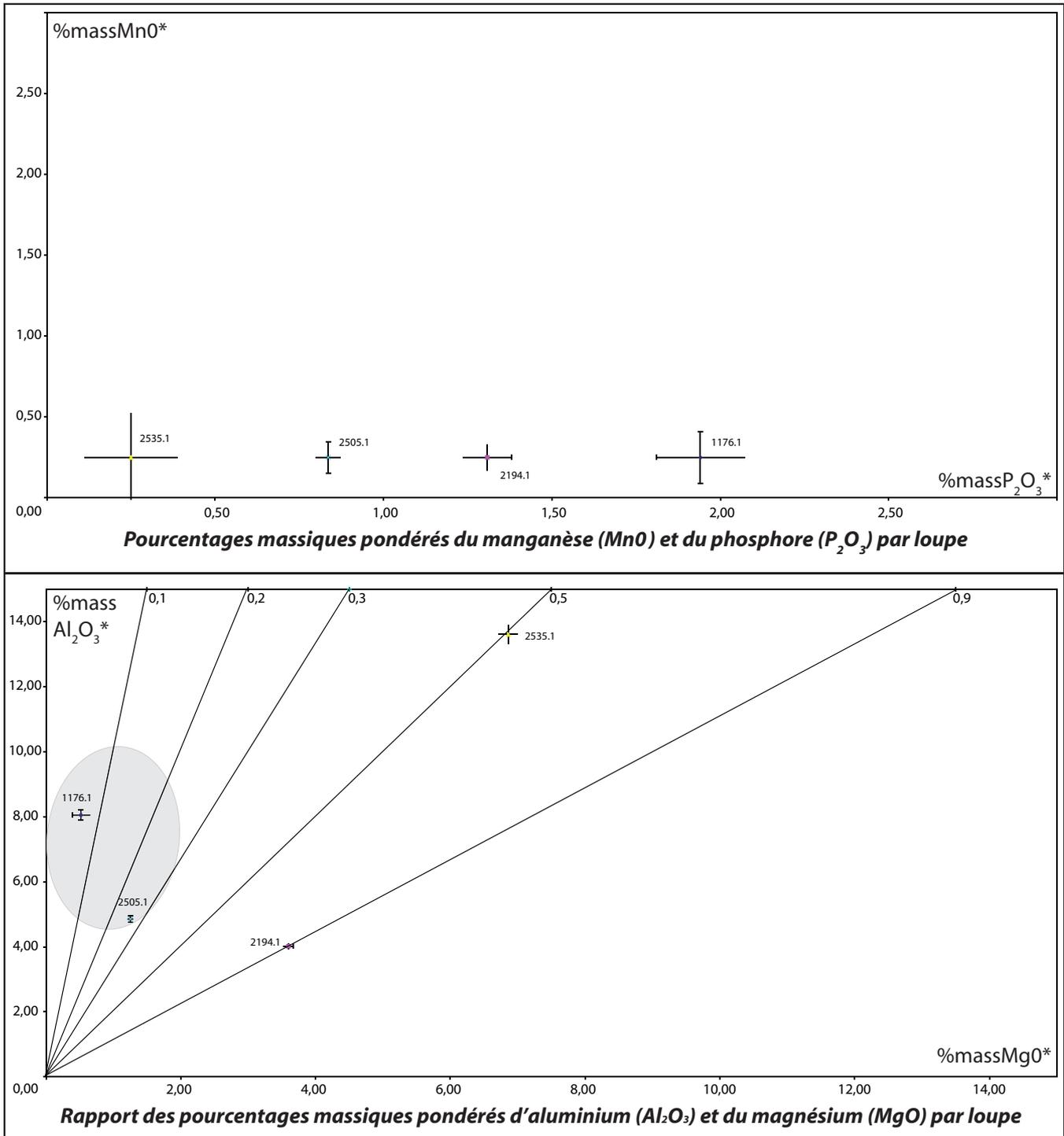


Fig. 242/2 : rapport et teneur des composés chimiques majeurs constituant les micro-inclusions des demi-produits du Roc de Pampelune (Argelliers, 34) prises en compte pour différencier les groupes de loupes.

Demi-produits des forges du Haut-Empire								
Types ou morphologies	Exemples	Synthèse des analyses métallographiques			Classement typo-métallographique		Domaines de destination fonctionnelle	
		Matériaux mis en oeuvre		Travail de mise en forme et d'épuration	Familles	Valeurs ajoutées		
		types d'alliage	masses mises en oeuvre	proprietés inclusionnaires				
2M des Saintes-Maries	Lunel-Viel (2045.8)	95 % à 100 % de ferrite (0,02% de C)	1 loupe	moyenne	ferritique	basse	tout ou partie d'objets ductiles	demi-produit ferritique "de base"
forme de circonstance en contexte de forge	Lunel-Viel (2045.14)		7 feuilles	très élevée				demi-produit ferritique de qualité
forme de circonstance en contexte de forge	<i>Ambrussum</i> (9799.1)	20 à 30 % d'acier à	1 loupe	élevée	hétérogène	élevée	tout venant hétérogène	
	<i>Ambrussum</i> (9797.2)	0,1-0,2% de C pondéré	6 feuilles	très élevée				demi-produit pour pansement de bandage de roue
forme façonnée pour une possible redistribution	Auribelle-Basse (1230.1)	95 à 100 % d'acier à 0,4-0,5 % de C pondéré	4 feuilles	très élevée	aciérée	très élevée	tout ou partie d'objets résistants et durs	demi-produit aciéré de très grande qualité

Fig. 243 : les demi-produits du Haut-Empire découverts en contexte de forge : synthèse métallographique, classement typo-métallographique et destinations fonctionnelles.

Demi-produits des forges de l'Antiquité tardive								
Types ou morphologies	Exemples	Synthèse des analyses métallographiques			Classement typo-métallographique		Domaines de destination fonctionnelle	
		Matériaux mis en oeuvre		Travail de mise en forme et d'épuration	Familles	Valeurs ajoutées		
		types d'alliage	masses mises en oeuvre	proprietés inclusionnaires				
"gabarit court" du Roc de Pampelune	Roc de Pampelune (2194.1 et 2505.1)	50 à 70 % d'acier à 0,4-0,5 % de C pondéré	1 loupe	élevée	aciérée composite	élevée	tout ou partie d'objets résistants et durs	demi-produit aciéré de qualité
fragment de loupe en transit	La Madeleine II (3291.2) et Roc de Pampelune (1176.1)	80 à 100 % d'acier à 0,5-0,7 % de C pondéré	1 loupe	très basse	aciérée	très basse		demi-produit aciéré brut
"gabarit long" du Roc de Pampelune	Roc de Pampelune (2535.1)	95 à 100 % d'acier à 0,7-0,8 % de C pondéré	1 loupe	très élevée		très élevée		demi-produit aciéré de très grande qualité

Fig. 244 : les demi-produits de l'Antiquité tardive découverts en contexte de forge : synthèse métallographique, classement typo-métallographique et destinations fonctionnelles.

RÉSUMÉ :

Cette thèse de doctorat en archéologie propose un panorama sur la métallurgie du fer en France méditerranéenne de l'Antiquité au début du Moyen Âge. Pour se faire, elle se fonde sur une démarche archéologique dans laquelle est assimilée une approche archéométrique spécialement adaptée à l'analyse de la sidérurgie ancienne : la métallographie et la pétrographie.

Des inventaires bibliographiques précis sont dressés pour envisager le problème dans son ensemble et faire état des connaissances acquises par le passé, mais cette thèse s'ancre principalement sur les études inédites et détaillées de douze contextes métallurgiques dits témoins et significatifs de problématiques propres. Ces derniers sont documentés par l'ensemble des données archéologiques et, spécialement, sur la base d'une description rigoureuse des aménagements, du tri de près de vingt-huit mille pièces métallurgiques – objets et scories – et de l'analyse archéométrique de cent soixante-neuf d'entre elles.

Cette thèse est structurée autour des trois grandes activités qui se dégagent de la chaîne opératoire de la métallurgie du fer directe : la production du matériau fer – la réduction directe du minerai –, la fabrication des objets – leur forgeage – et le commerce du matériau fer sous une forme semi-finie – la circulation des demi-produits. Ainsi, à travers l'évolution de ces trois types d'activités économiques, il est possible de mettre en évidence les choix et les comportements qui ont été adoptés pour un même exercice des cadres antiques à l'orée de la réforme carolingienne pour, au final, contribuer à une meilleure connaissance de la société de l'époque romaine au début du Moyen Âge en Gaule du Sud.

MOTS-CLÉS :

Métallurgie directe du fer, Gaule du Sud, Antiquité romaine, Antiquité tardive, archéologie, archéométrie, artisanat, économie.

ABSTRACT:

Iron metallurgy in Mediterranean France from Roman Antiquity to the beginning of the Middle Ages: interdisciplinary approach landmarks

This PhD work in archaeology proposes a panorama on the iron metallurgy in Mediterranean France from Roman Antiquity to the beginning of the Middle Ages. It is based on an archaeological step assimilating an archaeometric approach especially adapted to the analysis of the ancient iron artefacts: metallography and petrography.

Precise bibliographical inventories are drawn up to globally consider the problem and to make a state of the art of knowledge acquired in the past, moreover the present work is mainly anchored on the new and detailed studies of twelve significant metallurgical contexts with specific topics – said, pilot archaeological site. Those are documented by the completeness of archaeological data and, especially, by a rigorous description of installations, sorting of practically 28000 metallurgical materials – objects and slags – and archaeometric analysis of 169 of them.

This thesis is structured around the three great activities which emerge from iron bloomery process: the production of the metal – the direct reduction of the ore –, the manufacture of the objects – their forging – and the trade of ferrous artefacts in a semi-finished form – the circulation of the semi-products. Thus, through the evolution of these three economic types of activity, it is possible to highlight the choices and the behaviors which were adopted for the same exercise to finally contribute to a better knowledge of the society to the Roman Antiquity at the beginning of the Middle Ages in the south of Gaul.

KEYWORDS:

Iron bloomery process, south of Gaul, roman Antiquity, late Antiquity, archaeology, archaeometry, craft industry, economy

DISCIPLINE :

Section 21 du conseil national des universités : Histoire, civilisation, archéologie et art des mondes anciens et médiévaux.

ADRESSE DU LABORATOIRE D'ACCUEIL :

Laboratoire «Archéologie des sociétés méditerranéennes» U.M.R. 5140

Centre de Documentation Archéologique Régional

390, av. de Pérols, 34 970 Lattes

Tel : 04.67.15.61.25 ; Fax : 04.67.22.55.15 ; <http://www.archeo-lattes.cnrs.fr/>