HAL
open science

Questions posées sur le travail et le commerce de l'acier dans les camps romains de Strebersdorf en Pannonie (Burgenland, Autriche). Étude interdisciplinaire des scories et des demi-produits

Gaspard Pagès, Philippe Dillmann, Enrique Vega, Eddy A Foy

To cite this version:

Gaspard Pagès, Philippe Dillmann, Enrique Vega, Eddy A Foy. Questions posées sur le travail et le commerce de l'acier dans les camps romains de Strebersdorf en Pannonie (Burgenland, Autriche). Étude interdisciplinaire des scories et des demi-produits. in Seldmayer H. (Dir), Ad metalla ! Funde des Militärplatzes Strebersdorf in den pannonischen Eisenrevieren an der Bernsteinstraße (Burgenland, Autriche), éd. Mergoil (Monographies Instrumentum, n°69), p. 104-120, 199-210., 2020. halshs-02988157

HAL Id: halshs-02988157

https://shs.hal.science/halshs-02988157v1

Submitted on 20 Nov 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MI

69 MONOGRAPHIES INSTRUMENTUM

AD METALLA !

Zum Militärplatz Strebersdorf in den pannonischen Eisenrevieren an der Bernsteinstraße

■ Helga Sedlmayer
mit Beiträgen von Stefan Groh, Gaspard Pagès, Philippe Dillmann, Enrique Vega und Eddy Foy

éditions Mergoil

C.9 QUESTIONS POSÉES SUR LE TRAVAIL ET LE COMMERCE DE L'ACIER DANS LES CAMPS ROMAINS DE STREBERSDORF EN PANNONIE (BURGENLAND, AUTRICHE). ÉTUDE INTERDISCIPLINAIRE DES SCORIES ET DES DEMI-PRODUITS

Gaspard Pagès, Philippe Dillmann, Enrique Vega et Eddy Foy

3 camps romains se sont succédé à Strebersdorf entre 10/20 et 50 après J.-C. Le camp I de troupes mixtes est le plus grand (145×150 m, 2,17 ha), tandis que le camp II d'auxiliaires est plus petit (105×150 m, 1,57 ha). Un 3e camp encore plus petit (75×90 m, 0,67 ha) semble avoir fonctionné ensuite dans le courant du Ier s. après J.-C. (Pl. 51). Tous se superposent et sont installés à l'est de la voie nord-sud dite de l'ambre qui relit *Savaria*/Szombathely à *Scarabantia*/Sopron. Des fourneaux en rapport avec le début de l'occupation des camps ont aussi été identifiés directement à l'est et au sud de ces derniers. En plus, entre la voie et les camps se développe entre la fin du Ier s. et le IVème s. une agglomération de bord de route dans laquelle de petits fours ont aussi été identifiés.

Dans ces contextes, 1499 éléments métallurgiques[675] ont été découverts. Pratiquement uniquement associés à l'occupation des camps, ils sont essentiellement composés de déchets de réduction directe du minerai en bas fourneau (790 scories coulées pesant plus de 61 kg) et de petits fragments de fer pratiquement brut (523 gromps pesant plus de 15 kg). Or, ce métal est évidemment un matériau stratégique pour les armées romaines. La question de son travail à Strebersdorf et de son approvisionnement sous la forme de matière première ou d'objets finis est donc une question de premier ordre d'autant que les camps sont sur la route de l'ambre, sur une voie de communication majeure entre les mondes romain et barbare.

La découverte de ce corpus métallurgique plutôt atypique dans ce contexte militaire pose par conséquent plusieurs questions que cette contribution vise à éclairer : quelles sont la ou les activités métallurgiques réalisées dans les camps romains et quelle est leur ampleur ? Comment expliquer la présence d'autant de fer brut sur le site ? Ont-ils une filiation avec la ou les activités métallurgiques exécutées *in situ* ? À partir des réponses apportées à ces questions sur la base d'une approche interdisciplinaire, nous proposerons une réflexion sur le rapport entre occupation militaire romaine limitrophe et production et commerce de l'acier.

675 Les éléments métallurgiques sont des éléments métalliques qui ont la spécificité d'être associés aux chaînes opératoires métallurgiques. On les distingue de l'*intrumentum*, ces objets métalliques utilisés dans la vie quotidienne et productive des occupations humaines en tant qu'objets finis sans lien avec une activité artisanale ou industrielle.

C.9.1 Méthodologie

Toutes les investigations menées sur ces camps ont été réalisées par prospections géophysiques (géomagnétiques et partiellement par géoradar) et par prospections pédestres (couplées à l'utilisation systématique de détecteurs de métaux). Le mobilier archéologique de surface a été prélevé et localisé précisément par GPS différentiel. Un sondage a également été effectué[676] dans les fossés des camps les plus anciens (camps I-II). Toutes ces opérations ont permis de recueillir 91773 g d'éléments métallurgiques (1499 pièces) et 18340 g de minerai de fer (170 fragments).

L'étude de ces vestiges métallurgiques se fonde sur une approche et un protocole interdisciplinaire. Au préalable, toutes les pièces ont été mesurées, pesées et identifiées d'un point de vue typologique. Au sujet de la typologie des déchets métallurgiques, le lecteur pourra se tourner vers des ouvrages de référence[677], bien que leur morphologie et leur formation sont aussi décrites dans le texte qui suit.

À la suite de cette première étape, des prélèvements ont été conduits pour fournir des échantillons représentatifs des différents types de mobilier adaptés aux différentes analyses archéométriques menées en fonction des questions posées. Ainsi, 5 éléments métalliques, 21 scories coulées denses, 1 paroi de four et 6 minerais ont été prélevés.

Les 5 échantillons métalliques ont été analysés en métallographie. Il s'agit d'une observation optique d'une section plane polie à la granulométrie de 1 µm destinée à caractériser la structure des métaux. La section polie de ces mêmes échantillons a ensuite été analysée par Spectroscopie à Dispersion d'Énergie couplée à un Microscope Électronique à Balayage (MEB-EDS[678]). Cette méthode a été utilisée pour mesurer la composition en éléments majeurs des inclusions de scories piégées dans le fer avant les analyses LA-ICP-MS (Spectrométrie de Masse à Plasma à Couplage Inductif couplé à un Laser). Ces dernières permettent de connaître la composition en élément traces et mineurs des inclusions de scorie piégées dans le métal[679].

Parallèlement, les 21 scories coulées denses, la paroi de four et les 6 minerais ont été analysés par fluorescence X portable (pXRF) afin de doser leur composition en

676 Groh 2009a.

677 Mangin 2004.

678 Système d'acquisition Aztec de la société Oxford couplé au SEM-FEG JEOL 7001-F. Tension d'accélération : 15 kV, courant de sonde : 6 nA.

679 Analyse des éléments traces par Spectrométrie de masse à plasma avec prélèvement par ablation laser excimer (193 nm) (LA-ICP-MS, IRAMAT - Centre Ernest-Babelon, Orléans, France).

Type		Nombre	Masse (g)
Construction metallurgique	paroi rubéfiée	31	965
	paroi scorifiée	29	4090
	roche rubéfiée	29	4970
	tuyere	2	86
	sous-total	91	10111
Dechets	culot de forge	5	1226
	gromps	523	15129
	masse brute en cours de compactage	2	412
	scorie coulée avec empreintes de charbons	133	6329
	scorie coulée dense	414	49839
	scorie ind	59	1242
	scorie coulée argilo-sableuse	83	3980
	scorie coulée dense en cordon	160	1294
	sous-total	1379	79451
Objet	barre	11	1110
	chute	6	445
	plaque	2	299
	tige	10	357
	sous-total	29	2211
Minerai fer		170	18340
Total général		1669	110113

Tab. 9 : Comptage général en fréquence et masse des éléments métallurgiques de Strebersdorf

élément majeur. L'appareil utilisé ici[680] permet de quantifier les éléments de masse atomique supérieure au magnésium. Cette technique d'analyse a l'avantage d'être très accessible. Les analyses ICP-MS (Spectrométrie de Masse à Plasma à Couplage Inductif) et l'ICP-EOS (Spectrométrie à Émission Optique couplée à Plasma à Couplage Inductif) ont été employées pour connaître la composition en éléments majeurs et traces de 1 échantillon de minerai et de 19 échantillons de scories coulées préalablement réduits en poudre[681]. Enfin, la Diffraction des Rayons X (DRX) a été utilisée sur 5 minerais pour préciser les types de composés porteurs du fer.

Toutes ces analyses ont été réalisées au LAPA (IRAMAT/NIMBE UMR5060/UMR3699, Saclay, France) sauf l'ICP-MS/ICP-EOS et la LA-ICP-MS lesquelles ont été effectuées respectivement au SARM-CRPG (Service d'Analyse des Roches et des Minéraux - Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques, CNRS, Nancy, France) et au Centre Ernest Babelon (IRAMAT-UMR5060, Orléans, France).

C.9.2 Données archéologiques

91773 g d'éléments métallurgiques (1499 pièces) ont été découverts sur le site des camps romains de Strebersdorf et ses alentours (Tab. 9). La grande majorité concerne des déchets et des éléments métalliques (1379 pièces pour 74451 g). Une bien plus petite proportion se rapporte à des éléments de construction de foyer ou de four qui se retrouvent dans tout l'espace étudié, avec une concentration légèrement plus marquée dans les zones des fours du sud-ouest comme de l'est (91 pièces pour 10111 g [682] ; Pl. 51). Les déchets sont majoritairement constitués de scories coulées (790 pièces pour 61442 g). Ont également été identifiés des éléments métalliques peu travaillés, correspondant à un stade intermédiaire de la chaîne opératoire avant l'obtention

680 Les mesures par fluorescence X portable ont été réalisées sur banc d'analyse (système déporté) avec un spectromètre Niton Xl3t (version GOLDD+, 50kV, 5W). Un étalonnage sur des références de scories de compositions connues a préalablement été réalisé.

681 Ici, les masses réduites en poudre sont comprises entre 11 et 38 g.

682 Les éléments seulement rubéfiés peuvent en théorie être non métallurgiques, mais ils ont été intégrés à ce comptage parce qu'aucune trace ne permet d'exclure la fonction métallurgique.

de demi-produits ou de produits finis (523 pièces pour 15129 g). Ces éléments sont des gromps (Pl. 53/7-8). Ils seront nommés ainsi dans la suite. On notera que la carte de répartition de ces gromps est quasiment superposable à celle des scories coulées (Pl. 54 et 56). Les objets métalliques semi-finis restent rares (29 pièces pour 2211 g [683]).

170 fragments de minerais de fer (18340 g) ont aussi été découverts lors des prospections (Pl. 52). 80 d'entre eux sont grillés. Tous se retrouvent principalement dans la zone des fours, à l'est des camps. Une autre zone de concentration est située entre l'angle sud-ouest des camps et la voie nord-sud de l'ambre identifiée à l'ouest des camps. En cela, la répartition des minerais reprend la distribution des gromps et des scories.

Les scories coulées sont des déchets métallurgiques qui comme leur nom l'indique sont formés par un ou des écoulements visqueux figés hors du bas fourneau lors de la réduction du minerai. Cette catégorie se répartit dans différents sous-ensembles (Tab. 9) : les scories coulées denses (414 pour 49839 g ; Pl. 53/1-2), des scories coulées avec des empreintes de charbon (133 pièces pour 6329 g ; Pl. 53/3), des scories coulées argilo-sableuses (83 pièces pour 3980 g ; Pl. 53/4) et des cordons de scories coulées (160 pièces pour 1294 g ; Pl. 53/5). Leur caractéristique commune est qu'elles sont de petite taille. Les scories coulées denses traditionnelles dépassent rarement 120 g et exceptionnellement 270 g (Fig. 36). Les scories coulées avec des empreintes de charbon et celles argilo-sableuses pèsent rarement plus de 80 g. Cette caractéristique est encore plus marquée pour les cordons qui restent systématiquement de masse inférieure à 30 g. Les scories coulées se retrouvent dans toute la zone étudiée. Cependant, une concentration plus importante se distingue dans la zone des fours à l'est des camps (Pl. 54). Cette densité est ici liée à surreprésentation de petites scories inférieures à 20 g (Pl. 55).

On compte également 5 culots de forge (1226 g), dont 4 ont été trouvés dans un sondage réalisé dans l'agglomération plus tardive établie le long de la voie de l'ambre. Ils ne seront pas considérés plus avant dans la suite de l'étude.

Les éléments constitutifs de foyer ou de fours (Pl. 51) se répartissent entre des parois scorifiées (29 pièces pour 4090 g), des roches rubéfiées (20 pièces pour 4970 g), des parois rubéfiées (31 pièces pour 965 g) et deux tuyères scorifiées (86 g). Ces tuyères ont un diamètre de petite dimension. Il est compris entre 1,6 et 1,8 cm (Pl. 53/6).

683 Les objets traditionnels en fer tels les clous, outils, ustensiles, etc. ne sont pas comptabilisés ici.

À ces déchets de la réduction s'ajoute un certain nombre d'éléments métalliques, les gromps[684], dont l'observation macroscopique suggère qu'il s'agit de fragments de masses de fer en cours de compactage et d'épuration plus ou moins enrobées de scorie (523 pièces pour 15129 g ; Pl. 53/7-8). Ils sont peu massifs (masse exceptionnellement supérieure à 60 g ; Fig. 36). Ces gromps se retrouvent dans toute la zone d'étude avec une densité plus importante dans la zone des fours, à l'est des camps, et devant les camps au sud-ouest. Ces types sont donc plus fréquents à l'extérieur des camps qu'à l'intérieur (Pl. 56-57).

Les objets métalliques issus d'une mise en forme avancée sont autant des barres aux sections et aux longueurs variables (11 pièces pour 1110 g) que des chutes de petites dimensions (6 pièces pesant 445 g), des plaques (2 entre 1,2 et 1,9 cm d'épaisseur pesant entre 43 et 256 g) ou des tiges (10 tiges de petite section ne dépassant pas 7 cm de long et pesant en totalité 357 g ; Fig. 37)[685]. Vu le nombre d'occurrences considérées, il est difficile d'analyser la répartition spatiale de ces types qui se retrouvent uniquement dans les camps et au sud-ouest de ces derniers, aux abords de la voie nord-sud de l'ambre (Pl. 58).

C.9.3 Analyses métallographiques des objets en fer

Dans le corpus métallique, 5 objets en fer ont été analysés (Pl. 59/A). Deux sont des éléments peu compactés : les gromps 11003 et 2610. Un autre est une pièce partiellement mise en forme de barre (échantillons 11505). Deux autres sont des barres entières (échantillons 8374 et M122). La barre M122 et le gromps 2610 ont été découverts dans les camps ; le gromps 11003 directement à l'est des camps ; la barre 8374 et la pièce 11505, directement au sud des camps. Du fait de leur localisation, tous sont ainsi associés au fonctionnement des camps.

Le gromps 11003 (8,9×5,9×3 cm pour 428 g) a été tronçonné longitudinalement de manière à obtenir la plus grande section possible (Pl. 60/1). Comme attendu, la section est composée d'un métal très poreux, pour une moitié complètement corrodée. Dans ces produits de corrosion se distinguent des fantômes de lamelles de cémentite, parfois non encore altérées. Les porosités dans la partie métallique sont majoritairement ouvertes et ovoïdes. Quelques-unes pourraient présenter des faciès légèrement écrasés, mais elles restent anecdotiques. L'impression générale est donc celle d'un fragment très peu travaillé. À noter qu'il n'existe ici pas d'enrobage

684 Un gromps est un fragment de masse de fer plus ou moins enrobé de scories issue d'une masse de fer brute produite par la réduction directe en bas fourneau.

685 Les tiges ont une section avec des côtés inférieurs à 2 cm alors que les barres possèdent au moins un côté supérieur à 2 cm. Les plaques ont une épaisseur supérieure à 1 cm contrairement aux tôles.

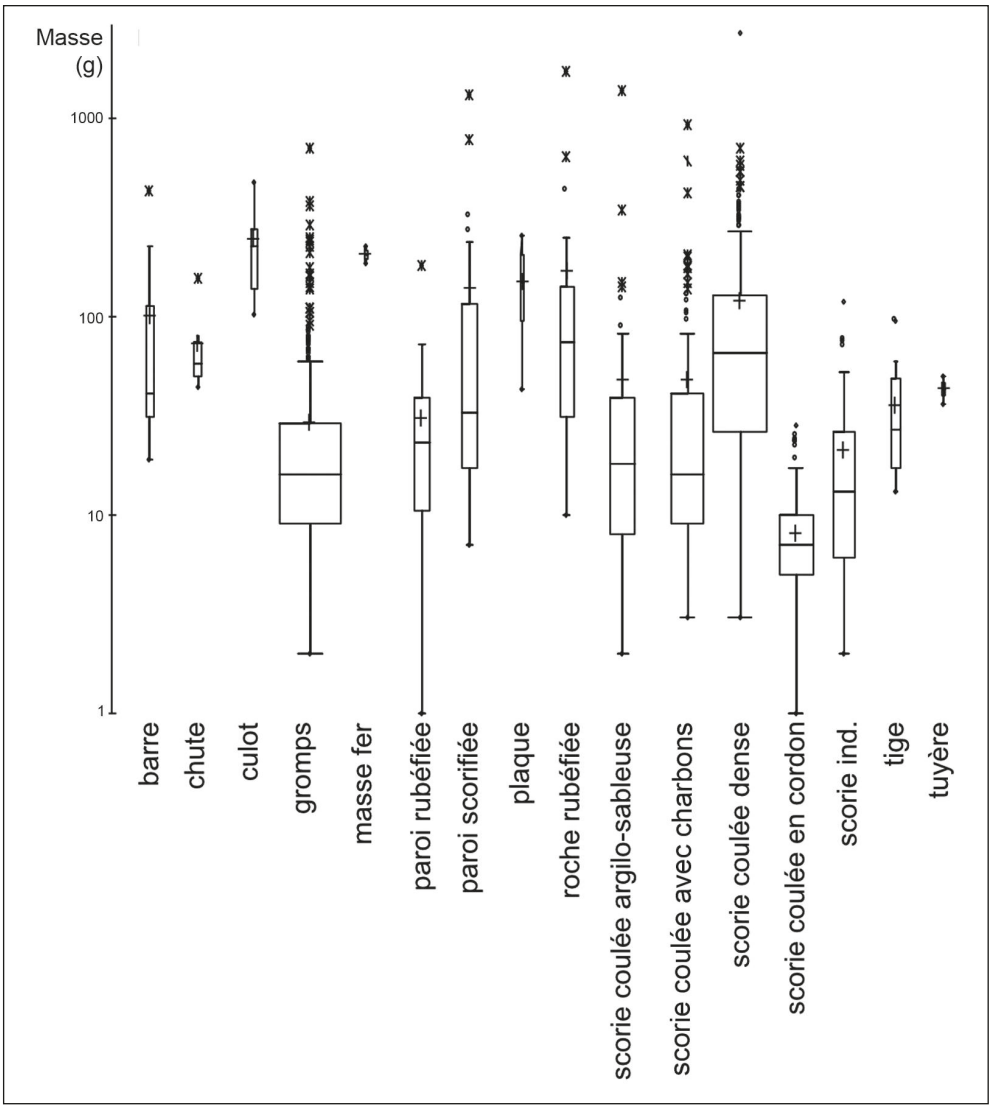


Fig. 36 : Box-plots des masses des différents déchets métallurgiques

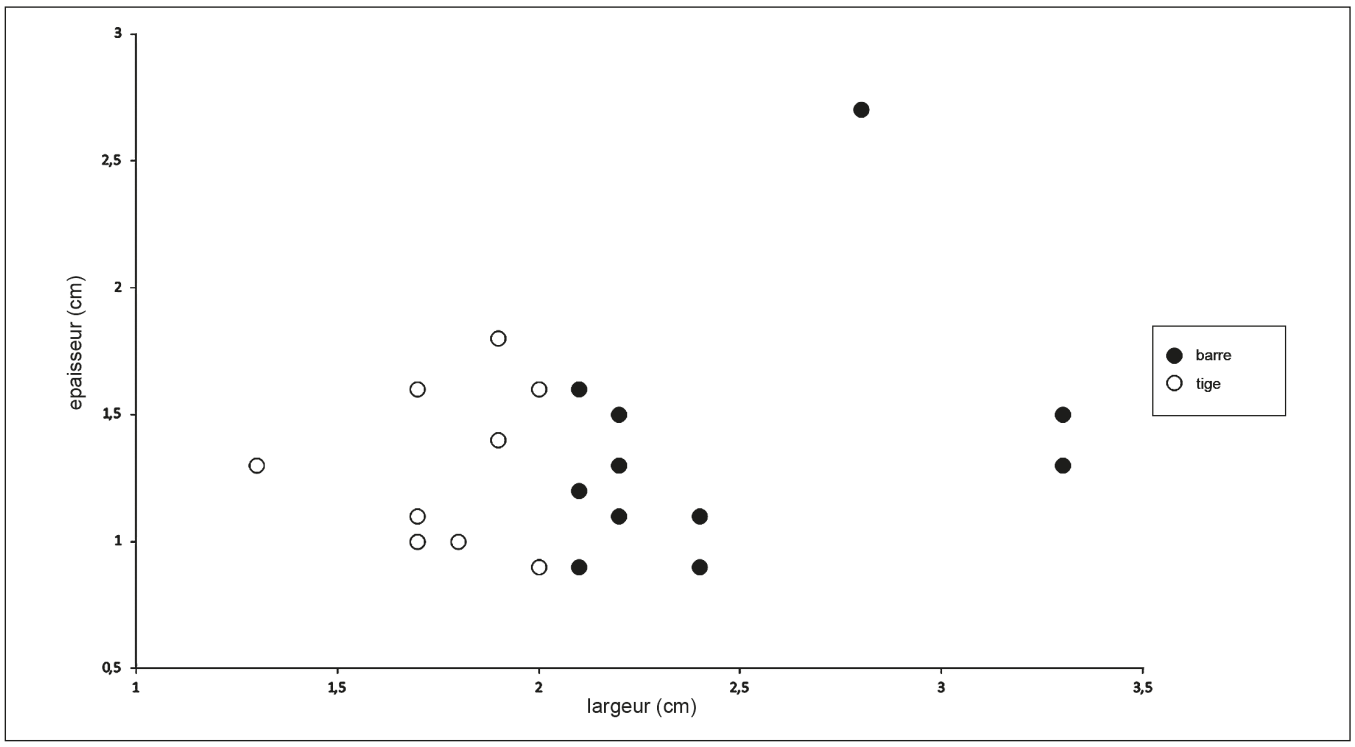


Fig. 37 : Nuage de points largeur/épaisseur et histogramme des longueurs des barres et des tiges

périphérique de scorie. L'attaque au Nital à 4 % de la section révèle une masse très majoritairement composée d'acier hypereutectoïde entre 1,2 et 1,5 % de carbone (Pl. 60/1). Très localement on observe cependant quelques zones d'acier hypoeutectoïde, voire de ferrite (%C < 0,02 %). Cette décarburation n'est pas visible dans la partie la mieux conservée. Elle semble plus liée à la nature initiale hétérogène du matériau qu'à une action métallurgique délibérée.

La masse 2610 est plutôt informe, mais présente une face plane qui pourrait être liée à une action de martelage à chaud (7,2×6,4×2,6 cm pour 228 g ; Pl. 60/2). Elle a été tronçonnée de manière à observer en coupe et dans la longueur la surface plane. La section obtenue est très poreuse avec des plages corrodées importantes. Une zone partie supérieure sur les figures possède des inclusions de scories et de porosités légèrement allongées dans l'axe longitudinal ainsi que des inclusions de charbon de bois. La zone inférieure est plus épaisse et renferme des porosités à l'inverse relativement equiaxes (Pl. 60/2). Toujours dans la zone inférieure, dans la fine extrémité formant une excroissance ovoïde (à droite), quelques replis et des porosités plus écrasées et refermées pourraient témoigner d'un martelage. L'attaque au Nital à 4 % révèle une section majoritairement en fonte blanche (2,5 à 3,5 % de carbone) avec une structure lédeburitique. En périphérie, certaines zones sont cependant légèrement moins chargées en carbone et constituées d'acier hypereutectoïde. Une petite zone bainito-martensitique est aussi identifiée dans l'extrémité formant une excroissance ovoïde (à droite). Une zone moins carburée est également présente au milieu de la section à la jonction entre les deux zones distinguées avant attaque par la forme de leurs porosités. Aspect important, la zone correspondant à la surface aplatie est uniquement constituée de fonte blanche non déformée ce qui exclut toute hypothèse de martelage. La face plane de 2160 a donc été obtenue par la coulée de la fonte blanche sur une surface plane. Cette coulée semble avoir été repliée sur elle-même. Cette configuration explique la décarburation centrale de la pièce, la différence de texture et l'épaisseur de la pièce. On peut donc poser l'hypothèse que la coulée de fonte, initialement allongée et fine, aurait donc été ensuite grossièrement travaillée pour lui donner une forme plus ramassée, mais encore largement brute.

11505 est une pièce davantage compactée et travaillée (6×4,1×3,1 cm pour 184 g ; Pl. 60/3). Elle présente au moins 5 faces aplanies par martelage à chaud. Elle a été tronçonnée de manière à observer transversalement les surfaces martelées. Le métal apparaît compact avec cependant au milieu une porosité de très grande taille aux parois corrodées. Des lignes de soudure mal réalisées dessinent dans la section un « U » refermé. La pièce semble donc constituée de plusieurs entités. Ces entités paraissent de qualité variable : certaines contiennent plus de porosités ou d'inclusions que d'autre. Leur morphologie est également différente. Une des feuilles centrales possède aussi des décohésions intergranulaires. L'attaque au Nital à 4 % de la section montre que l'objet est composé de 3 feuilles constituées d'une structure bainito-martensitiques sauf aux endroits des lignes de soudure où l'on observe une légère décarburation et une structure de type perlitique avec ferrite aciculaire. Cette attaque montre aussi que la pièce est composée d'un assemblage complexe de feuilles successivement repliées et soudées. En effet, les deux feuilles centrales ne constituent qu'une et même feuille repliée et soudée sur elle-même. Du fait qu'elle est trempée, cette feuille a cassé au niveau de la pliure probablement au moment de cette opération. Vient coiffer cet assemblage du côté de la fermeture de la soudure, au moins deux nouvelles feuilles préalablement soudées l'une sur l'autre de manière à ce que la feuille initiale repliée et soudée sur elle-même se trouve enchâssée dans un assemblage en « U ». La feuille interne de cet assemblage en « U » extérieur est composée d'un acier hypoeutectoïde alors que la feuille externe possède et une structure bainito-martensitique correspondant à une trempe (Pl. 60/3). Il n'est pas possible de déterminer si la trempe de la feuille externe a été réalisée avant ou après la mise en forme. Le plus logique étant qu'elle ait été réalisée en fin d'opération. En revanche, la feuille centrale repliée sur elle-même a obligatoirement été trempée avant qu'elle ne soit coiffée de l'assemblage en « U » extérieur. Car, si cela n'avait pas été le cas et que l'ensemble de la pièce avait été trempé en toute fin de mise en forme, la totalité des feuilles externes aurait dû être trempée. Ce qui n'est pas le cas d'une des feuilles intermédiaires. À noter que la périphérie de l'objet ne présente aucune décarburation.

La barre 8374 (3,9 cm pour 177 g) est de section carrée (2,8×2,7 cm) et présente un aspect travaillé avec 6 faces aplanies formant un parallélépipède relativement régulier (Pl. 61/1). Aucun faciès de coupe ou de tranche n'apparaît. Elle a été tronçonnée dans la longueur. Cette section présente de très nombreuses porosités déformées, mais de taille importante. À proximité des plans de frappe, les porosités sont plus petites et plus refermées. Dans ces zones plus compactes, il existe aussi de très nombreux replis. Les inclusions sont en revanche rares, spécialement par rapport aux porosités. Par contre, d'importantes zones de scories avec une matrice fayalitique à lattes chargée de globules de wüstite sont présentes en périphérie de la section, piégées dans les produits de corrosion qui contiennent également du sédiment, mais aucune battiture. Ce nappage périphérique de scorie se situe spécialement sur les faces opposées les moins bien martelées de l'objet. Il démontre que la barre 8374 est directement issue d'une activité de forgeage. L'attaque au Nital à 4 % révèle une section en acier hypereutectoïde homogène entre 1,2 et 1,5 % de carbone (Pl. 61/1). La face la mieux martelée n'est pas décarburée. En revanche, les faces opposées les moins bien martelées (avec le nappage de

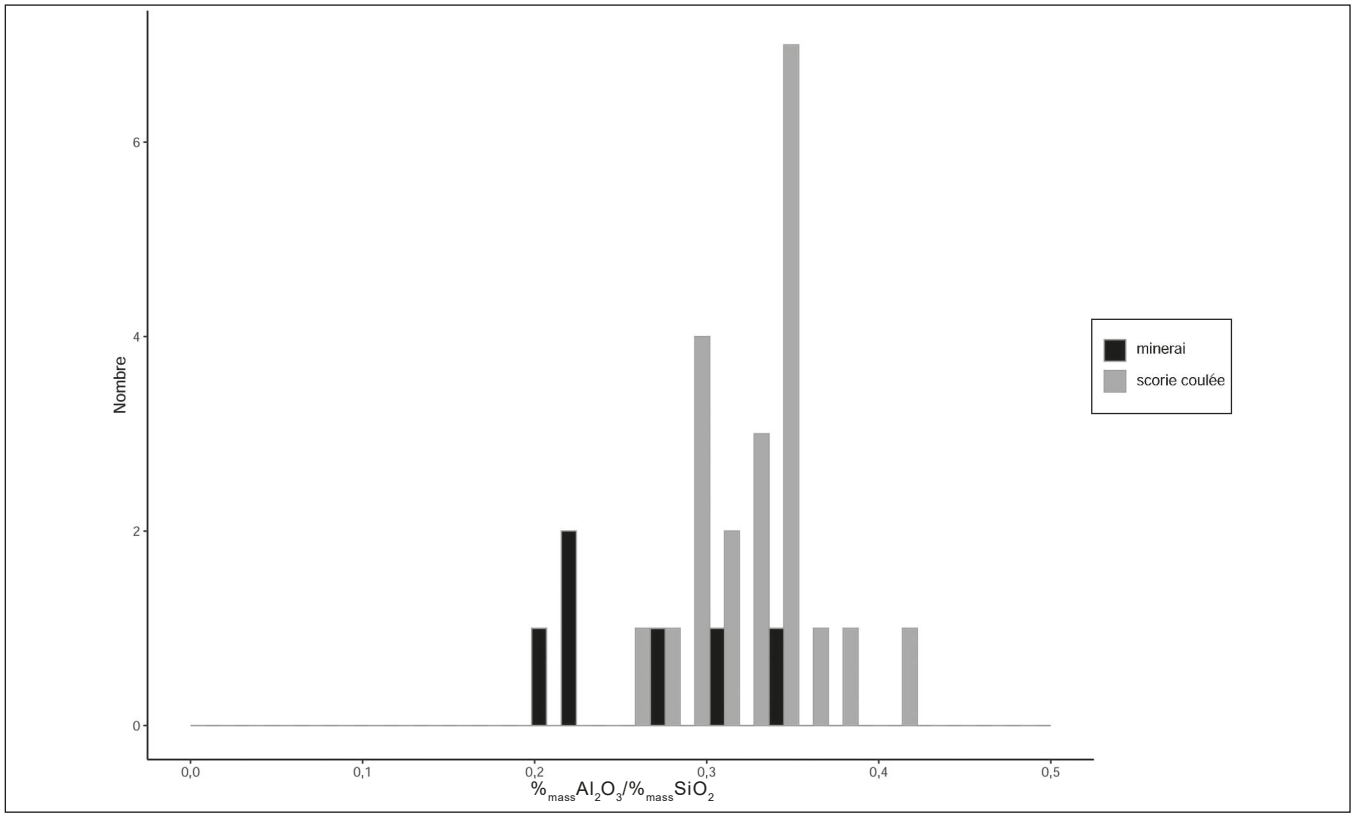


Fig. 38 : Histogramme des rapports $\%_{mass}Al_2O_3/\%_{mass}SiO_2$ des 6 minerais et des 21 scories analysés en pXRF

scorie) présentent une décarburation périphérique peu profonde jusqu'à un acier à 0,4 % de carbone. Aussi, si cette barre présente une forme travaillée, elle est composée d'un métal encore largement brut, impropre au forgeage.

La barre, M122, mesure 14,8 cm avec une section de 3,3×1,5 cm (428 g ; Pl. 61/2). Elle n'est pas réellement droite. Une de ses extrémités est légèrement recourbée. Elle semble entière. La barre M122 a été tronçonnée dans la longueur. La section est très compacte. Cependant, on perçoit au centre des inclusions très allongées ou des lignes de soudure mal refermées. Une des extrémités présente une petite zone moins bien compactée avec des inclusions angulaires aux multiples sens d'écrasement. Quelques lignes de décohésion intergranulaire traversent par endroit pratiquement toute la section. Dans l'ensemble, la barre présente donc une qualité d'épuration élevée, voire très élevée (1,1 % de la section est occupée par des inclusions). L'attaque au Nital à 4 % dévoile une section entièrement composée de structures de martensite et de bainite caractéristiques de la trempe d'aciers supérieurs à 0,3-0,4 % de carbone (Pl. 61/2). Seule une très petite zone en périphérie est légèrement décarburée au niveau de l'extrémité qui conserve une zone moins bien compactée. Tout le reste de la barre ne présente aucun signe de décarburation, même périphérique. Aucune trace de soudure ni de découpe des extrémités (type tranche à chaud) n'est visible. Aussi, la barre est entière et composée d'une seule et même masse de métal.

C.9.4 Analyses chimiques

Des minerais et des scories

6 fragments de minerai de fer découverts essentiellement à l'est des camps dans la zone des fours ont été analysés en pXRF (n°11496, 11678, 11683, 11697, 12134 et 12151 ; Pl. 59/B). Les teneurs, exprimées en oxyde de fer sont comprises entre 52 et 73 % en masse et restent souvent inférieures à 65 % (Tab. 10). Le rapport oxyde d'aluminium sur oxyde de silicium ($\%_{mass}Al_2O_3/\%_{mass}SiO_2$) se répartit entre 0,2 et 0,35 (Fig. 38). Enfin, tous les minerais présentent un taux d'oxyde de manganèse (MnO) non négligeable : entre 1 et 4,5%. Le magnésium n'a pas été quantifié ici parce qu'il s'agit d'un élément léger difficilement détectable en pXRF et le phosphore est présent en teneur non détectable par la pXRF. L'analyse DRX de 5 de ces minerais montre une certaine variabilité structurale entre hématite, maghémite et magnétite (Tab. 10). Nous avons donc affaire à un minerai relativement riche en fer et manganésifère, comparable à celui exploité à la fois dans la région voisine de Hüttenberg[686], mais également dans d'autres zones de l'Empire romain occidental : les Alpes du Nord en Italie ainsi que la Montagne Noire, le Massif du Canigou et l'Ariège en France.

Les éléments majeurs de 21 scories coulées ont été déterminés par pXRF (n°299, 2989, 8555, 8791, 9626, 11223, 11461, 11484, 11600, 11644, 11948, 12231,

686 Cech 2008, pp. 10-12, 285.

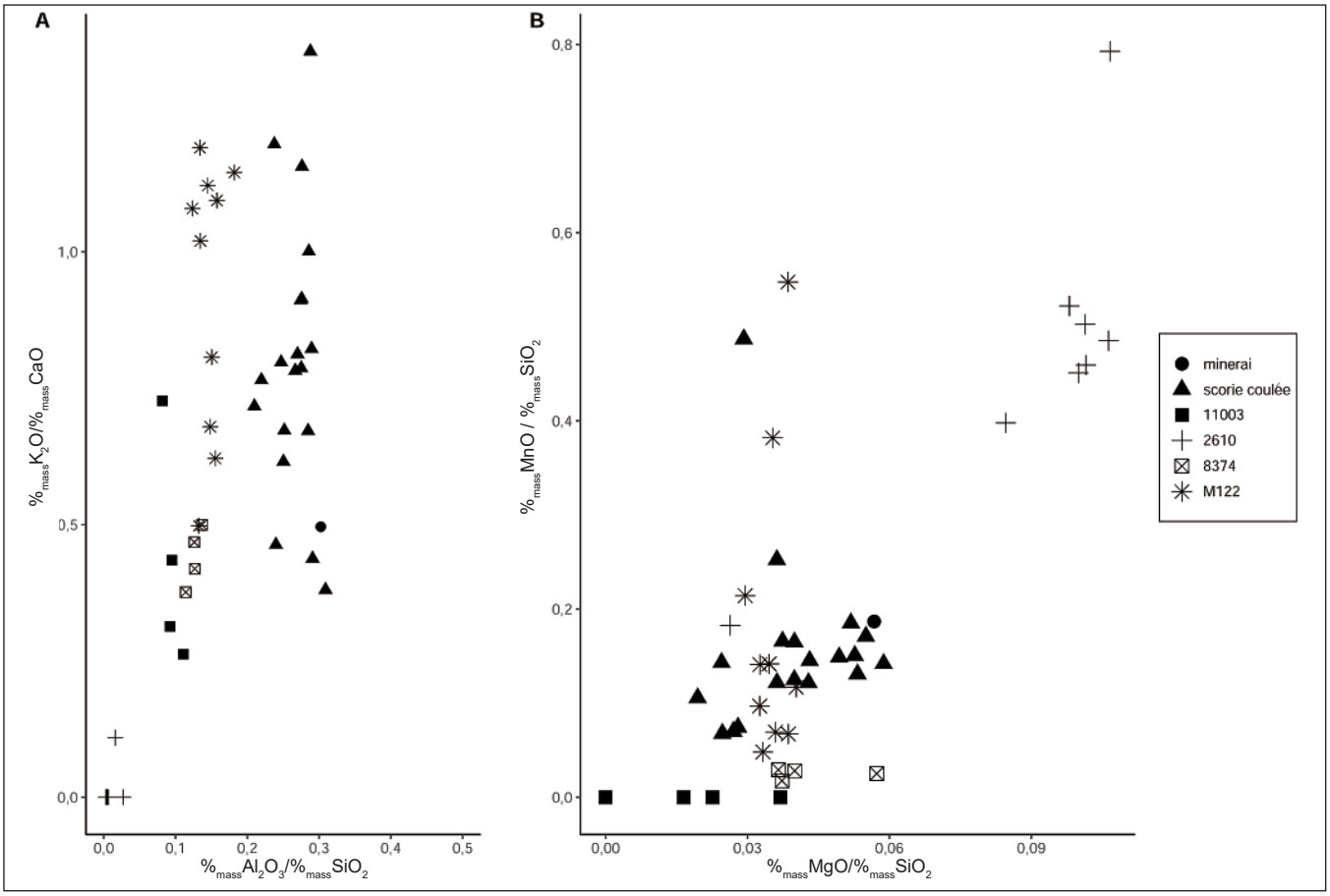


Fig. 39 : Rapports $\%_{mass}Al_2O_3/\%_{mass}SiO_2$ et $\%_{mass}K_2O/\%_{mass}CaO$ ainsi que rapports $\%_{mass}MgO/\%_{mass}SiO_2$ et $\%_{mass}MnO/\%_{mass}SiO_2$ des inclusions des échantillons en fer dosées en MEB-EDS et en LA-ICP-MS et des scories/minerai dosés en ICP-MS et ICP-EOS

12426, 12650, 12292, 12886, 12920, 12928, 12947, US512, US513) et ICP-EOS (n°299, 8555, 8791, 9626, 11223, 11461, 11484, 11600, 11644, 11948, 12231, 12426, 12650, 12292, 12886, 12920, 12947, US512, US513). Le profil chimique des éléments majeurs des scories coulées est comparable à celui des minerais avec notamment de fortes teneurs en MnO et un rapport $\%_{mass}Al_2O_3/\%_{mass}SiO_2$ compatible (Fig. 38).

Dans ce lot, 19 de ces scories ont également fait l'objet d'analyses en ICP-MS et ICP-EOS afin de déterminer la teneur en éléments traces (Tab. 11/a-c et 12). Le choix a été conduit de manière à échantillonner des scories représentatives de l'ensemble du corpus (Pl. 59/C). Ainsi, les scories provenant de la zone des fours, mais aussi de devant les camps et celles découvertes dans les US 512 et 513 du sondage du fossé du camp I ont été préférées.

Des inclusions des objets métalliques et intercomparaison avec les scories et minerais du site

Parallèlement, les inclusions de scorie de 4 des 5 échantillons métalliques ont été analysées en MEB-EDS et en LA-ICP-MS pour connaître leurs teneurs en éléments majeurs et traces (Tab. 13). Seul l'échantillon 11505 n'a pas été analysé parce qu'il est constitué de plusieurs entités soudées. À l'inverse, tous les autres échantillons sont des masses de fer plus ou moins compactées issues de la réduction directe du minerai en bas fourneau. L'analyse de leurs inclusions dans le dessein de connaître leur provenance peut donc être conduite. L'ensemble de la procédure est détaillé dans les articles de référence suivants : Dillmann et al. 2017, Disser et al. 2016, Leroy et al. 2012. L'enjeu de l'étude des données chimiques des scories coulées et des inclusions de scorie est de permettre de rapprocher par la signature chimique des objets en fer et des espaces sidérurgiques. Toute l'analyse repose donc sur l'intercomparaison des données des éléments chimiques dont le comportement est stable et connu durant la réduction du minerai. Cette intercomparaison est basée essentiellement sur les éléments présents à l'état de traces.

Une première approche peut être réalisée en considérant d'abord et uniquement les éléments majeurs. En premier lieu, il apparaît dans le rapport $\%_{mass}Al_2O_3$ / $\%_{mass}SiO_2$ des différences évidentes entre, d'un côté, les scories coulées et le minerai, de l'autre, les objets en fer (Fig. 39). Notamment, le gromps 11003 et la masse 2610 ne présentent pas le même rapport que les scories coulées et montrent également des rapports différents entre eux. De leur côté, les barres M122 et 8374 présentent également un rapport différent de celui des scories coulées, mais semblables entre eux. Les rapports $\%_{mass}MgO$ / $\%_{mass}SiO_2$ et $\%_{mass}MnO/\%_{mass}SiO_2$ permettent aussi de distinguer des profils chimiques différents en fonction des objets et des scories/minerai (Fig. 39). Le gromps 2610 en particulier possède des

valeurs très élevées en MgO et MnO qui le sépare de tout le corpus, objets, scories et minerai inclus. A l'inverse, les valeurs du rapport $\%_{mass}MnO/\%_{mass}SiO_2$ sont relativement basses pour le gromps 11003 et la barre 8374, notamment par rapport aux scories coulées et au minerai. Celle de la barre M122 reste du même ordre de grandeur que celles des scories coulées/minerai.

On vérifie avec l'unique échantillon de minerai analysé la compatibilité chimique des scories coulées et du minerai. On notera aussi la grande différence chimique du gromps 2610 qui présente des inclusions de composition nettement différentes du reste du corpus et plutôt atypiques en termes de profil chimique : très forte teneur en MnO et SiO_2 et absence d'Al_2O_3. Pour les autres objets en fer, les différences observées dans les rapports peuvent suggérer des origines différentes et extra locales, incompatibles avec les scories et le minerai locaux. Cette hypothèse demande cependant une vérification sur la base les éléments traces.

Pour comparer statistiquement les profils chimiques en éléments traces des objets en fer et des scories coulées, 12 éléments traces, Cerium (Ce), Cesium (Cs), Europium (Eu), Hafnium (Hf), Lanthane (La) Niobium (Nb), Neodyme (Nd), Praseodye (Pr), Samarium (Sm), Uranium (U), Ytrium (Y) et Ytterbium (Yb), ont été considérés[687]. Nous utilisons des traitements statistiques détaillés dans les publications citées : en résumé après avoir normalisé les données en rapports de logarithmes[688], nous utilisons l'Analyse en Composantes Principales (ACP) pour comparer les signatures chimiques et leur compatibilité ou incompatibilité.

L'analyse de l'histogramme des variances et du point d'inflexion permet de déterminer que les 3 premiers axes de l'ACP doivent être considérés. Ils représentent 81 % de la variance (Pl. 62). Ainsi, on notera tout d'abord que le minerai et les scories coulées ne sont pas séparables sur les projections de ces plans. En revanche, aucun objet n'est compatible avec les scories/minerai et aucune signature ne se recoupe. Excepté celles des objets 2610 et 11003, les signatures chimiques des artéfacts métalliques sont plutôt homogènes. Aucune compatibilité des nuages de points des objets n'est donc observable (Pl. 62). Toutes les signatures chimiques présentent donc des caractéristiques suffisamment différentes pour considérer que les scories coulées et chacun des objets analysés sont issus de systèmes de réduction (ensemble minerai, charbon, paroi) différents. On peut donc avancer qu'aucun objet n'a une origine correspondant à celle des scories locales analysées, quel que soit leur stade de compactage et d'élaboration (du gromps à la barre). Qui plus est, il apparaît aussi que les objets n'ont pas une origine commune ; ils sont tous d'origines différentes.

À l'exclusion du gromps 11003, les hautes teneurs en MnO et l'absence de P_2O_5 indiquent que les objets 2610, 8374 et M122 sont issus d'un système de réduction utilisant un minerai manganésifère (Tab. 13). C'est le cas des minerais du Burgenland utilisés à Strebersdorf. C'est aussi le cas des minerais de Hüttenberg[689] à quelques centaines de kilomètres de là. D'autres zones sidérurgiques plus éloignées utilisent aussi ce minerai à forte teneur en MnO : notamment dans les Alpes lombarde, en Italie du Nord, mais aussi dans les Pyrénées, en Ariège et dans la Montagne Noire en France[690]. À noter que l'archéologie et l'historiographie associent ces types de minerais à la production d'acier[691].

C.9.5 Discussion

Des activités métallurgiques discordantes

La présence des scories coulées, des vestiges de fours, des minerais notamment grillés, ainsi que l'homogénéité chimique de la signature des scories coulées et des minerais démontrent l'existence d'une activité de réduction à l'est des camps de Strebersdorf. La découverte de scories coulées massives dans le fond du fossé du camp I indique que cette activité se déroule au début de l'installation romaine, probablement autour de 10/20 après J.-C. Elle semble être de petite ampleur, plus conjoncturelle que pérenne. La masse des scories coulées reste en effet faible (de l'ordre de 55 kg) alors que toutes les études s'accordent à dire qu'une seule opération de réduction (correspondant à la production d'une masse brute), engendre, pour ces périodes, entre 60 et 120 kg de déchets[692]. Il semble donc que la masse de scories coulées retrouvée corresponde plutôt à celle d'une opération unique. Nous ne sommes donc pas dans le cadre des grandes productions romaines pérennes reconnues en Gaule ou dans le centre du Norique[693]. Ce type d'activité de réduction de petite ampleur est d'ailleurs attesté à Strebersdorf dans une zone périphérique durant le Moyen Âge[694] et dans un camp augustéen en Illyrie, celui de Obrežje en Slovénie[695].

Par ailleurs, il n'est pas possible d'associer les objets métalliques que nous avons analysés (et ce, quel que soit leur stade de compactage) aux scories coulées. Il est probable que certains gromps de la zone des fours (à l'est des camps) soient issus de la réduction locale du

687 Dillmann et al. 2017 ; Disser et al. 2016 ; Leroy et al. 2012.

688 Les données ont été normalisées pour chaque élément en rapports de logarithmes selon la formule proposée par Leroy et al. 2012. Dans cette formule, la totalité des éléments a été considérée pour calculer la moyenne géométrique.

689 Cech 2008.

690 Leroy 2010 ; Vega et al. 2019.

691 Dillmann et al. 2011.

692 Mangin 2004.

693 Cech 2014 ; Piétak et al. 2012.

694 Sauer et al. 2013.

695 Guštin 2015, p. 227 ; Mason 2008, p. 192 ; Mason 2003, p. 68-70.

minerai, mais ils n'ont pas été pris en compte dans notre échantillonnage certainement parce qu'ils sont minoritaires dans ce corpus qui est quant à lui extrêmement important : 15 kg de gromps constituent un lot tout à fait exceptionnel. Comment interpréter cette surreprésentation et surtout le fait que nombre de ces gromps proviennent d'origines extra locales qui plus est différentes ? Se pose alors en premier lieu une question : est-ce que ces gromps sont associés à une activité d'épuration ou de comptage réalisée sur place à Strebersdorf ?

Aucun témoin ou vestige ne permet d'attester la réalisation *in situ* d'une activité de compactage ou d'épuration. La présence de 5 scories en culot renvoie à une forge plus tardive localisée dans l'agglomération de bord de route. En général, l'activité d'épuration et compactage génère des scories coulées de petites dimensions et des gromps présentant des stigmates de martelage[696]. Cependant, à Strebersdorf, ni les analyses chimiques ni la répartition des petites scories localisées dans la zone des fours à l'est des camps ne permettent de soutenir cette hypothèse. Tout ou majeure partie des scories coulées est issue de l'activité de réduction. Même les témoins de martelage sont rares dans les échantillons de fer analysés. Il est donc impossible d'affirmer qu'il existe dans les camps de Strebersdorf une activité de forge ou d'épuration. Seule une phase de réduction modeste paraît évidente au début de l'occupation des camps.

Ainsi, l'ensemble des observations suggère qu'au-delà d'une activité de réduction relativement ponctuelle, les activités métallurgiques semblent inexistantes dans les camps de Strebersdorf. Pourtant, l'approvisionnement en métal sous forme de fragments d'acier pratiquement brut ou de barres s'intègre dans un réseau complexe extra local aux origines multiples plus caractéristique d'une économie d'échange que d'une économie de subsistance.

Des aciers sous différentes formes

Ce qui est remarquable dans les objets en fer analysés à Strebersdorf et qu'ils sont tous constitués d'aciers très carburés (au-delà de l'eutectoïde, 0,8 $\%_{mass}$), parfois trempés, voire de fonte, pour l'un d'entre eux. Cette situation est véritablement exceptionnelle au regard des études sur les objets en fer antiques. Le gromps 2610 est en fonte blanche et en acier hypereutectoïde. Le gromps 11003 est en acier hypereutectoïde. La barre 11505 est un assemblage complexe d'aciers trempés supérieurs à 0,3-0,4 % de carbone comme les barres 8374 et M122. Ce qui est aussi remarquable, c'est que tous ces alliages très carburés proviennent d'origines différentes et extra locales pour l'instant inconnues. Ces artefacts ne sont donc pas produits à Strebersdorf bien qu'il existe une petite activité ponctuelle de réduction *in situ*. Cette dernière a employé un minerai au manganèse peu chargé en phosphore qui est bien attesté dans le Burgenland et dans le centre du Norique[697]. Deux des 4 objets analysés (la barre M122 et le gromps 2610) présentent justement des inclusions aux teneurs indiquant l'usage d'un tel minerai. Des découvertes archéologiques et des analyses métallographiques faites notamment sur le site de Semlach/Eisner (Autriche), mais aussi dans d'autres sites antiques du Magdalensberg, témoignent de cette production d'aciers en Norique à partir de minerai manganésifère sans phosphore. Des gromps comparables structurellement - constitués d'aciers hypereutectoïde et de fonte - aux échantillons 2610 et 11003 ont même été retrouvés et analysés. Cependant, il est pour l'instant impossible de les relier aux découvertes de Strebersdorf parce que les analyses chimiques exhaustives manquent à Hüttenberg et dans le Magdalensberg[698]. Cette production d'acier interne à l'Empire romain pourrait d'ailleurs être aussi implantée dans le Burgenland[699] voire plus éloignée comme en Lombardie et même dans les Pyrénées[700].

La question de l'approvisionnement de l'acier dans l'Empire romain est de celle qui a été peu traitée. La raison est que les barres de fer destinées au commerce et connues pour l'Antiquité sont majoritairement soit en ferrite, soit en fer hétérogène (mélange de ferrite et d'aciers), soit en fer phosphoreux. En effet, les barres, comme celles trouvées en masse dans les épaves des Saintes-Maries-de-la-Mer (Bouches-du-Rônes, France), mais aussi plus généralement en Méditerranée, sont nombreuses. Présentes sur des dizaines de sites, elles forment un lot de plusieurs centaines de tonnes de barres[701]. Ces barres se retrouvent jusqu'en Norique et Dalmatie[702]. Aucune n'est en acier homogène. On comprend donc que l'approvisionnement en acier durant l'Antiquité s'organise autour de filières spécifiques qui restent à documenter. Les écrits de Pline l'Ancien mentionnent d'ailleurs cela : « *Mais, entre toutes les espèces, la palme revient au fer sérique ; les Sères nous l'envoient avec leurs étoffes et leurs peaux ; la seconde place revient au fer parthique. Ce sont les seules espèces de fer dans la composition desquelles n'entre que de l'acier pur ; car toutes les autres contiennent un mélange de fer plus doux. Dans le monde romain, çà et là, un filon fournit du fer de cette qualité, dans le Norique par exemple.* »[703].

On mesure alors combien Strebersdorf est un contexte privilégié pour avoir un regard sur les spécificités de l'approvisionnement en acier dans l'Antiquité. Par cette

696 Durand/Pagès 2017.

697 Nosek 1977 ; Cech 2014 ; Šašel Kos 2011.

698 Straube 1996, pp. 97-121 ; Birch 2017 ; Cech 2008 ; Cech 2014 ; Gömöri 2006.

699 Nosek 1977.

700 Dillmann et al. 2011.

701 Pagès et al. 2008 ; Pagès et al. 2011 ; Pagès 2014 ; Delqué-Kolic et al. 2017.

702 Durman 2002 ; Gömöri 2006 ; Pollak 2006.

703 Plin. nat. 34,145.

fenêtre d'analyse, le commerce et la distribution des aciers dans l'Empire romain semblent déterminés par :

– la multiplicité des sources d'approvisionnement qui sont, d'après Pline l'Ancien[704], majoritairement liées à des productions orientales hors de l'Empire ;

– les faibles poids des masses commercées. La seule barre complète en acier pèse moins de 500 g alors que les barres de fer de méditerranée pèsent plusieurs kilogrammes chacune[705] ;

– l'utilisation et vraisemblablement le commerce de fragments de masses brutes d'aciers épurés sous forme de gromps qui doivent encore être compactés sous forme de gromps ;

– le possible emploi de fragments de fonte pratiquement bruts (à peine ramassées) qui pourraient potentiellement être décarburés pour être une source d'acier. Traditionnellement, les fragments de fonte découverts sur les sites sont considérés comme des ratés ou des déchets intraitables abandonnés. Cependant, la découverte à Strebersdorf d'un fragment de fonte d'origine extra locale au milieu des gromps amène à reconsidérer de manière plus ouverte cette conclusion. Est-ce que ces fragments de fonte ne sont pas aussi un matériau commercé et une source d'acier ? La question mérite d'être posée d'autant que l'obtention d'acier par décarburation a notamment été mise en évidence dans des chronologies sensiblement équivalentes ; sur le site des Espérelles (Martigues, 13, France) au tournant du IIIe et IVe s.[706] et en val Gabbia sur le site de Ponte di val Gabbia III en Lombardie pour le Ve-VIe s.[707]. Cette hypothèse doit cependant être prise avec la plus grande prudence et les seuls vestiges de Strebersdorf ne suffisent en aucun cas à la valider.

Questions posées sur le commerce de l'acier

Appréhender de manière conjointe les camps romains et la métallurgie du fer ramène nécessairement à considérer la question de l'armement des légions et des auxiliaires et surtout à visiter celle de la production des armes et des équipements militaires largement constitués de fer et d'acier. Au début du Haut-Empire, les camps romains ne sont pas reconnus pour être des lieux de production d'armes[708]. Ils dépendraient plutôt de fabriques établies en arrière des zones limitrophes et de conflits, plutôt localisées dans des villes de zones pacifiées. Cependant, il est souvent avancé que les camps disposaient d'ateliers spécialisés notamment dans la réparation et la production conjoncturelle d'armes. Dans cette situation, la présence d'aciers à Strebersdorf paraît évidente aux premiers abords. Ceux-ci seraient apparemment utilisés dans la fabrication et l'entretien des armes des camps. Cependant, il existe une discordance remarquable entre la masse importante de gromps découverts à Strebersdorf et l'inexistence de vestiges de forge. De plus, la diversité des origines, qui plus est extra locales, apparaît également étonnante, surtout que la production de fonte et d'acier hyper-eutectoïde est effective dans le centre du Norique et le Burgenland.

Ne pourrait-on pas alors penser que le camp romain de Strebersdorf est une étape, un relais, dans le commerce de l'acier venu peut-être du centre du Norique, mais aussi et surtout de différentes espaces sidérurgiques extérieurs à l'Empire comme le souligne Pline et le laisse suggérer les différentes origines extra locales repérées dans la provenance des aciers et fonte analysés de Strebersdorf. L'approvisionnement en acier dans l'Empire est en effet stratégique, fortement lié au domaine militaire et largement dépendant de zones extérieures à l'Empire, bien que le *Ferrum Noricum* semble aussi y participer de manière minoritaire. Si l'on suit ce raisonnement, les gromps et les barres de Strebersdorf seraient plus des reliquats du commerce dans l'Empire romain de l'acier, ce dernier étant, en partie au moins barbare. Strebersdorf serait alors à la convergence de plusieurs réseaux d'approvisionnement. D'ailleurs, ce commerce avec le monde dit barbare est une réalité bien attestée dans la zone avec notamment la route de l'ambre qui passe juste à l'ouest des camps.

C.9.6 Conclusion

Les camps romains de Strebersdorf s'accompagnent au début de leur installation d'une activité de réduction du minerai de fer qui demeure de petite ampleur d'après le volume de scorie découvert. Plus tard, entre le fin du Ier s. et le IIème s., alors que les camps ne sont plus en fonction, une activité de forge semble être exercée dans la petite agglomération qui se développe directement au sud-est des camps, le long de la voie de l'ambre qui relit *Savaria*/Szombathely à *Scarabantia*/Sopron. Entre ces deux séquences, aucune activité métallurgique ne semble exercée dans les camps de Strebersdorf. Les vestiges de forge sont inexistants. Pourtant, de très nombreux petits fragments de fer brut se retrouvent dans toute la zone à côté de quelques demi-produits en forme de petites barres aux morphologies variées. L'analyse de 5 d'entre eux permet de voir que ces fragments comme ces barres sont composés d'acier homogène fortement carburé d'origines extra locales toutes différentes. Cette configuration laisse penser que Strebersdorf a été durant un temps au moins une plateforme liée à l'approvisionnement en acier qui vient notamment de contrées orientales extérieures à l'Empire si l'on se fie à Pline l'Ancien, en accord avec les faits archéologiques.

704 Plin. nat. 34,145.

705 Pagès et al. 2011.

706 Pagès 2010, pp. 34-46.

707 Fluzin 2003.

708 Glad 2015 ; Cosme 2007 ; Bishop 1985.

Echantillon	type	pXRF (en %)										Autre analyse
		oxBa	oxAl	oxSi	oxK	oxCa	oxMn	oxFe	oxSr	oxP	Total	
11496	minerai	0,04	7,92	22,59	2,37	3,86	4,44	56,18	0,01	< 0,5	97,41	ICP
11678		0,06	6,30	22,66	1,57	0,73	2,95	51,69	0,01	< 0,5	85,96	DRX
11683		0,06	4,59	14,54	1,01	0,94	1,82	64,64	0,02	< 0,5	87,62	DRX
11697		0,10	1,54	7,57	0,54	1,51	2,02	72,80	0,01	< 0,5	86,09	DRX
12134		0,02	1,98	9,18	0,55	0,72	1,04	72,76	0,00	< 0,5	86,26	DRX
12151		0,05	5,17	22,80	1,37	1,60	2,52	54,26	0,01	< 0,5	87,78	DRX
11725	paroi	0,04	9,43	38,38	1,26	8,40	0,16	11,24	0,08	< 0,5	68,98	
11223	scorie coulée	0,05	5,92	19,64	1,75	3,40	3,23	62,57	0,02	< 0,5	96,58	ICP
12928		0,07	10,66	27,91	4,64	1,37	2,29	53,77	0,01	< 0,5	100,72	
11461		0,03	6,45	18,74	1,98	2,05	2,74	71,47	0,01	< 0,5	103,47	ICP
11484		0,05	8,85	26,02	2,36	2,55	3,97	50,14	0,01	< 0,5	93,96	ICP
11600		0,04	5,33	17,79	1,72	1,57	2,49	73,12	0,01	< 0,5	102,07	ICP
11644		0,07	7,65	22,39	2,27	2,77	3,20	60,91	0,03	< 0,5	99,29	ICP
11948		0,04	7,83	22,89	2,45	3,07	4,21	55,87	0,03	< 0,5	96,39	ICP
12231		0,07	8,30	25,16	3,27	3,11	3,42	52,54	0,02	< 0,5	95,88	ICP
12292		0,05	7,23	21,49	3,29	1,65	3,19	57,45	0,02	< 0,5	94,37	ICP
12426		0,10	7,61	21,82	2,26	2,27	3,01	61,19	0,05	< 0,5	98,30	ICP
12650		0,13	6,91	20,53	1,89	2,07	11,32	54,85	0,03	< 0,5	97,71	ICP
12886		0,04	5,84	20,01	1,83	1,35	5,21	65,26	0,02	< 0,5	99,55	ICP
12920		0,03	6,75	18,94	1,69	1,98	3,37	67,28	0,01	< 0,5	100,04	ICP
12947		0,05	6,28	22,22	2,54	3,60	3,73	58,19	0,02	< 0,5	96,62	ICP
2989		0,06	10,82	26,10	3,28	3,69	4,40	48,62	0,02	< 0,5	96,99	
2991		0,04	6,72	20,77	1,51	3,14	3,85	58,74	0,01	< 0,5	94,78	ICP
8555		0,03	6,69	20,82	2,78	1,62	2,74	61,24	0,01	< 0,5	95,93	ICP
8791		0,05	6,75	23,31	1,84	2,85	2,19	56,50	0,01	< 0,5	93,51	ICP
9626		0,07	7,35	23,16	2,51	2,06	2,64	60,50	0,03	< 0,5	98,32	ICP
US 512		0,03	5,68	21,41	1,90	1,93	1,76	62,83	0,01	< 0,5	95,55	ICP
US 513		0,04	5,61	18,51	2,79	2,78	1,76	60,37	0,01	< 0,5	91,87	ICP

Echantillon	type	DRX				
		hématite	maghémite	magnétite	goethite	siderite
11678	minerai	+++++				
11683		+	++++			
11697		++	+++			
12134			+++		++	
12151				++++		+

Tab. 10 : Résultat calibré exprimé en oxyde des différents éléments chimiques majeurs mesurés en pXRF dans les minerais, scories coulées et paroi

ICP-MS iCapQ et ICP-EOS iCap6500 (Sc uniquement)		As	Ba	Be	Bi	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Ga	Ge	Hf	In	Mo	Nb	Ni	Pb
Incertitudes (%) en fonction de la teneur	>100µg/g																	
	>50 µg/g	<5%	<5%	<5%		<10%	<5%			<8%		<5%		<5%	<5%	<5%		<10%
	>10 µg/g	<15%	<15%	<15%	<5%	<15%	<10%	<5%	<5%	<20%	<5%		<5%		<15%		<5%	
	>1 µg/g	<20%	**		<10%		<20%	<10%	<15%	**	<10%	<10%	<10%	<15%	<20%	<10%	**	<20%
	>0.5 µg/g																	
	>0.1 µg/g	**		<20%	<20%	<20%	**	**	<20%		<20%	<20%	<15%	<20%	**	<20%		**
	>0.01 µg/g			**	**	**			**		**	**	**	**		**		
Limites de détermination	L.D. µg/g	0.50	5.5	0.05	0.045	0.02	0.08	0.50	0.02	2.0	0.02	0.04	0.03	0.03	0.50	0.015	2.0	0.45
Echantillon	type	As	Ba	Be	Bi	Cd	Co	Cr	Cs	Cu	Ga	Ge	Hf	In	Mo	Nb	Ni	Pb
		µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g
2991	scorie coulée	1,34	275	9,99	0,07	0,04	3,99	52,0	3,69	66,3	7,99	0,53	1,91	<L.D.	0,55	5,79	4,9	1,14
8555		5,44	200	4,00	<L.D.	0,03	22,2	71,3	3,39	27,2	7,19	0,79	1,37	<L.D.	1,46	3,55	122	0,74
8791		2,24	347	4,54	<L.D.	0,05	7,34	58,6	3,21	12,6	7,47	0,50	2,03	<L.D.	0,54	5,98	16,5	2,49
9626		1,16	369	9,00	<L.D.	<L.D.	3,84	43,3	3,22	21,7	8,36	0,65	1,57	<L.D.	0,63	5,53	2,4	1,17
11223		1,99	335	8,15	<L.D.	0,03	23,4	47,6	3,20	16,2	8,17	0,65	1,75	<L.D.	<L.D.	5,25	43,5	1,62
11461		1,13	267	8,69	<L.D.	0,07	3,74	34,5	2,83	12,3	6,64	0,79	1,65	<L.D.	0,88	4,45	8,0	0,99
11484		0,58	280	9,83	<L.D.	0,03	4,72	59,7	3,98	9,4	8,73	0,48	2,52	<L.D.	<L.D.	6,90	4,6	1,47
11496	minerai	<L.D.	302	8,74	0,10	0,04	2,75	43,4	3,78	14,4	8,73	0,46	1,86	<L.D.	<L.D.	6,20	<L.D.	5,37
11600	scorie coulée	8,70	229	6,05	<L.D.	0,02	186	47,6	2,03	77,2	6,89	0,71	0,99	<L.D.	1,52	3,40	803	1,14
11644		<L.D.	440	5,68	<L.D.	<L.D.	3,67	55,0	3,51	10,4	9,18	0,41	1,83	<L.D.	0,73	5,56	4,1	1,61
11948		<L.D.	296	5,19	<L.D.	0,02	2,34	50,4	3,64	10,4	9,55	0,41	2,25	<L.D.	0,74	7,13	2,9	2,11
12231		0,62	519	7,81	<L.D.	0,02	1,63	61,0	3,82	9,2	9,14	0,52	2,38	<L.D.	1,15	6,71	<L.D.	1,84
12426		0,66	757	5,71	<L.D.	<L.D.	1,26	49,2	3,49	8,5	8,60	0,44	1,95	<L.D.	0,78	5,75	4,0	1,14
12650		<L.D.	1052	9,94	<L.D.	0,02	6,70	45,8	2,22	12,8	7,13	1,03	1,71	<L.D.	<L.D.	5,28	3,0	1,13
12292		2,43	376	4,96	<L.D.	<L.D.	0,95	78,1	3,41	7,6	7,59	0,37	1,87	<L.D.	<L.D.	6,18	<L.D.	0,81
12886		9,91	241	4,57	<L.D.	0,06	14,1	55,3	1,85	29,6	6,59	0,96	2,04	<L.D.	1,08	4,36	69,0	2,24
12920		3,37	221	6,74	<L.D.	<L.D.	0,63	56,9	1,80	21,0	4,96	0,35	1,43	<L.D.	<L.D.	4,04	2,0	0,80
12947		1,57	305	11,1	<L.D.	0,04	1,27	46,8	2,68	13,3	6,69	0,66	1,96	<L.D.	<L.D.	5,07	<L.D.	1,03
US 512		1,22	237	5,09	<L.D.	0,03	3,95	41,8	2,46	14,3	7,52	0,53	1,65	<L.D.	0,57	4,67	4,7	1,93
US 513		1,40	229	4,63	<L.D.	<L.D.	3,79	49,3	3,20	17,9	7,44	0,48	1,55	<L.D.	0,60	4,31	4,9	1,42

Tab. 11a : Résultats bruts des éléments mineurs et traces des analyses ICP-MS et ICP-EOS réalisées sur les scories et le minerai

ICP-MS iCapQ et ICP-EOS iCap6500 (Sc uniquement)		Rb	Sb	Sc	Sn	Sr	Ta	Th	U	V	W	Y	Zn	Zr	La	Ce	Pr	Nd
Incertitudes (%) en fonction de la teneur	>100µg/g			<5%														
	>50 µg/g	<5%		<10%	<5%	<5%	<5%	<5%	<5%	<5%	<5%	<5%	<10%	<5%		<5%	<5%	<5%
	>10 µg/g	<15%	<5%		<15%	<10%			<10%	<10%	<10%		<20%	<15%	<5%	<10%	<10%	<15%
	>1 µg/g	<20%	<10%	<15%	<20%	<20%	<10%	<10%	<15%	<15%	<20%	<15%	**	**	<15%	<15%		
	>0.5 µg/g			**														
	>0.1 µg/g	**	<20%		**	**	<20%	<20%	<20%	**	**	<20%			<20%	<20%	<20%	<20%
	>0.01 µg/g		**				**	**	**			**			**	**	**	**
Limites de détermination	L.D. µg/g	0.15	0.06	0.6	0.30	0.70	0.004	0.015	0.01	0.85	0.80	0.02	7.0	1.50	0.02	0.03	0.004	0.016
Echantillon	type	Rb	Sb	Sc	Sn	Sr	Ta	Th	U	V	W	Y	Zn	Zr	La	Ce	Pr	Nd
		µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g
2991	scorie coulée	59,1	0,24	12,70	1,89	87,3	0,55	5,40	7,28	69,5	1,27	118	37,3	70,8	33,7	57,1	6,99	29,0
8555		58,6	0,85	19,56	1,89	37,8	0,35	3,25	6,95	158	<L.D.	58,9	52,1	51,8	14,7	28,1	3,56	14,7
8791		57,5	0,12	13,65	1,67	104	0,57	5,61	10,0	100	1,02	89,3	197	77,4	26,6	52,4	6,51	26,7
9626		62,5	0,09	16,97	1,94	202	0,53	5,82	6,21	106	1,15	119	200	59,8	29,5	74,5	8,53	36,6
11223		56,4	0,24	12,91	2,08	123	0,51	5,10	3,65	71,5	1,16	111	57,9	66,1	28,3	50,1	6,22	25,6
11461		51,7	0,21	17,44	1,69	107	0,43	4,26	13,2	68,1	1,18	120	29,1	66,3	33,2	63,4	8,00	34,8
11484		68,6	0,08	14,26	2,01	72,5	0,69	6,77	9,96	80,7	1,20	112	43,3	91,1	34,9	60,0	7,27	30,1
11496	minerai	67,9	0,16	13,02	2,17	70,9	0,59	5,75	4,40	70,8	1,15	109	70,1	70,3	31,2	55,4	6,63	27,3
11600	scorie coulée	40,5	0,24	11,04	1,48	112	0,32	3,36	5,71	87,7	<L.D.	70,8	149	36,7	19,6	47,5	5,64	24,6
11644		63,0	0,08	13,65	1,99	252	0,53	5,12	5,61	84,6	1,06	69,9	109	71,6	25,6	49,0	6,30	25,7
11948		71,0	0,10	10,39	2,44	232	0,67	6,43	12,3	70,6	1,17	46,1	56,2	84,3	21,4	38,7	4,58	17,6
12231		70,6	<L.D.	13,89	2,04	115	0,62	6,18	10,7	87,9	1,26	95,9	36,7	93,9	36,3	64,7	8,17	32,9
12426		64,8	0,06	11,93	2,10	405	0,56	5,61	20,6	88,5	1,14	78,7	106	72,2	19,6	43,4	5,27	22,6
12650		46,3	<L.D.	9,56	1,26	233	0,51	5,52	9,11	64,8	0,92	147	24,9	64,0	73,1	143	18,1	72,4
12292		71,0	<L.D.	26,42	1,45	153	0,59	6,45	8,83	135	0,99	81,1	52,2	69,4	24,1	47,4	6,17	25,0
12886		37,3	0,73	8,12	1,85	93,5	0,42	3,82	10,4	70,5	0,85	81,7	48,2	79,4	30,6	47,8	7,15	29,5
12920		39,8	<L.D.	16,22	0,95	61,5	0,39	4,17	5,80	72,4	<L.D.	94,8	16,7	52,7	19,9	39,3	4,97	20,7
12947		55,0	<L.D.	28,79	1,45	122	0,48	4,90	16,4	90,0	1,03	141	24,4	78,5	42,1	73,9	9,51	40,0
US 512		49,0	0,07	10,38	1,98	82,8	0,45	4,84	10,6	59,1	1,05	84,9	47,5	62,6	38,6	62,4	7,11	27,5
US 513		58,4	<L.D.	10,40	1,73	81,7	0,43	4,55	10,1	68,2	1,01	79,1	46,8	58,0	34,9	56,5	6,49	25,3

Tab. 11b : Résultats bruts des éléments mineurs et traces des analyses ICP-MS et ICP-EOS réalisées sur les scories et le minerai

ICP-MS iCapQ et ICP-EOS iCap6500 (Sc uniquement)		Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Incertitudes (%) en fonction de la teneur	>100µg/g										
	>50 µg/g				<5%		<5%		<5%	<5%	
	>10 µg/g	<5%		<5%	<10%	<5%				<10%	<5%
	>1 µg/g	<15%	<5%	<10%	<15%	<10%	<10%	<5%	<10%	<15%	<10%
	>0.5 µg/g										
	>0.1 µg/g	<20%	<10%	<20%	<20%	<15%	<20%	<10%	<20%	<20%	<20%
	>0.01 µg/g	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Limites de détermination	L.D. µg/g	0.005	0.002	0.005	0.001	0.004	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001
Echantillon	type	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
		µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g
2991	scorie coulée	6,92	1,85	9,71	1,74	12,8	3,11	9,20	1,29	8,49	1,29
8555		3,81	0,956	5,00	0,902	6,72	1,66	5,11	0,766	5,45	0,879
8791		6,82	1,64	8,10	1,51	11,1	2,69	8,29	1,26	8,99	1,39
9626		9,58	2,31	11,9	2,17	15,6	3,68	10,9	1,64	11,3	1,69
11223		6,48	1,65	8,64	1,55	11,5	2,86	8,66	1,24	8,35	1,31
11461		9,04	2,39	11,3	2,09	15,0	3,49	9,86	1,46	9,52	1,48
11484		6,91	1,80	9,48	1,68	12,3	3,04	8,79	1,26	8,08	1,30
11496	minerai	6,41	1,67	8,42	1,51	11,2	2,80	8,18	1,17	7,53	1,23
11600	scorie coulée	6,22	1,49	7,50	1,35	9,69	2,25	6,55	1,00	6,67	1,05
11644		6,16	1,45	6,93	1,19	8,32	1,95	5,73	0,863	5,62	0,921
11948		3,74	0,837	4,04	0,694	4,89	1,19	3,44	0,503	3,22	0,499
12231		7,59	1,92	9,10	1,57	10,8	2,56	6,99	0,991	6,13	0,956
12426		5,46	1,26	6,59	1,19	8,49	2,13	6,45	0,974	6,41	1,06
12650		17,7	4,13	19,2	3,29	21,2	4,56	12,3	1,72	10,8	1,66
12292		6,04	1,49	7,14	1,40	10,6	2,55	7,90	1,31	9,25	1,57
12886		7,10	1,75	8,53	1,43	9,95	2,24	6,15	0,863	5,26	0,874
12920		5,30	1,37	7,11	1,37	10,3	2,56	7,67	1,15	7,84	1,36
12947		10,0	2,72	13,0	2,40	17,4	4,17	12,0	1,77	11,6	1,86
US 512		6,14	1,44	7,83	1,40	10,3	2,54	7,60	1,14	7,69	1,31
US 513		5,81	1,35	6,94	1,29	9,50	2,34	7,09	1,10	7,38	1,27

Tab. 11c : Résultats bruts des éléments mineurs et traces des analyses ICP-MS et ICP-EOS réalisées sur les scories et le minerai

ICP-EOS iCap6500		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	TiO_2	P_2O_5
Incertitudes (%) en fonction de la teneur	**>10 %**	<2%	<2%	<2%			<2%				
	>5 %		<10%			<2%	<5%	<5%	<5%	<5%	
	>1 %		<15%	<10%	<5%	<10%		<10%	<10%	<10%	<5%
	>0,5 %	<10%		<15%	<15%	<15%	<15%	<15%	<20%	<20%	<15%
	>0,1 %	<20%	<20%								**
	>0,05 %	**	**	<20%	<20%	<20%	<25%	<25%	<25%	<25%	
	>0,01 %			**	**	**	**	**	**	**	
Limites de détermination	**L.D. %**	0,05	0,04	0,015	0,015	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02	0,10
Echantillon	**type**	**SiO_2**	**Al_2O_3**	**Fe_2O_3**	**MnO**	**MgO**	**CaO**	**Na_2O**	**K_2O**	**TiO_2**	**P_2O_5**
		%	**%**	**%**	**%**	**%**	**%**	**%**	**%**	**%**	**%**
2991	scorie coulée	22,85	6,65	65,14	4,23	1,19	2,84	0,29	1,24	0,31	0,36
8555		18,80	5,37	69,24	2,67	1,11	1,44	0,09	1,44	0,32	<L.D.
8791		28,47	6,83	61,88	2,12	0,80	2,72	0,12	1,26	0,33	0,34
9626		22,92	6,33	70,36	2,42	0,45	1,33	0,14	1,54	0,27	0,28
11223		20,04	6,19	68,23	3,43	1,10	3,25	0,22	1,24	0,28	<L.D.
11461		21,24	5,34	70,99	3,17	1,05	2,19	0,17	1,47	0,25	<L.D.
11484		29,23	8,04	57,76	4,25	1,26	2,11	0,42	1,66	0,39	<L.D.
11496	minerai	23,67	7,16	61,97	4,42	1,34	3,22	0,27	1,60	0,33	<L.D.
11600	scorie coulée	14,76	4,05	82,03	2,11	0,36	1,14	0,12	1,04	0,18	<L.D.
11644		23,21	6,61	66,88	3,04	1,24	2,01	0,16	1,35	0,31	<L.D.
11948		25,99	7,53	61,39	4,31	0,97	2,11	0,27	1,73	0,37	<L.D.
12231		27,97	7,46	59,24	3,40	1,20	2,41	0,24	1,89	0,36	<L.D.
12426		24,35	6,71	66,46	2,97	0,88	1,82	0,27	1,67	0,32	<L.D.
12650		23,75	6,41	58,60	11,57	0,69	1,81	0,22	1,47	0,29	<L.D.
12292		26,23	7,55	62,95	3,28	1,05	1,37	0,29	1,87	0,35	<L.D.
12886		20,22	4,81	70,96	5,11	0,73	0,91	0,19	1,09	0,28	<L.D.
12920		20,33	5,03	73,15	3,35	0,81	1,70	0,23	1,36	0,23	<L.D.
12947		24,66	6,17	64,02	3,71	1,30	3,12	0,23	1,92	0,29	<L.D.
US 512		26,28	5,77	67,55	1,78	0,65	1,90	0,35	1,46	0,25	<L.D.
US 513		26,36	5,53	66,91	1,84	0,71	2,21	0,32	1,58	0,25	<L.D.

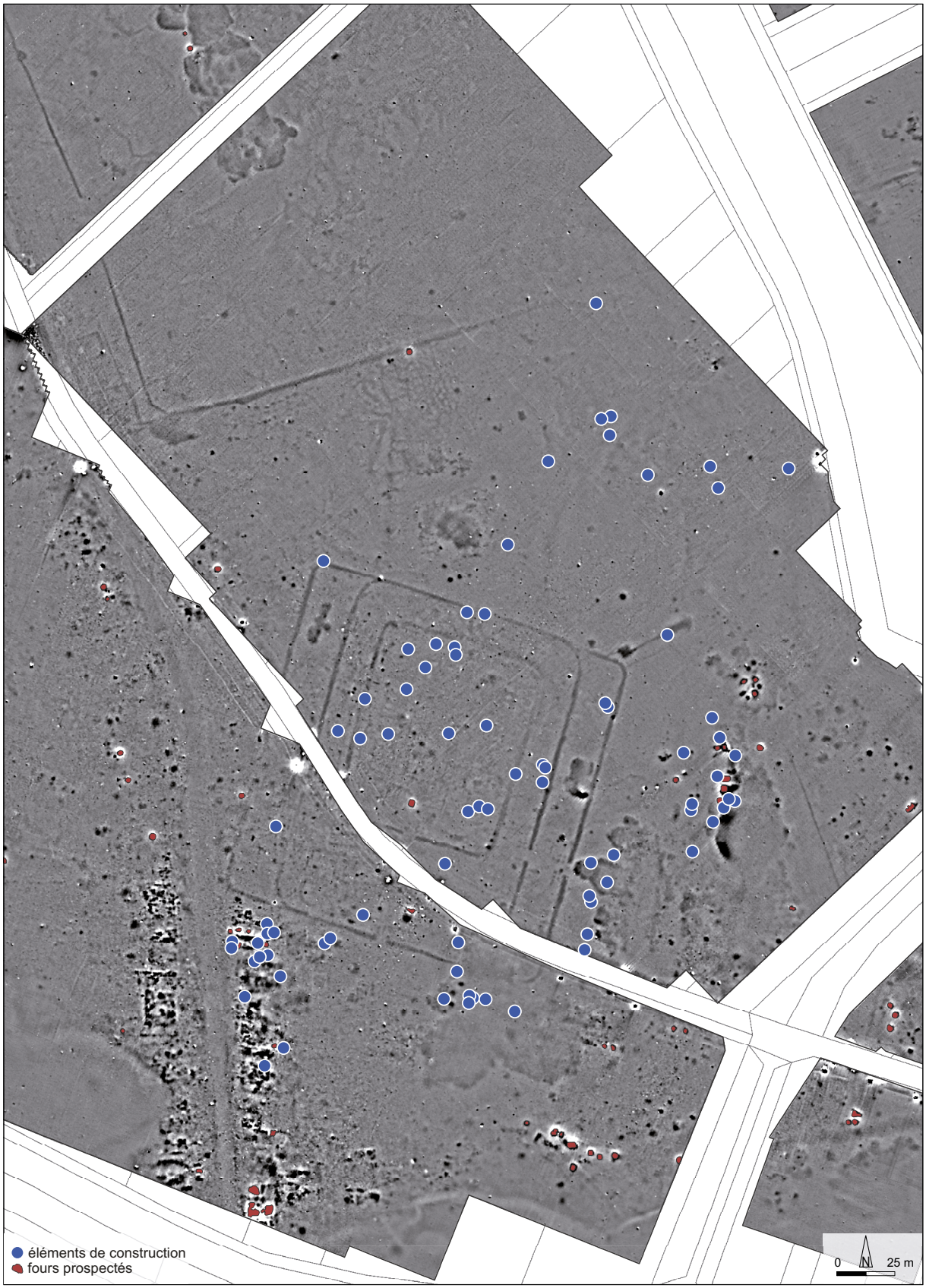
Tab. 12 : Résultats bruts des éléments majeurs des analyses ICP-MS et ICP-EOS réalisées sur les scories et le minerai

Echantillon	n° inclus	MEB-EDS																
		O	Na	Mn	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	V	Cr	Fe	Cu	Zn
M122	M122_5c_111	41,71	0,22	21,88	1,20	4,11	24,12	0,07	0,11	0,00	2,23	2,38	0,60	0,00	0,00	1,36	0,00	0,00
M122	M122_4a_84	37,26	0,15	17,22	1,24	4,15	27,22	0,00	0,08	0,00	2,82	2,38	0,75	0,00	0,00	6,73	0,00	0,00
M122	M122_4c_85	40,10	0,20	7,58	1,44	4,51	32,28	0,00	0,00	0,00	3,41	2,72	0,86	0,00	0,00	6,90	0,00	0,00
M122	M122_1b_8	42,15	0,41	10,72	1,15	4,53	30,20	0,00	0,00	0,00	2,33	4,03	0,56	0,00	0,00	3,93	0,00	0,00
M122	M122_2c_35	44,34	0,17	4,03	1,63	5,34	35,18	0,00	0,00	0,00	3,61	2,61	0,76	0,00	0,00	2,33	0,00	0,00
M122	M122_1a_7	44,36	0,37	2,66	1,43	5,60	33,32	0,00	0,00	0,05	3,55	4,50	0,62	0,00	0,00	3,53	0,00	0,00
M122	M122_2b_34	43,56	0,20	3,80	1,70	5,60	34,11	0,00	0,00	0,00	3,83	2,94	0,94	0,00	0,00	3,32	0,00	0,00
M122	M122_5a_109	41,73	0,18	6,11	1,64	5,63	31,54	0,00	0,00	0,00	3,94	3,10	0,98	0,00	0,00	5,16	0,00	0,00
M122	M122_1c_9	41,88	0,45	5,31	1,39	5,82	33,06	0,00	0,00	0,00	3,53	4,89	0,82	0,00	0,00	2,84	0,00	0,00
M122	M122_5b_110	47,83	0,25	6,77	1,22	5,97	28,98	0,05	0,17	0,00	3,18	2,39	0,76	0,00	0,00	2,23	0,00	0,19
11003	11003_1a_13	30,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	67,59	0,80	0,47
11003	11003_3c_65	41,42	0,82	0,00	1,03	3,69	35,30	0,00	0,00	0,00	4,09	11,23	0,37	0,00	0,00	2,04	0,00	0,00
11003	11003_2b_40	33,78	0,00	0,00	0,00	2,15	17,13	0,00	0,30	0,40	0,39	1,28	0,00	0,00	0,00	41,53	2,08	0,96
11003	11003_2a_39	43,47	0,82	0,00	1,76	3,96	36,91	0,00	0,00	0,00	3,78	7,49	0,29	0,00	0,00	1,53	0,00	0,00
11003	11003_3a_63	42,10	0,71	0,00	0,88	3,82	41,27	0,12	0,00	0,00	4,60	5,45	0,21	0,00	0,00	0,85	0,00	0,00
2610	2610_3b_61	28,76	0,00	17,38	3,00	0,08	23,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,42	0,00	0,00	0,00	26,66	0,43	0,00
2610	2610_3c_62	29,17	0,00	17,54	3,02	0,10	23,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,48	0,10	0,00	0,00	26,06	0,48	0,00
2610	2610_5b_113	30,92	0,00	16,25	2,69	0,10	24,65	0,14	0,04	0,00	0,00	0,83	0,00	0,00	0,00	23,22	0,78	0,40
2610	2610_2a_36	29,79	0,00	19,80	3,11	0,13	23,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,45	0,00	0,00	0,00	22,27	0,33	0,35
2610	2610_2b_37	28,89	0,00	21,13	3,09	0,14	24,43	0,06	0,00	0,00	0,00	0,59	0,00	0,00	0,00	21,05	0,38	0,23
2610	2610_1a_10	29,26	0,00	20,04	3,42	0,18	24,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,46	0,00	0,00	0,00	21,23	0,48	0,00
2610	2610_2c_38	29,13	0,00	1,78	0,20	0,18	5,88	0,00	0,00	0,12	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	61,42	0,59	0,52
2610	2610_1c_12	20,56	0,00	22,72	2,38	0,31	17,30	0,00	0,00	0,00	0,09	0,71	0,00	0,00	0,00	35,93	0,00	0,00
8374	8374_2b_46	44,09	0,33	1,35	2,40	4,19	32,45	0,00	0,00	0,00	3,97	9,09	0,58	0,00	0,00	1,41	0,00	0,15
8374	8374_5b_118	44,23	0,33	1,57	1,74	4,84	33,73	0,00	0,09	0,00	4,01	8,24	0,52	0,00	0,00	0,71	0,00	0,00
8374	8374_5a_117	43,86	0,35	1,67	1,63	4,94	34,60	0,00	0,00	0,00	4,09	7,53	0,55	0,00	0,00	0,79	0,00	0,00
8374	8374_1c_20	43,65	0,42	1,00	1,66	5,35	34,51	0,00	0,00	0,00	4,35	7,50	0,57	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00

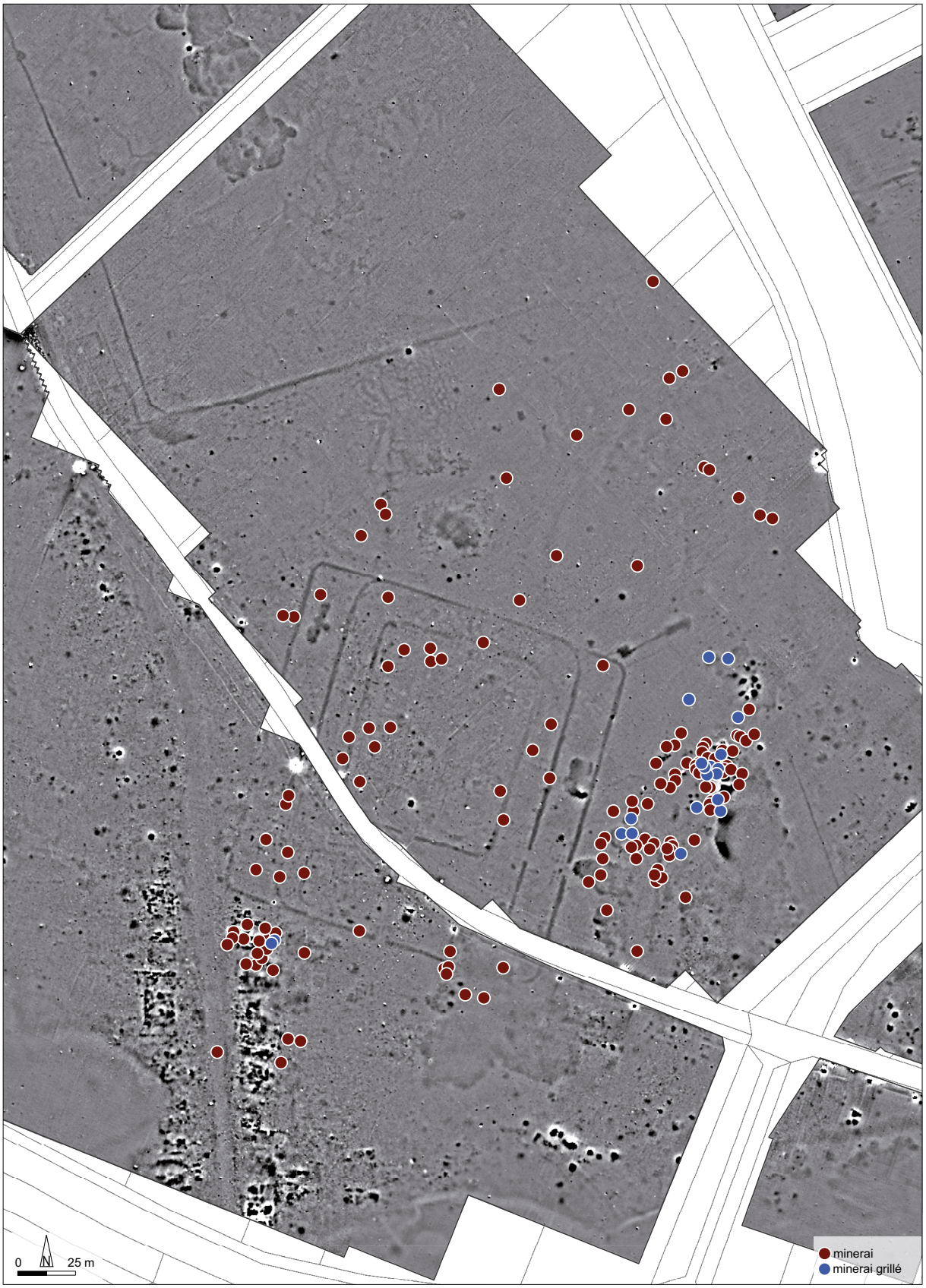
Tab. 13a : Résultats bruts des analyses MEB-EDS des inclusions de scories piégées dans les barres M122 et 8374, et dans les gromps 2610 et 11003

Echantillon	n° inclus	LA-ICP-MS											
		Ce	Eu	Hf	La	Nb	Nd	Pr	Sm	U	Y	Yb	Cs
M122	M122_5c_111	66,533778	12,562721	2,994357	34,835486	4,926002	34,089589	8,336359	8,007734	14,399530	65,795016	4,928768	19,778696
M122	M122_4a_84	83,141393	20,110365	3,658390	46,094255	3,873362	47,799676	11,176091	11,728764	17,666398	98,712526	6,952915	17,358225
M122	M122_4c_85	108,506427	25,793356	5,181185	60,489156	0,968791	64,575698	14,918708	15,513089	25,333608	138,051080	9,874643	27,838340
M122	M122_1b_8	77,104263	16,596438	4,353166	41,542527	2,003132	43,303037	10,328356	10,207451	17,019164	73,070500	5,624399	12,146173
M122	M122_2c_35	103,126546	26,682797	4,972469	56,809196	0,842990	61,572352	14,314578	15,114622	25,008802	130,904014	9,473113	27,476808
M122	M122_1a_7	78,286044	16,079290	4,383853	42,582916	11,375305	44,325451	10,428867	10,472173	16,464954	74,778515	5,724838	8,029639
M122	M122_2b_34	108,604718	27,392694	5,265214	58,970213	1,459075	63,985867	14,988590	15,607581	26,233184	133,582260	9,809796	26,678518
M122	M122_5a_109	88,928162	19,251712	3,820818	46,722818	26,405132	47,378039	11,422686	11,396989	20,692700	94,009045	6,780530	18,188288
M122	M122_1c_9	87,945367	18,637805	4,806148	47,079897	2,052015	48,921438	11,674642	11,660906	19,160278	82,611793	6,413907	14,571316
M122	M122_5b_110	78,121855	14,625632	3,472513	39,930556	3,496356	39,357921	9,707490	9,276445	17,581339	75,152476	5,675886	24,743514
11003	11003_1a_13	0,660729	0,016197	0,067082	0,316728	0,104746	0,271527	0,071229	0,056411	0,029703	0,262428	0,026780	0,019555
11003	11003_3c_65	7,462135	0,310621	0,085777	13,902398	8,312940	3,474980	1,214129	1,204829	2,558880	7,559388	0,451912	3,441796
11003	11003_2b_40	14,141061	0,275091	1,449772	7,065071	0,459953	6,134031	1,588140	1,256561	0,700078	5,912371	0,603523	0,393229
11003	11003_2a_39	32,563835	0,743756	3,068251	16,232648	1,043090	13,732686	3,615242	2,730357	1,459451	13,198437	1,338331	0,825803
11003	11003_3a_63	31,363111	0,662913	3,335313	15,742992	2,526123	13,351706	3,495780	4,112165	1,515285	13,110955	1,350085	1,317906
2610	2610_3b_61	1,808341	0,397265	0,521397	6,678511	3,813307	1,192546	0,355323	1,508106	0,408862	3,993408	0,847369	5,867115
2610	2610_3c_62	0,573275	0,142612	0,142713	1,997879	2,442796	0,413277	0,118248	0,550213	0,073105	2,375472	0,680586	1,507306
2610	2610_5b_113	1,674914	0,300844	0,521135	6,203089	2,522520	0,840496	0,276528	1,107721	0,372107	2,583125	0,600767	6,495458
2610	2610_2a_36	0,223831	0,077486	0,119260	1,066074	1,590023	0,208827	0,053768	0,272779	0,039495	1,703941	0,511830	0,828679
2610	2610_2b_37	0,147101	0,060529	0,030434	0,445691	1,607899	0,172399	0,035963	0,212754	0,015308	1,710441	0,465362	0,221453
2610	2610_1a_10	12,758971	2,671717	5,367821	63,999989	35,583788	14,213285	2,504511	28,309991	7,338103	30,259514	0,960576	46,370905
2610	2610_2c_38	0,055987	0,019348	0,015818	0,287227	0,396528	0,048287	0,012658	0,070857	0,012402	0,424797	0,128015	0,204611
2610	2610_1c_12	0,526737	0,138543	0,125960	1,326696	1,729155	0,325494	0,102125	0,589145	0,103888	1,511299	0,301388	0,568787
8374	8374_2b_46	61,546904	8,150235	4,198814	32,197811	0,751068	30,632485	7,641260	6,863165	12,398091	48,536082	3,561719	3,846907
8374	8374_5b_118	71,810683	9,393292	4,898878	38,054633	0,454383	36,369789	8,995736	8,310843	15,335740	58,435195	4,161923	3,556378
8374	8374_5a_117	71,364836	8,965663	4,595698	37,409231	1,030253	35,781104	8,935741	8,211691	14,931899	57,992345	4,116919	3,310619
8374	8374_1c_20	76,509399	9,946538	4,814561	39,581657	0,683481	37,505994	9,495099	8,361366	16,147102	57,625251	4,154723	3,392478

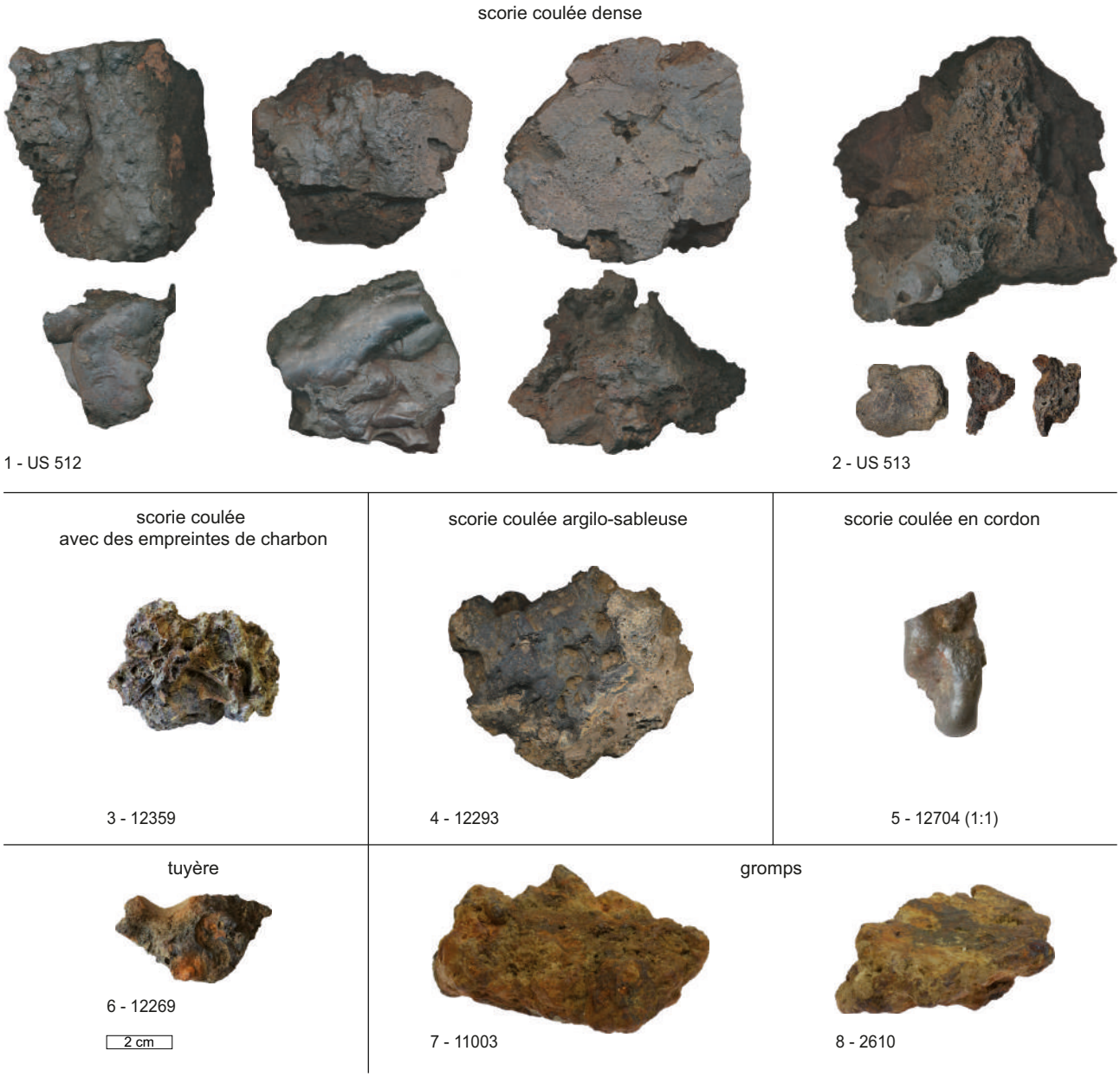
Tab. 13b : Résultats bruts des analyses LA-ICP-MS des inclusions de scories piégées dans les barres M122 et 8374, et dans les gromps 2610 et 11003



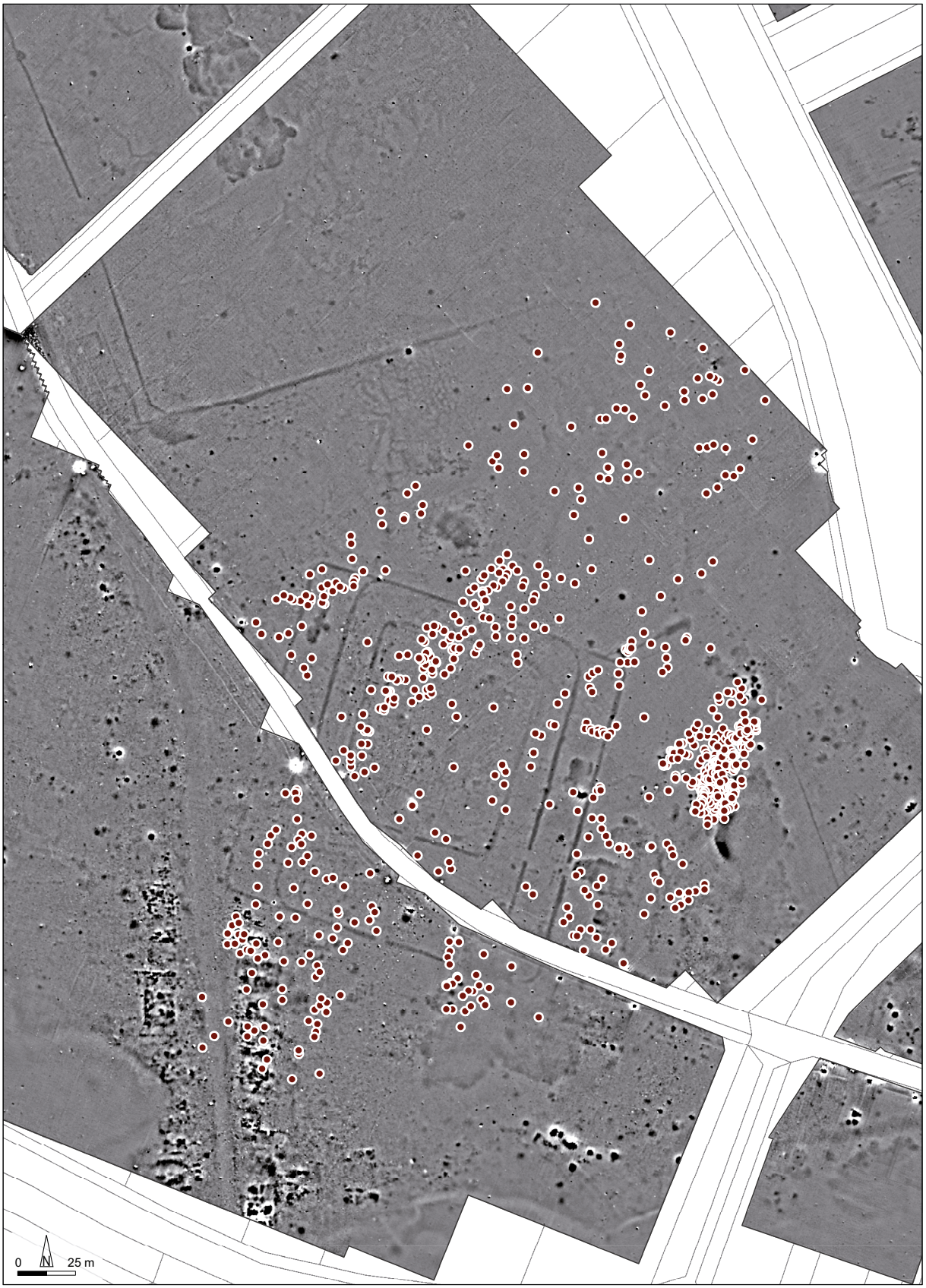
Pl. 51 : Strebersdorf. Localisation des éléments de construction métallurgiques par rapport aux camps et à la zone des fours à l'est des camps



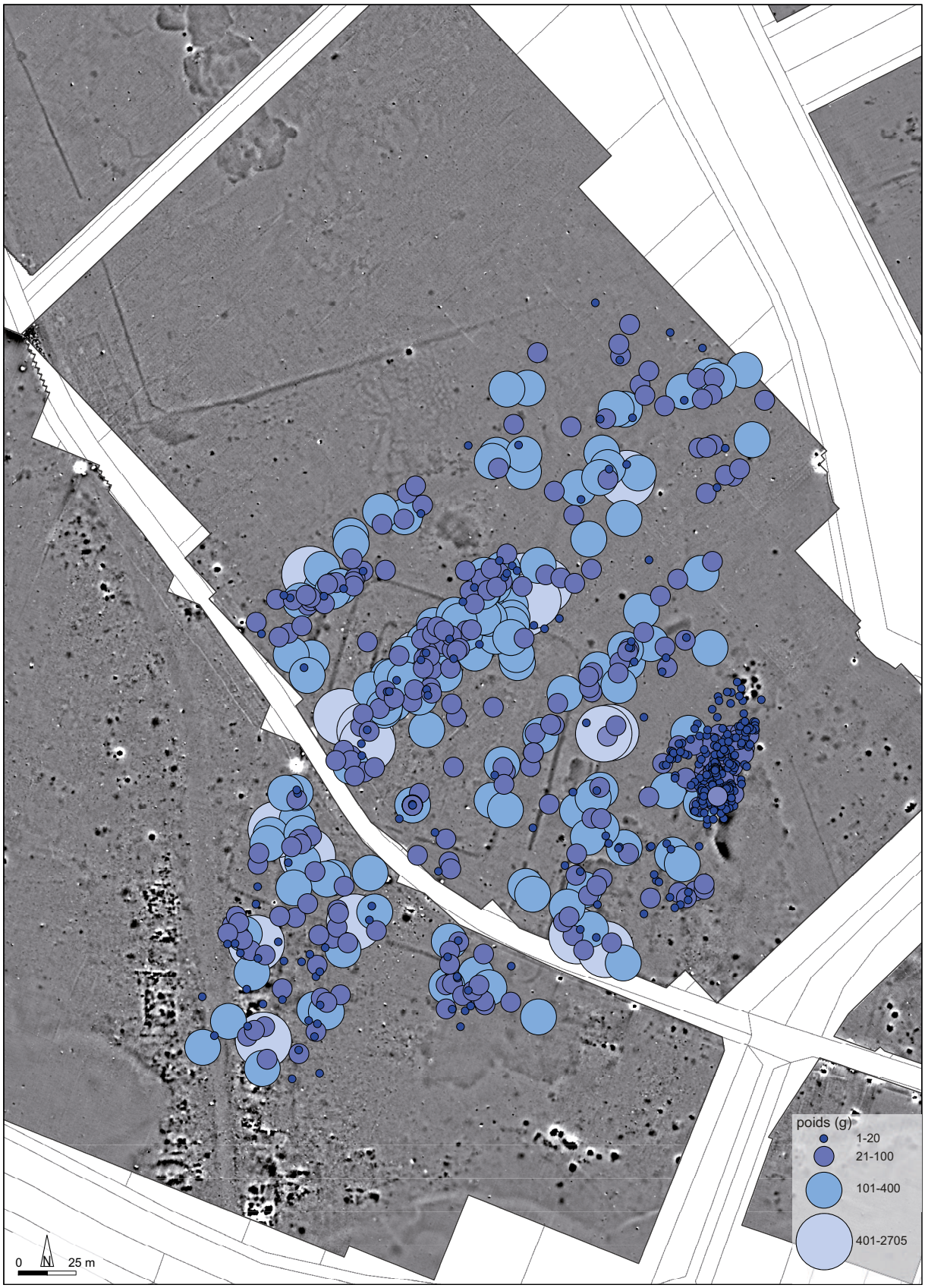
Pl. 52 : Strebersdorf. Répartition spatiale des minerais et des minerais grillés



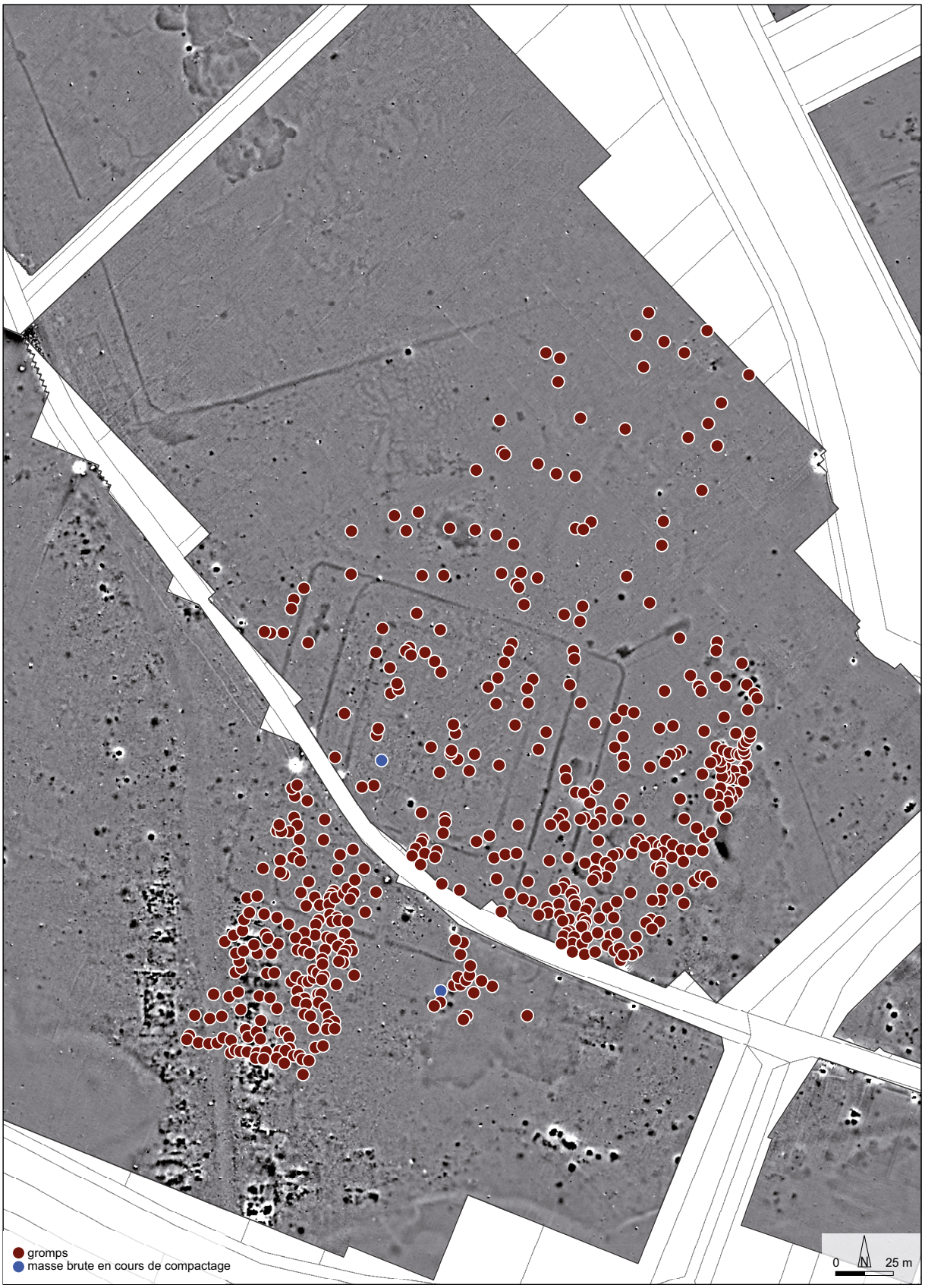
Pl. 53 : 1-2 – Strebersdorf. Exemple de scorie coulée dense (US 512 et US 513). 3 – Exemple de scorie coulée avec des empreintes de charbon (scorie 12359). 4 – Exemple de scorie coulée argilo-sableuse (scorie 12293). 5 – Exemple de scorie coulée en cordon (scorie 12704). 6 – Exemple de tuyère (scorie 12269). 7-8 – Exemples de gromps (échantillons 11003 et 2610)



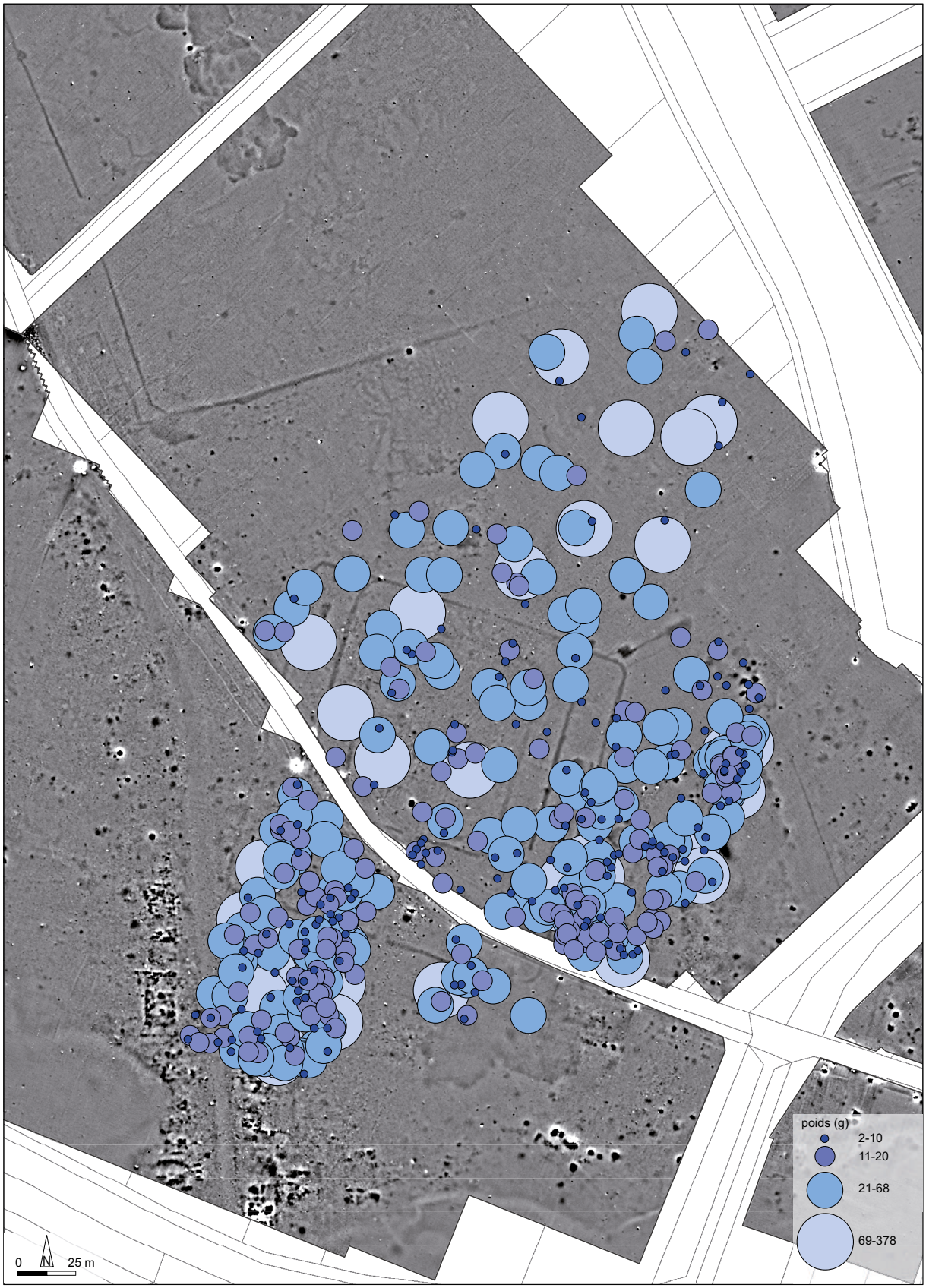
Pl. 54 : Strebersdorf. Localisation des scories coulées en fréquence



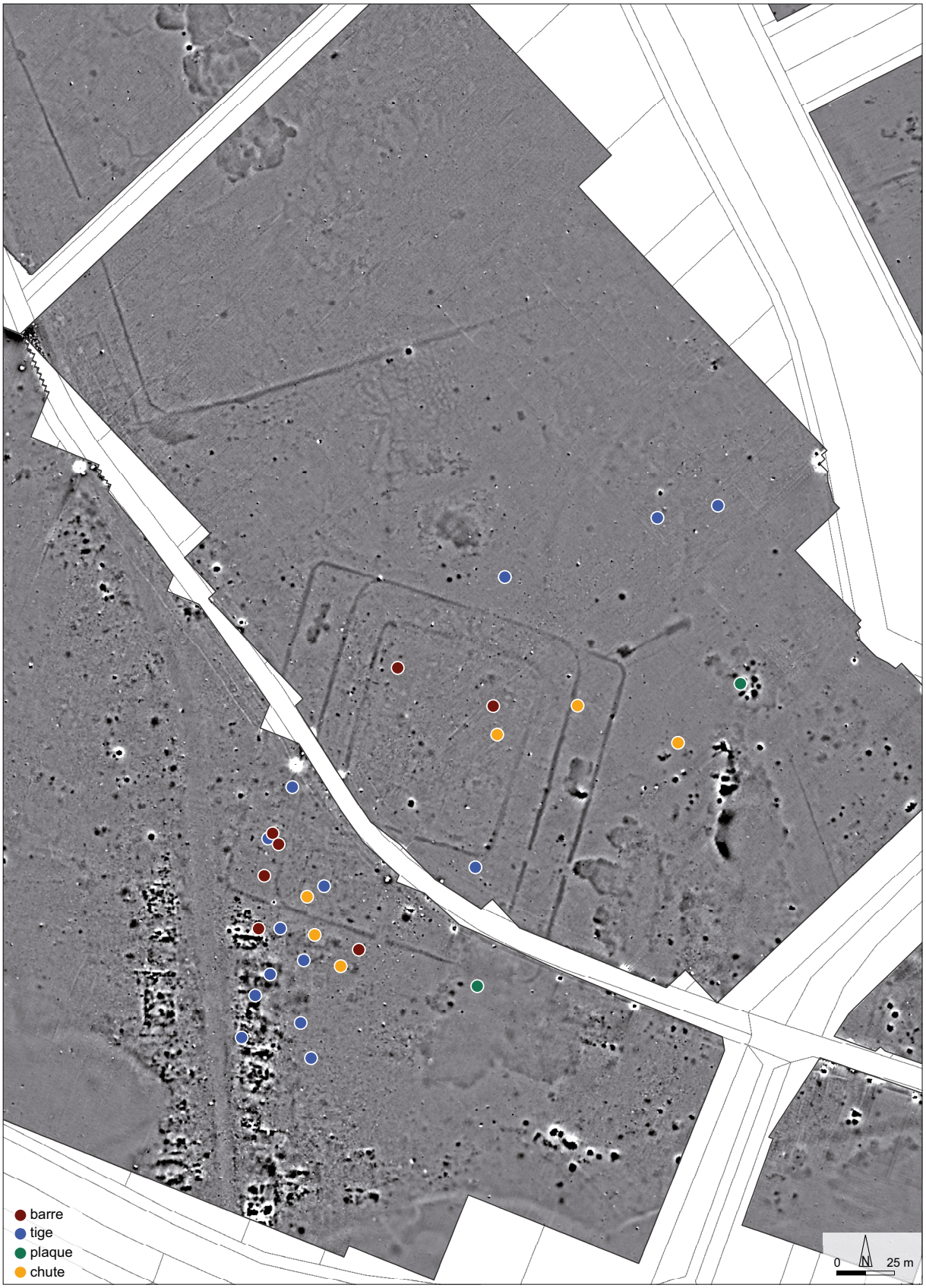
Pl. 55 : Strebersdorf. Localisation des scories coulées par classe de masse



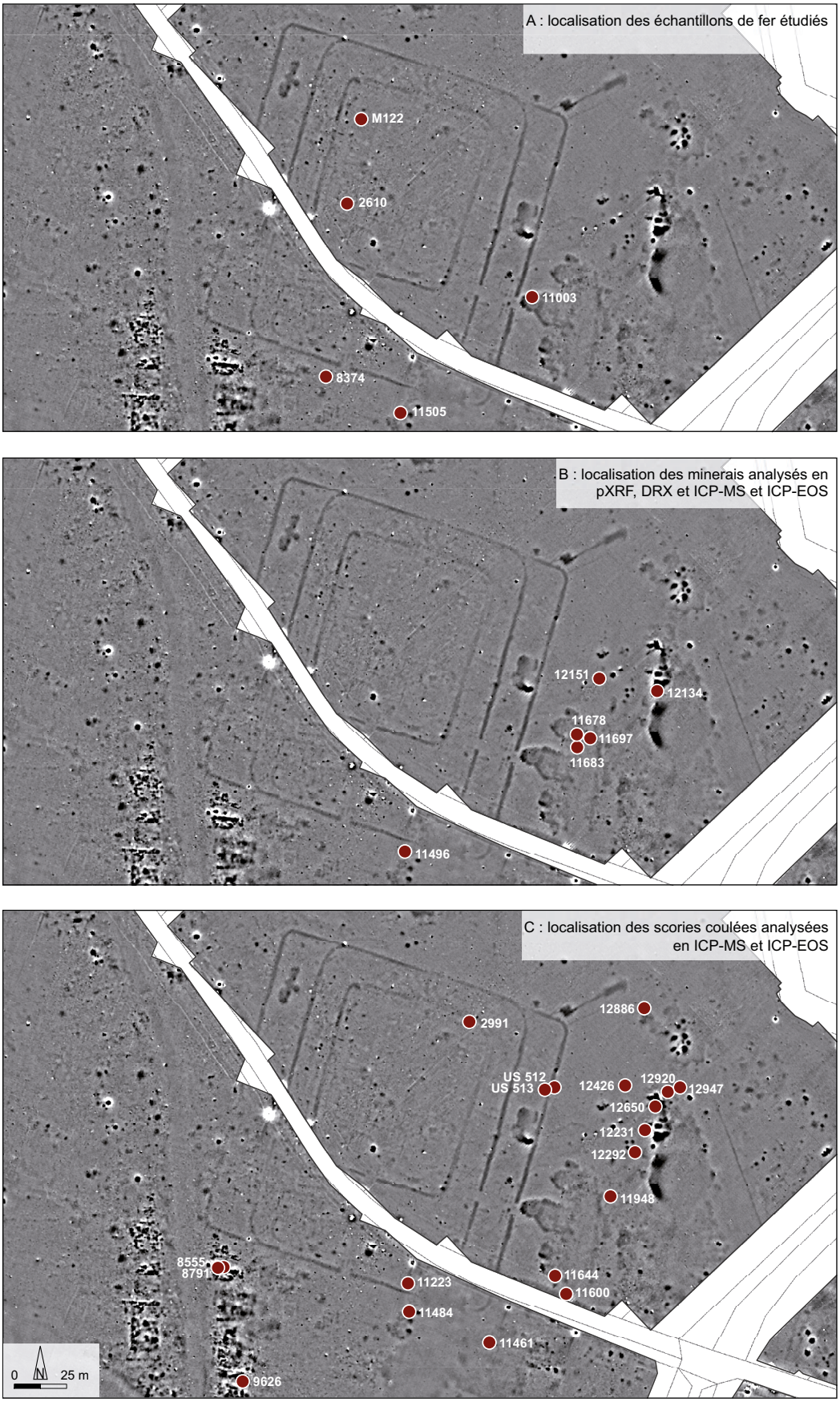
Pl. 56 : Strebersdorf. Localisation des gromps en fréquence



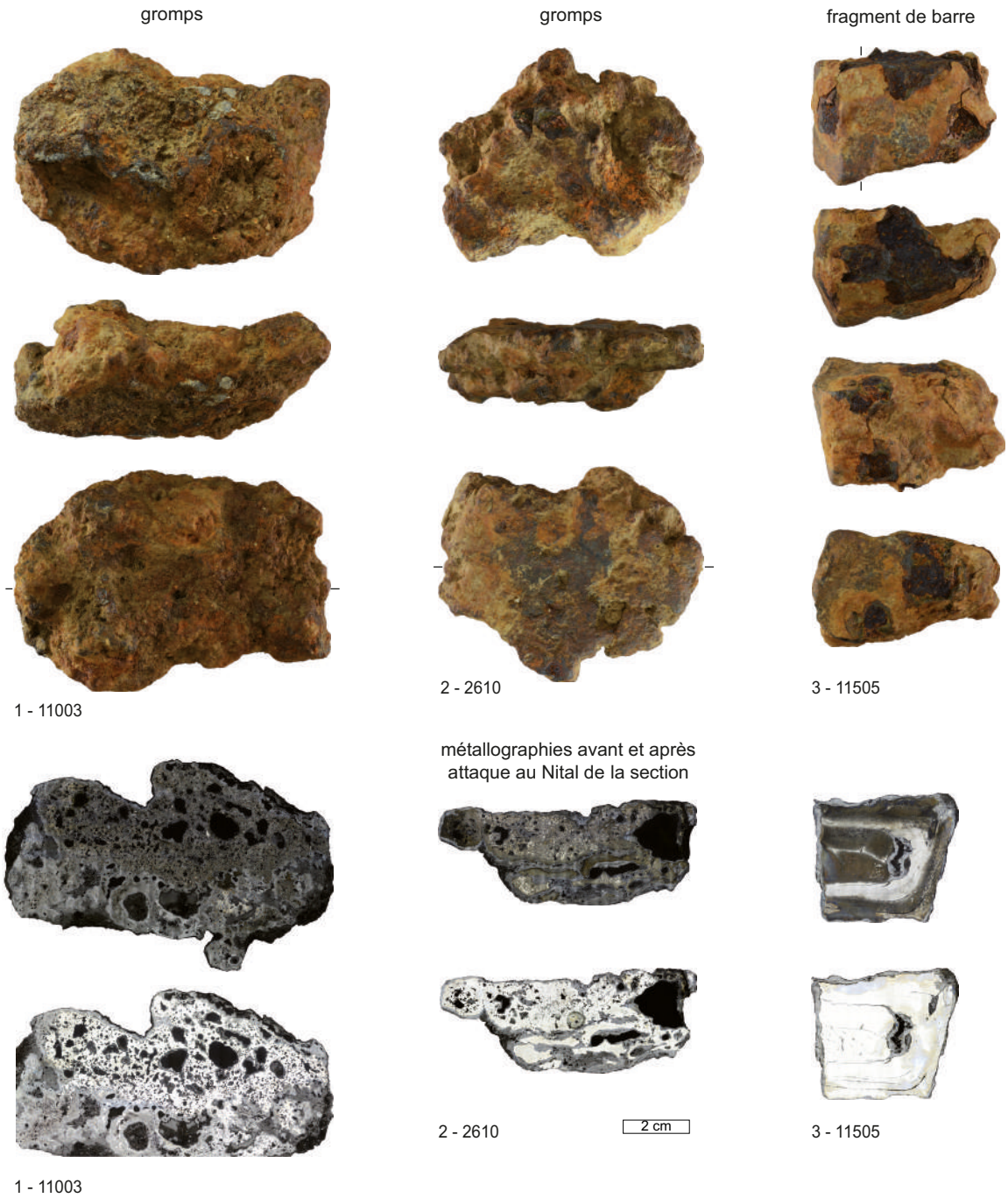
Pl. 57 : Strebersdorf. Localisation des gromps en masse



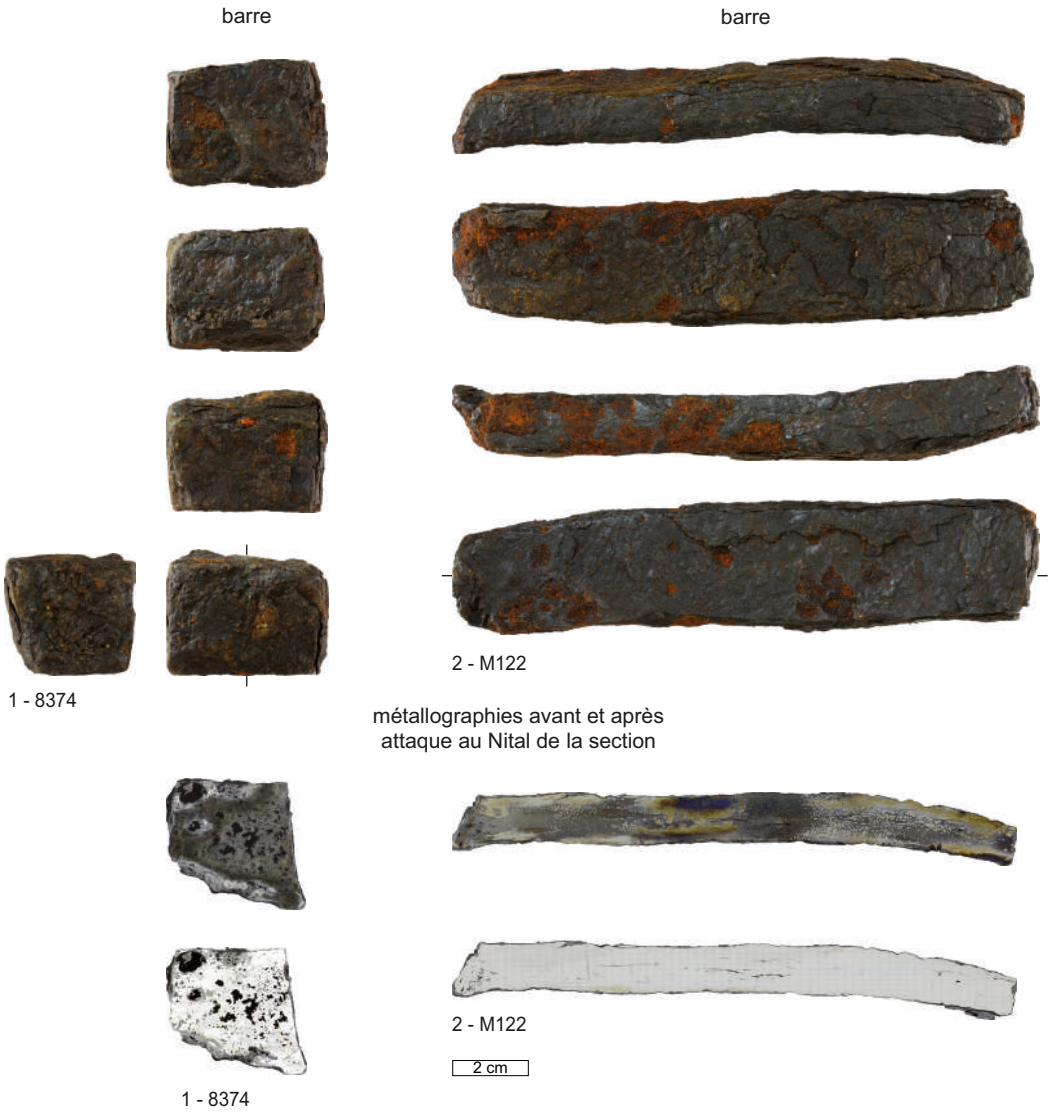
Pl. 58 : Strebersdorf. Localisation des barres et des tiges découvertes



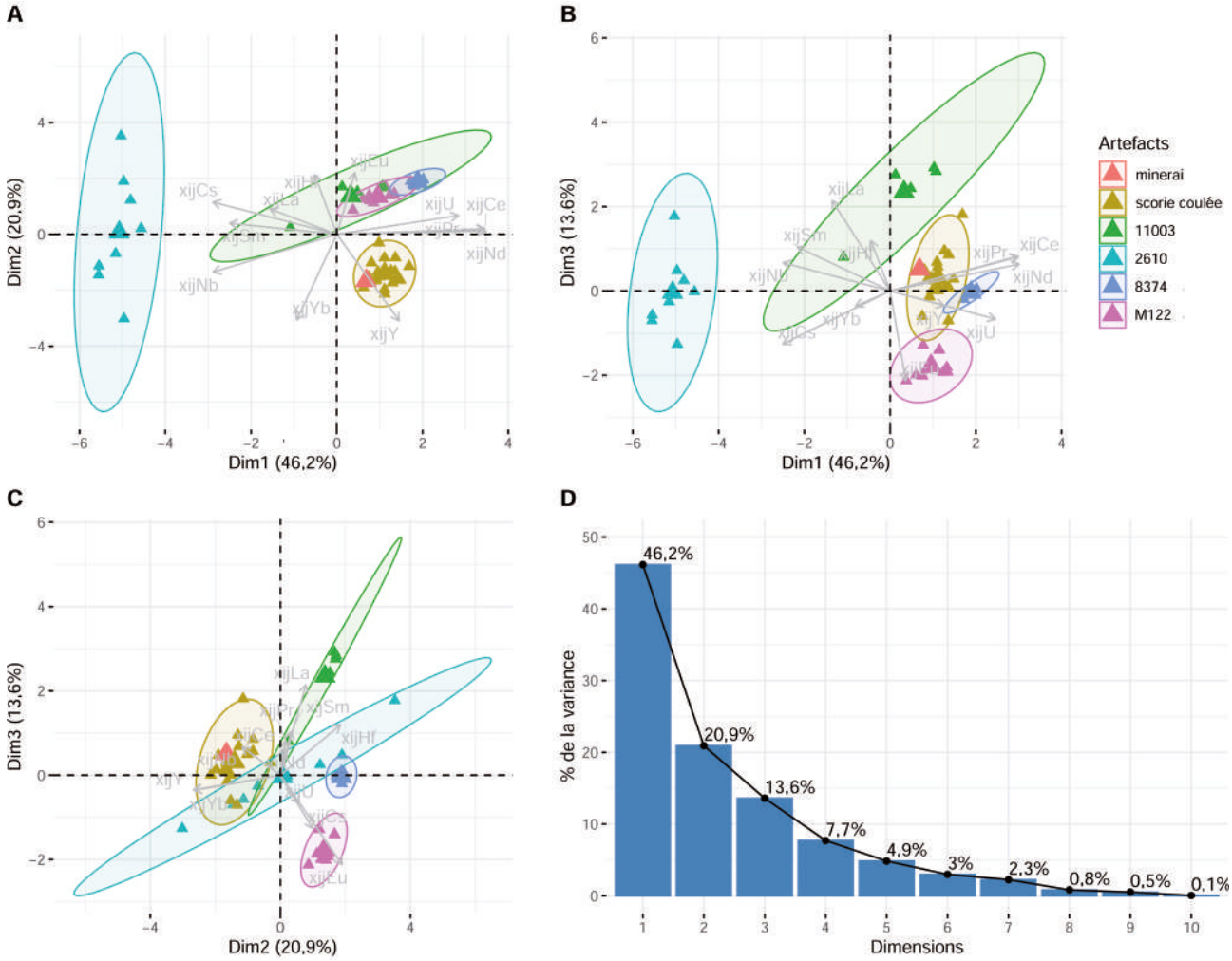
Pl. 59 : Strebersdorf. A – Localisation des échantillons de fer étudiés. B – Localisation des minerais analysés en pXRF, DRX et ICP-MS et ICP-EOS. C – Localisation des scories coulées analysées en ICP-MS et ICP-EOS



Pl. 60 : Macrographies et métallographies avant et après attaque au Nital de la section
1 – Gromps 11003. 2 – Gromps 2610. 3 – Barre 11505



Pl. 61 : Strebersdorf. Macrographies et métallographies avant et après attaque au Nital de la section.
1 – Barre 8374. 2 – Barre M122



Pl. 62 : Strebersdorf. Analyse en Composantes Principales (ACP) à partir des 12 éléments traces sélectionnés des analyses des échantillons ferreux, des scories et du minerai analysés