

Des outils de métallurgistes dans le Bronze ancien de Bretagne ?

Révéler le rôle du macro-outillage lithique en associant analyses tracéologiques et de spectroscopie de fluorescence X

Caroline HAMON, Solenn REGUER, Vérane BRISOTTO, Cécile LE CARLIER DE VESLUD,
Klet DONNART, Stéphane BLANCHET, Yvan PAILLET, Yoann ESCATS, Ludovic BELLOT-GURLET

Résumé : La question de l'émergence et du développement des métallurgies du cuivre et du bronze constitue un enjeu majeur pour aborder les dynamiques culturelles et économiques de la fin du Néolithique et du début de l'âge du Bronze dans l'Ouest de l'Europe. Pour autant, les vestiges d'activités minières comme d'ateliers de productions métallurgiques restent particulièrement indigents à l'échelle de la façade atlantique pour le Bronze ancien, en particulier dans le Massif armoricain. Cet article présente les résultats menés en combinant analyse tracéologique et analyses élémentaires par spectroscopie de fluorescence des rayons X (XRF) sur une série d'outils macrolithiques issus de cinq sites de la péninsule armoricaine. Elles mettent en évidence l'utilisation d'outils de concassage, de marteaux et d'aiguilleurs pour le travail d'objets en alliage cuivreux à toutes les étapes de la chaîne opératoire de production et de transformation du métal (production, mise en forme, entretien). L'identification de différents types d'outils de métallurgistes, pour certains spécialisés, interroge sur la représentation de cette activité dans une large variété de contextes du début de l'âge du Bronze. Elle pose également la question de la segmentation des étapes de la chaîne opératoire dans le temps et l'espace, en particulier entre les zones d'extraction, la métallurgie primaire visant à la production de métal et la métallurgie secondaire dédiée à la mise en forme voire à la finition des objets. Les différents contextes d'occupation dont ces outils sont issus laissent envisager une production d'alliage cuivreux qui malgré sa discrétion dans les vestiges archéologiques, devaient sans doute être plus importante qu'initialement envisagée.

Mots-clés : métallurgie, cuivre, outillage lithique, âge du Bronze ancien, Bretagne, tracéologie, fluorescence des rayons X, spectroscopie XRF portable, rayonnement synchrotron.

Abstract: The question of the emergence and development of copper and bronze metallurgies is a major issue in addressing the cultural and economic dynamics of the late Neolithic and early Bronze Age in Western Europe. This phenomenon is particularly relevant along the Atlantic coast, where the Armorican peninsula is central for better understanding how the control of these new productions contributed to the emergence of new elites and their chiefs, notably within the Armorican Tumulus culture (2150-1750 BC).

However, evidence of Early Bronze Age mining activities and metallurgical production workshops remains scarce on the Atlantic coast, particularly in the Armorican Massif. The rare sources of copper ore are generally poor which have long suggested that the presence of metallic objects discovered in the rich burials of these periods, in particular in the tumuli of the Early Bronze Age, could only be the result of imports over more or less long distances. Recent work on the composition of some Armorican bronze objects has also highlighted a close proximity to ores from Ross Island in Ireland, suggesting that ores or ingots were imported from other regions, including across the Channel. Other works have nevertheless underlined that the exploitation of local copper veins could be envisaged in the Armorican Massif, especially as copper objects appear to concentrate in this area. Therefore, the discovery of direct or indirect evidence of copper metallurgy, particularly on settlement sites, is crucial for these periods. The presence of rare crucibles, moulds and ingots, as well as hearth structures and even furnaces, are precious clues for identifying possible episodes of metallurgical production. Stone tools constitute a second group of clues attesting metallurgical production throughout the Bronze Age, since they are now known to have been used at different stages of the operating chain, from the extraction and transformation of ores to the shaping and finishing of metal objects by hammering and abrading.

This paper presents the results of a combination of use-wear and elementary X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) analysis of a series of macrolithic tools from the Armorican Peninsula. The analyzed corpus comes from five sites in

Britany dated by their pottery or by radiocarbon dating to the Early Bronze Age: it includes a settlement enclosure (Bel air, Lannion), an island settlement (Beg ar Loued, Molène) as well as less structured occupations however characteristic of the period (Kersulec, Plonéour-Lanvern; la Colignière, Trémuson; ZAC Kerisac, Plouisy). They illustrate the diversity of the contexts encountered dating to this period in the western part of the Armorican peninsula. For each of the sites, several tools were selected from a larger corpus of macrolithic tools, based on criteria of the raw materials, type of active surfaces and nature of the use-wear traces. The assemblage includes 19 macrolithic tools: 3 crushing-grinding tools, 2 tools with cupules, 1 pestle, 2 anvils, 3 hammerstones, 1 percussion or crushing tool, 3 heaps, 3 hammers and finally 2 sharpeners.

The functional analysis method is based on the combination of the results of a low and high magnification use-wear analysis and elementary X-ray fluorescence (XRF) analyses, with two implemented measurement methods: portable X-ray fluorescence spectrometer (pXRF) and X-ray fluorescence mapping under Synchrotron radiation (Sy-XRF). The use-wear analysis alone therefore made it possible to exclude metallurgical use for 3 of the 13 tools analyzed, the other 10 tools showing traces at least linked to the working of mineral materials, with three quarters of them showing a combination of traces strongly suggesting the working of ore or metal. The combination of the use-wear and XRF analyses allows us to propose a use for ore processing or the transformation of metallic materials for 8 of these 10 tools. This result underlines that the hypotheses formulated following the use-wear analysis are well supported by the elementary residue analyses. The p-XRF analysis is able to detect copper residues even in relatively small quantities and to detect the heavier elements, such as tin. An average quantification is obtained, representing an analytical area of about 3 mm. Furthermore, the analytical precision permitted by Sy-XRF analysis, thanks in particular to the elemental distribution maps, with a selected resolution of a few tens of micrometers, makes it possible to distinguish chemical elements from the minerals making up the heterogeneous rocks generally used for macro-tools from the residues of processed materials that had caught on the surface. It also shows the correlations between the elementary distributions and the areas showing the traces of use. Due to the implementation modalities, the complementarity and concordance of the results of the Sy-XRF and p-XRF analyses with regard to the detection of copper residues is therefore stressed here.

These analyses highlight the use of crushing tools, hammers and sharpeners for the working of copper alloy objects at all stages of the metal production and processing chain (production, shaping, maintenance). The identification of different types of metallurgists' tools, some of them specialized, raises questions about the representation of this activity in a wide variety of Early Bronze Age contexts. It also underlines the question of the division of the operating chain in time and space, in particular between the extraction areas, primary metallurgy aimed at metal production and secondary metallurgy dedicated to the shaping or even finishing of the objects. The different occupation contexts from which these tools originate suggest a production of copper alloys, which despite its discretion in the archaeological record, must undoubtedly have been more important than initially envisaged. The presence of such tools in Armorican funerary contexts for the Early Bronze Age echoes these results.

Keywords: metallurgy, copper, lithic tools, early Bronze age, Brittany, use-wear analysis, X-ray fluorescence, portable XRF spectrometry (pXRF), Synchrotron radiation (Sy-XRF).

La question de l'émergence et du développement des métallurgies du cuivre et du bronze constitue un enjeu majeur pour aborder les dynamiques culturelles et économiques de la fin du Néolithique et du début de l'âge du Bronze dans l'Ouest de l'Europe. À partir du milieu du 3^e millénaire BC, cette innovation technique, portée notamment par les populations campaniformes (2500-2150 BC), a profondément restructuré une partie des réseaux de circulation des populations et d'échanges de biens, intégrant désormais minerais et mobiliers métalliques. L'expression la plus visible de ces transformations est directement observable dans le mobilier archéologique des sépultures d'« artisans » de cette période (Butler et van der Waals, 1966-67 ; Batora, 2002 ; Turek, 2004 ; Fitzpatrick, 2011). Les éléments de parure, pointes de flèche de type Palmela et poignards au Campaniforme, puis poignards et haches en alliage cuivreux au début de l'âge du Bronze, constituent l'essentiel des objets métalliques produits et diffusés durant ces périodes. Ce phénomène trouve un écho particulier le long de la façade atlantique, où la péninsule armoricaine constitue un territoire central pour mieux cerner comment la maîtrise puis le contrôle de ces nouvelles productions ont contribué à l'émergence de nouvelles

élites, voire de chefs, notamment au sein de la culture des Tumulus armoricains (2150-1750 BC), mais également de la culture de Wessex dans le sud de l'Angleterre avec laquelle elle entretient des liens étroits (Needham, 2009 ; Nicolas, 2016 ; Marcigny *et al.*, 2017).

Pour autant, les vestiges d'activités minières comme d'ateliers de productions métallurgiques restent particulièrement indigents à l'échelle de la façade atlantique pour le Bronze ancien (Pernot, 1998 ; Roberts et Frieman, 2015), et en particulier dans le Massif armoricain (Gandois *et al.*, 2019a). La rareté et la pauvreté des minerais de cuivre ont longtemps suggéré que la présence d'objets métalliques découverts dans les riches sépultures de ces périodes, en particulier dans les tumuli du début de l'âge du Bronze, ne pouvait que résulter d'importations à plus ou moins longues distances. De récents travaux sur la composition de certains objets armoricains en bronze ont par ailleurs souligné une étroite proximité avec les minerais de Ross Island en Irlande (O'Brien, 2015), suggérant que minerais ou lingots avaient été importés d'autres régions, y compris de l'autre côté de la Manche (Gandois *et al.*, 2019b). D'autres travaux ont néanmoins souligné que l'exploitation de filons de cuivre très localisés pouvait être envisagée dans le Massif armoricain, d'autant que les concen-

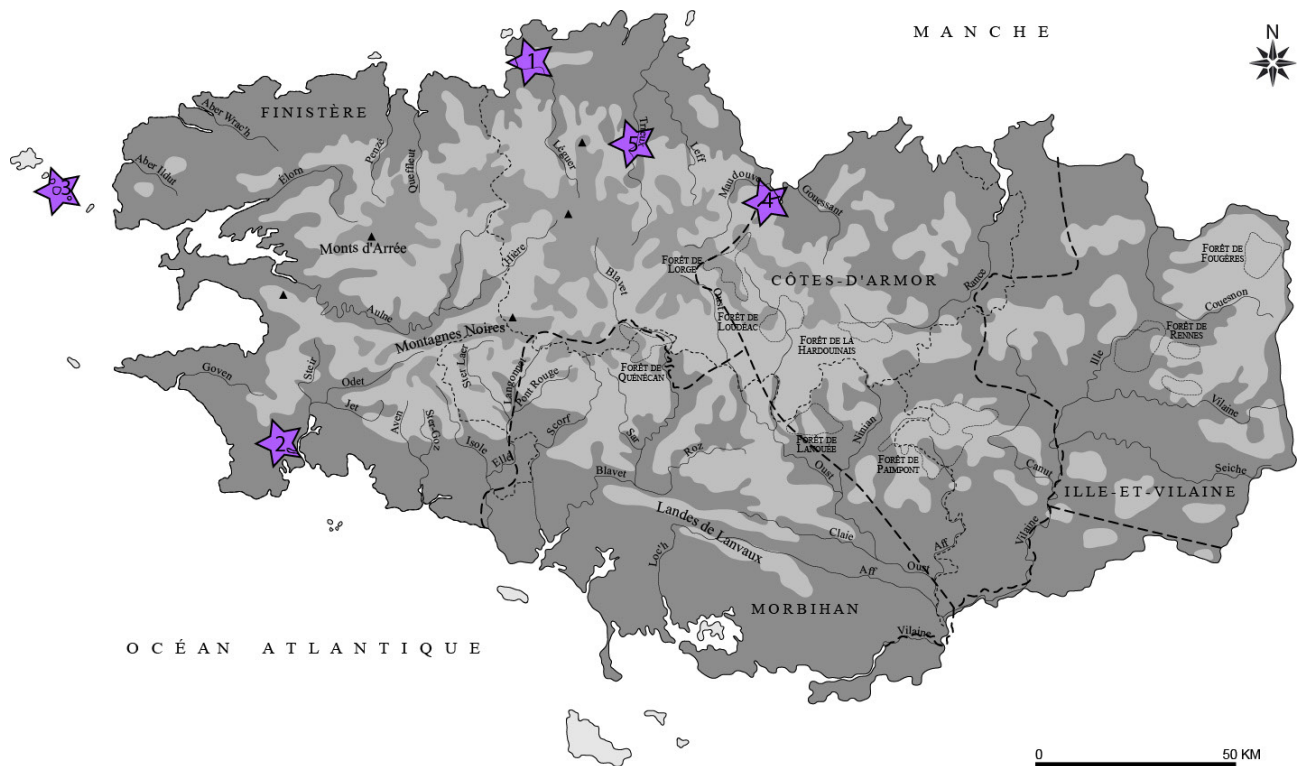


Fig. 1 – Carte de localisation des sites du corpus analysé : 1, Bel Air à Lannion ; 2, Kersulec à Ploneour-Lanvern ; 3, Beg-ar-Loued à Molène ; 4, La Colignière à Trémuson ; 5, ZAC Kerisac à Plouisy.

Fig. 1 – Location map of the sites selected for our analysis: 1, Bel air in Lannion; 2, Kersulec in Ploneour-Lanvern; 3, Beg-ar-Loued in Molène; 4, La Colignière in Trémuson; 5, ZAC Kerisac in Plouisy.

trations d'objets en cuivre y apparaissent particulièrement importantes (Klassen *et al.*, 2007 ; Mille et Ard, 2011). L'exploitation même limitée des gisements d'étain est également à prendre en compte dans l'équation (Le Carlier *et al.*, 2017). La difficulté reste néanmoins d'identifier de telles exploitations d'ampleur limitée et possiblement perturbées par des exploitations plus récentes.

Dans ce contexte, la mise en évidence de témoins directs ou indirects de la métallurgie du cuivre, notamment sur les sites d'habitat, se révèle de fait cruciale pour ces périodes. Les rares creusets, moules et lingotières, de même que les structures foyères, voire les fours, constituent des indices précieux pour identifier d'éventuels épisodes de productions métallurgiques (Ambert *et al.*, 2011 ; Boutoille, 2012 ; Gandois *et al.*, 2019a). Les outils en pierre constituent un second groupe d'indices attestant une production métallurgique tout au long de l'âge du Bronze, puisque leur rôle est désormais identifié à différentes étapes de la chaîne opératoire, depuis l'extraction et la transformation des minerais (Timberlake *et al.*, 2007 ; Hamon *et al.*, 2009 ; O'Brien, 2015) jusqu'au façonnage puis à la finition des objets métalliques par martelage et abrasion (Delgado-Raack *et al.*, 2014 ; Boutoille, 2015 ; Hamon et Blanchet, 2015 ; Cousseran-Néré *et al.*, 2020).

Cet article présente les résultats d'une stratégie d'analyse sur un corpus d'outils macrolithiques issus de différents contextes du début de l'âge du Bronze dans la péninsule armoricaine. Elle combine analyse tracéologique et analyses élémentaires par spectroscopie de fluorescence des rayons X (XRF). La réalisation de ces analyses élé-

mentaires repose sur des mesures ponctuelles à l'aide d'instruments portables (pXRF) et sur des cartographies élémentaires réalisées sous rayonnement Synchrotron (Sy-XRF) de façon à mettre à profit leurs apports respectifs. En mobilisant approches technologiques et archéométriques, l'objectif est bien ici de contribuer à l'identification d'outils de métallurgistes, liés aux différentes étapes de production et d'entretien des outils métalliques, du concassage du minerai jusqu'à l'aiguisage des lames en passant par la mise en forme des objets. En fournissant de nouvelles clefs méthodologiques pour identifier les vestiges indirects de production métallurgique, ce travail contribue aux discussions sur les contextes dans lesquels elle a pu être pratiquée. Au delà des témoins directs qui attestent de la production métallurgique (fours, objets métalliques, moules, etc.), cette analyse contribue à rediscuter les contextes dans lesquels elle a pu être pratiquée, ainsi que son ampleur réelle pour les sociétés du début de l'âge du Bronze breton.

SITES ET CORPUS D'OUTILS MACROLITHIQUES SÉLECTIONNÉS

Le corpus analysé provient de cinq sites bretons datés du Bronze ancien, incluant une enceinte d'habitat, un habitat insulaire ainsi que des indices d'occupation bien moins structurés, mais caractéristiques de la période (fig. 1). Ils illustrent la diversité des contextes rencontrés

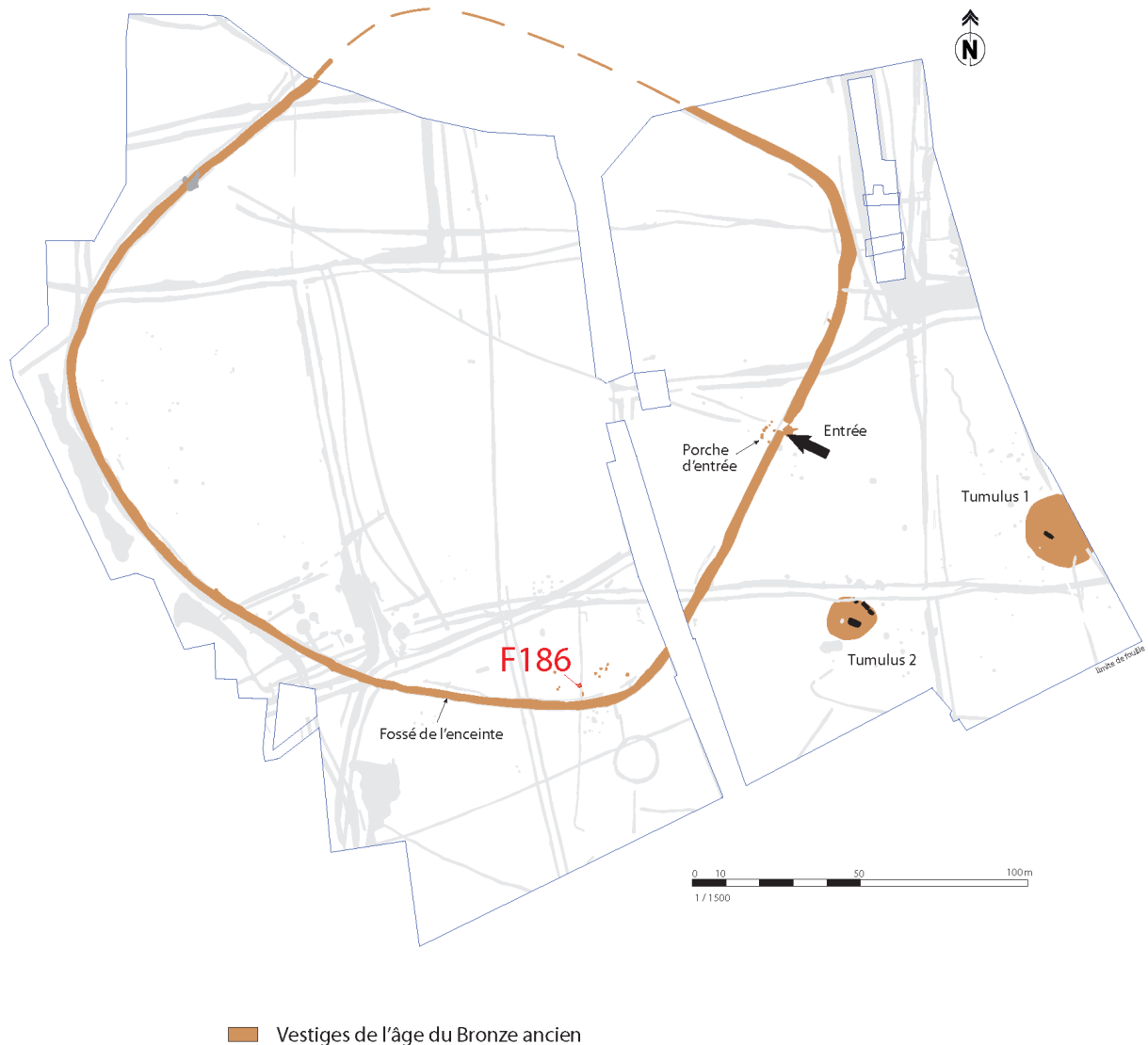


Fig. 2 – Lannion Bel Air : plan de l'enceinte de l'âge du Bronze ancien (Erwan Bouhris, Inrap, d'après Escats dir., 2016).

Fig. 2 – Lannion Bel Air: map of the Early Bronze age enclosure (Erwan Bouhris, Inrap, after Escats dir., 2016).

pour cette période dans la partie occidentale de la péninsule armoricaine. Pour chacun des sites, plusieurs outils ont été sélectionnés au sein d'un corpus d'outils macroolithiques plus conséquent, sur la base de critères de matières premières, de type de surfaces actives et de nature des traces d'utilisation observées macroscopiquement. Il s'agit là de la première étape de l'analyse fonctionnelle de ces outils, comprise comme un continuum analytique de la distribution, nature et combinaison des traces d'utilisation aux échelles macroscopiques et microscopiques.

L'enceinte de Bel-Air à Lannion (resp. Y. Escats, Inrap Côtes-d'Armor)

Le site de Bel-Air à Lannion (Côtes-d'Armor), a été fouillé sur près de 6 ha en 2010, suite à la découverte d'une importante occupation datée de l'âge du Bronze ancien (19^e s.-16^e s. avant notre ère) lors d'un diagnostic préalable réalisé en 2007 dans le cadre du développement d'une zone artisanale. Cette occupation est avant tout marquée par

une vaste enceinte fossoyée (fig. 2), ceinturant un espace d'environ 3,7 ha, associée à une nécropole constituée de deux tertres funéraires contemporains (Escats, 2013). Cet ensemble présente un caractère ostentatoire qui confère à ce site un statut particulier, pouvant indiquer la présence d'une communauté importante, voire d'une chefferie.

L'enceinte de Bel-Air, de forme sub-quadrangulaire, est délimitée par un fossé assez marqué, d'une largeur de 2 à 3 m à l'ouverture pour une profondeur conservée sur 1,30 à 1,90 m. L'accès principal de l'enceinte est situé sur son flanc oriental, comme en témoigne l'interruption du fossé sur une longueur d'environ 3,50 m. Une superstructure portée par des poteaux accolés au bord interne du fossé, en décalage avec l'accès initial, marquait vraisemblablement une seconde phase d'aménagement d'entrée. L'espace interne de l'enceinte n'a livré que peu d'indices d'occupation, seule une quarantaine d'éléments (trous de poteau, fosses) ont été reconnus ; le mobilier récolté conduit toutefois à considérer ces aménagements comme contemporains de l'enceinte.



Fig. 3 – Lannion Bel Air : découverte des outils macrolithiques dans la fosse 186 de l'enceinte (Inrap, d'après Escats dir., 2016).

Fig. 3 – Lannion Bel Air: macrolithic tools from pit 186 of the enclosure (Inrap, after Escats dir., 2016).

Plusieurs zones de rejet ont été observées dans le fossé, dont un corpus céramique remarquable de près de 2200 restes correspondant à un Nombre Minimum d'Individus de 322, associés à du macro-outillage. L'une des fosses (F186) correspond vraisemblablement à une fosse dépotoir puisqu'elle a livré un lot important de céramiques du Bronze ancien ainsi qu'un ensemble d'outils de transformation des objets métalliques, où sont associés percuteur-pilon, pièces intermédiaires, percuteurs, polissoir à plage et un outil de concassage et broyage dormant (fig. 3). La fosse est localisée dans l'aire interne de l'enceinte, plus précisément dans sa partie sud à quelques mètres du fossé et à proximité immédiate d'une petite concentration de trous de poteau et d'une seconde fosse. Elle présente un plan ovalaire ($1,10 \times 1 \times 0,2$ m) et un profil en cuvette à fond plat. Le comblement unique est hétérogène, composé de limon argileux brun mêlant des inclusions de substrat jaune-orangé, des poches de sédiment gris clair, quelques éléments de terre cuite et du charbon de bois.

L'enceinte du Bronze ancien a livré 133 outils, particulièrement diversifiés, qui reflètent des activités de transformation alimentaire (34 éléments de mouture) et pour d'autres productions (travail du métal notamment). L'exploitation d'une grande variété de matériaux par les occupants de l'enceinte semble majoritairement tournée vers un approvisionnement local.

Six outils en pierre, détaillés ci-après et dont les caractéristiques peuvent évoquer un usage en lien avec la

métallurgie, ont fait l'objet d'une analyse combinant traçéologie et analyses élémentaires pour révéler des traces métalliques (fig. 4 et 5).

Un outil de concassage et de broyage dormant associe deux faces circulaires opposées utilisées pour des opérations de concassage et broyage simultanées, et une tranche convexe portant deux facettes de fine percussion couvrante formant un biseau sur près de 4 cm de large (n° 1, fig. 4a). Les faces portent des impacts de percussion concentrés en petites cupules à l'entame d'une plage centrale polie de façon discontinue par une action de broyage. La surface apparaît légèrement altérée par l'enfouissement.

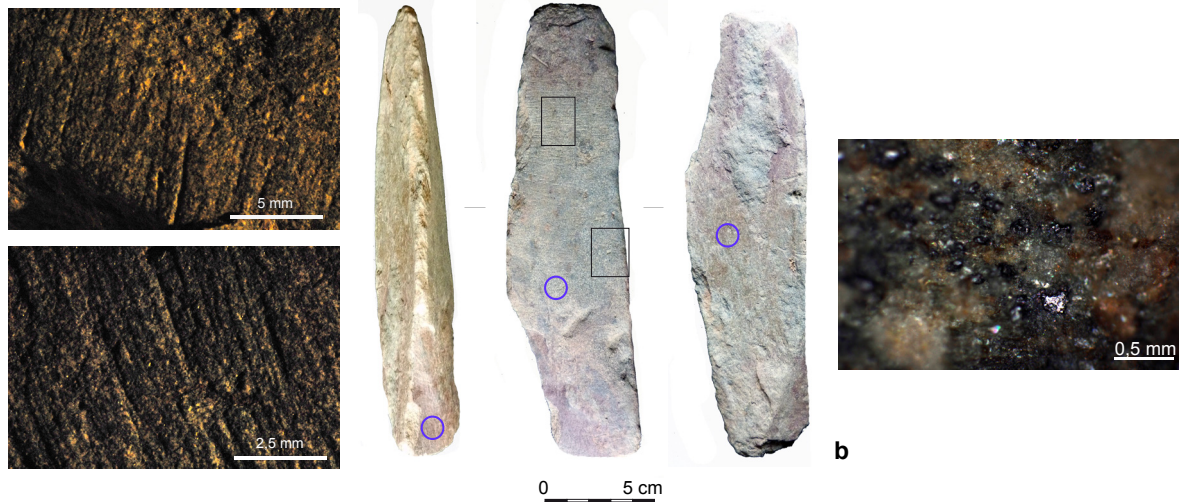
Plusieurs aiguisoirs associent deux types de surfaces actives : des extrémités esquillées et/ou écrasées et une ou plusieurs faces polies. Un outil sur plaquette de schiste gréseux de section triangulaire illustre très bien cette combinaison d'usage (n° 3, fig. 4b). L'une de ses extrémités présente un tranchant aménagé écrasé, tandis que l'extrémité opposée montre une pointe triangulaire également écrasée. Chacune de ses faces apparaît intensément et régulièrement polie. De courtes stries fines parallèles sont orientées transversalement à l'axe principal de l'outil. Les arêtes latérales associées sont généralement polies, à l'exception de l'une d'entre elles qui présente un écrasement et un esquillage de façonnage ou d'utilisation.

Un autre aiguisoir quadrangulaire sur schiste (n° 2, fig. 4c) présente une perforation biconique distale,

Outil de concassage / broyage dormant n°1
(inv 259- F50 sd 470)



Aiguiseur oblong n°3
(inv 157 F1260 sd 455 surface)



Aiguiseur perforé n°2
(inv 256 F470 sd474 us3)

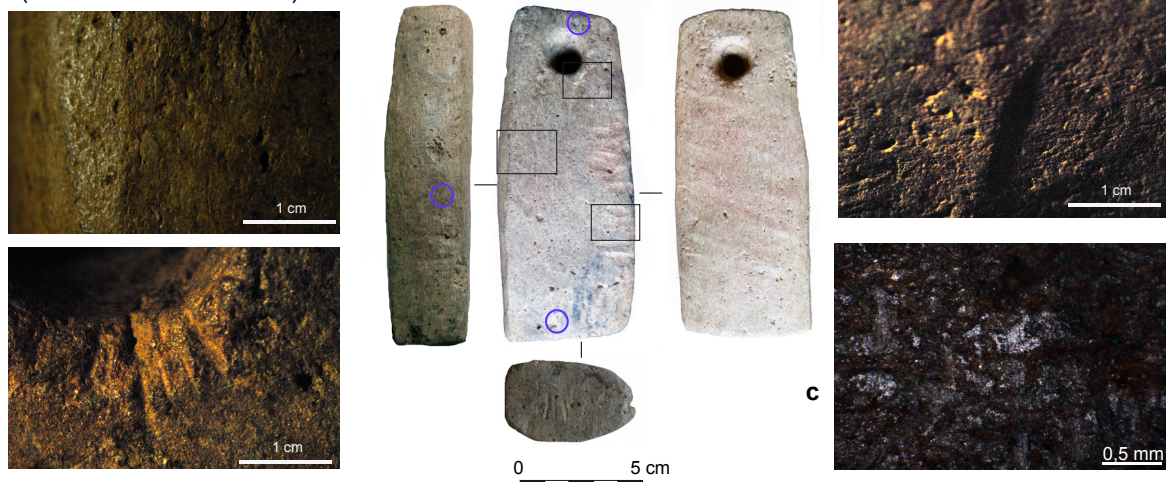
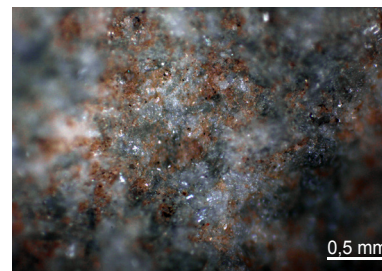
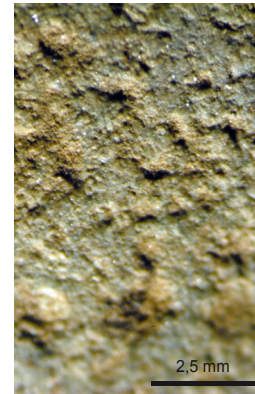
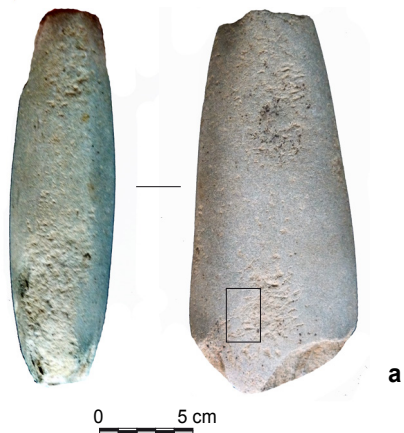


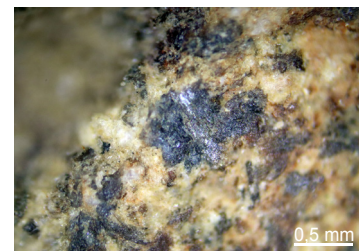
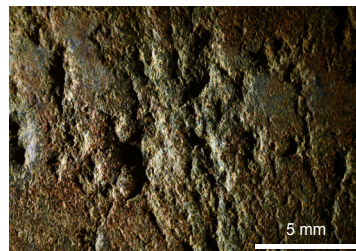
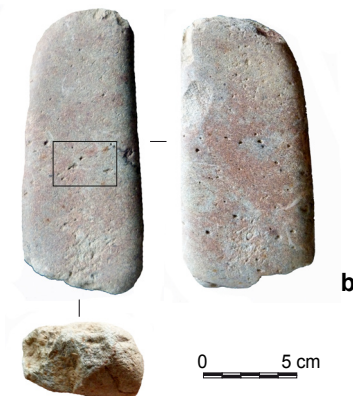
Fig. 4 – Lannion Bel Air : **a**, outil de concassage et broyage dormant n°1 (inv. 259 - F50 sd. 470) – détails des plages émoussées et impacts ($\times 10$) ; **b**, aiguiseur oblong n°3 (inv. 157- F1260 sd 455) – détail des macrostriations transversales ($\times 10$) et des déformations des grains de la roche ($\times 50$) ; **c**, aiguiseur perforé n°2 (inv. 256 F470 sd. 474) – détail des facettes latérales, des incisions de suspension périphériques à la perforation et des encoches transversales latérales ($\times 10$) et déformations des grains de la roche ($\times 50$). Pastilles violettes : localisation des analyses pXRF (clichés et micro-clichés : C. Hamon).

Fig. 4 – Lannion Bel Air : **a**, crushing and grinding lower tool n°1 (inv. 259 - F50 sd. 470), details of smoothed areas and impacts ($\times 10$); **b**, elongated sharpener n°3 (inv. 157- F1260 sd 455), detail of transverse macrostriations ($\times 10$) and distortions of the grains from the stone ($\times 50$); **c**, perforated sharpener n°2 (inv. 256 F470 sd. 474), detail of lateral facets, incisions linked to hanging peripheral to the perforation and with lateral transverse notches ($\times 10$) and distortions of the grains from the rock ($\times 50$); purple dots : pXRF analysis localisation (photo and microphotos: C. Hamon).

Percuteur-pilon n°4
(F186 inv 120)



Percuteur n°5
(F186 inv 121)



« Tas » n°6
(F186 inv 119)

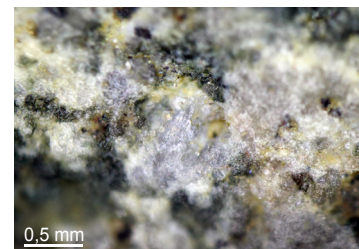
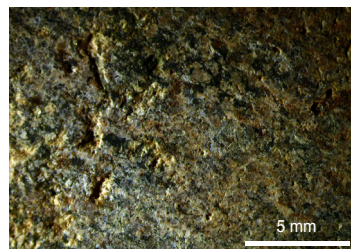
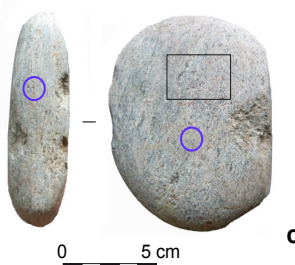


Fig. 5 – Lannion Bel Air, F186 : **a**, percuteur-pilon n°4 (inv. 120), détail des impacts de percussion vers une extrémité ($\times 10$) et déformation des grains ($\times 50$) ; **b**, percuteur n°5 (inv. 121), détail des impacts de percussion sur la face 1 ($\times 10$) et des plages réfléchives sur les grains de la roche ($\times 50$) ; **c**, « tas » n°6 (inv. 119), détail des impacts de percussion et de l'émoûssé sur la face 1 ($\times 10$) et des microstries associées à des plages réfléchives de micropoli sur les grains de la roche ($\times 100$) ; pastilles violettes : localisation des analyses pXRF (clichés et micro-clichés : C. Hamon).

Fig. 5 – Lannion Bel Air, F186 : **a**, hammerstone-pestle n°4 (inv. 120), detail of percussion impacts close to an end ($\times 10$) and grains distortions ($\times 50$) ; **b**, hammerstone n°5 (inv. 121), detail of percussion impacts on face 1 ($\times 10$) and of reflexive areas on the rock grains ($\times 50$) ; **c**, heap n°6 (inv. 119), detail of percussion impacts and of the smoothing of face 1 ($\times 10$) with microstriations and shiny micropolished on the rock grains ($\times 100$) ; purple dots: pXRF analysis localisation (photo and microphotos: C. Hamon).

avec des encoches de déformation périphériques qui témoignent d'une suspension. Ses faces et tranches sont totalement émoussées. Elles présentent de larges sillons transversaux le long des arêtes longitudinales, résultant d'actions d'aiguisage successives.

Dans la fosse 186, au moins 3 outils présentent des caractéristiques, en termes de choix de matières premières spécifiques et de traces d'utilisation, qui suggèrent un usage spécifique pour l'activité métallurgique.

Les deux outils multifonctionnels (n° 4 et 5, fig. 5a et b) associent un usage comme pilon sur leurs extrémités et comme percuteur sur leurs faces. Les extrémités utilisées en pilage associent fine percussion, lissage couvrant et esquillement secondaire, tandis que les faces présentent des impacts de percussion occasionnelle et des plages de fine percussion, notamment des concentrations d'impacts linéaires de percussion. Cette double utilisation peut résulter soit d'un réemploi, soit d'une utilisation complémentaire en alternance, dans le cadre d'une opération technique associant les deux modes d'action. L'ouverture et la fracturation de blocs de matière, puis leur pilage en fraction plus petite (poudre) pourrait correspondre à cette association de traces.

Un tas sur galet (n° 6, fig. 5c) présente 2 tranches avec un poli couvrant associé à un esquillement périphérique, dont la distribution sur une plage convexe suggère une action de martelage et de raclage à plat sur une matière semi-dure.

L'outillage du fossé d'enceinte et de la fosse F186 témoignerait donc de l'existence d'ateliers de fabrication, d'entretien ou de recyclage d'objets métalliques. Cet outillage est réparti dans tout le fossé, même si des concentrations de différentes catégories d'outils s'observent dans certaines zones du fossé. Cependant, ils apparaissent bien en position de rejet, et ne sont pas directement associés à des structures spécifiquement attribuables à la transformation du métal. En outre, la fouille d'un des tumulus voisins (tumulus 1) a livré du macro-outillage, en particulier un aiguiseur qui pourrait suggérer l'existence d'une activité métallurgique.

Le niveau d'occupation de Kersulec à Plonéour-Lanvern (resp. Y. Pailler, Inrap Finistère)

Le site de Kersulec a fait l'objet d'une fouille préventive en 2015 sur une surface de 8 820 m². La principale occupation mise au jour est attribuable à l'âge du Bronze ancien (Pailler *dir.*, 2016). Elle occupe un méplat d'une pente orientée au NO et dominant une vallée qui débouche sur l'étang de Trunvel. Le substrat est à cheval sur les micaschistes de la formation de Trunvel au nord et l'orthogneiss de Plonéour au sud, l'ensemble étant recouvert par des limons argileux dans lesquels apparaissent les vestiges archéologiques. Les structures en creux restent lacunaires et difficiles à interpréter. Toutefois, plusieurs constructions ont été repérées. Deux tombes, l'une en coffre et l'autre en fosse, ont été mises au jour, la dernière étant recoupée par une grande fosse dépotoir. Ces sépul-

tures bien connues à l'âge du Bronze ancien en Basse Bretagne complètent un maillage déjà serré localement. La chronologie relative indiquerait que les tombes sont antérieures à l'occupation domestique. Cette dernière se compose d'un petit bâtiment d'environ 10 m² associé à deux petits silos, d'une construction légère sur poteaux (atelier ?) et d'un grenier sur quatre poteaux. Plusieurs structures isolées, deux possibles puisards et 13 foyers empierrés complètent l'ensemble. Ces aménagements semblent indiquer une occupation domestique, somme toute assez modeste et de faible durée, ce que confirme le corpus céramique homogène qui se rapporte au premier tiers du II^e millénaire, attribution confortée par deux datations ¹⁴C. L'étude de la céramique comme celle du mobilier lithique taillé nous oriente vers une petite unité d'habitation même si l'absence d'outils de mouture pose question. Sous le possible atelier, on mentionnera la découverte d'un creuset ayant servi à produire du bronze par réduction de minerai d'après les analyses archéométriques réalisées (Le Carlier de Veslud *et al.*, à paraître), ainsi que la présence de quelques outils en pierre utilisés pour le concassage et le broyage du minerai et le travail de la tôle. À cela, il faut ajouter le fait qu'il est possible qu'il y ait eu production de poteries sur le site. Ces éléments issus de l'étude du mobilier nous amènent à interpréter le site comme un atelier maîtrisant les arts du feu. Au final, cet ensemble est riche en informations inédites sur les productions de l'âge du Bronze ancien.

Les vingt-quatre outils macrolithiques de Kersulec présentent un spectre divisé en deux grandes catégories fonctionnelles : les outils de percussion et d'abrasion. Trois ont fait l'objet d'une étude associant tracéologie et analyses élémentaires pour révéler des traces métalliques.

À proximité du creuset en céramique a été prélevé un petit outil sur un fragment mésial de hache polie en éclo-gite (n° 8, fig. 6). De forme trapézoïdale, l'objet montre des traces d'utilisation sur ses extrémités et ses flancs. La coloration rougeâtre observée sur les faces résulte de la densité plus ou moins importante de grenats dans l'éclo-gite, et non de la présence de résidus d'oxydes métalliques. Elle montre également que les faces de cet objet n'auraient pas été utilisées comme outil : le polissage uniforme, de même que le lustré couvrant résultent uniquement du façonnage initial de la hache polie réutilisée. Aucune déformation des faces par des facettes ou pans d'utilisation n'est d'ailleurs observée contrairement aux extrémités. Les deux extrémités ont été utilisées selon le même fonctionnement : les surfaces plano-convexes présentent un lissage couvrant, semi-fluide, associé en particulier sur leur périphérie à des groupes de courtes stries obliques. L'arête périphérique de ces plages d'utilisation présente un émoussé débordant, un lustré brillant, de courtes et denses microstries transversales. Y sont généralement associées des facettes longitudinales polies. Sur l'un des flancs, l'une d'elle porte très clairement des stries longitudinales et un poli de type métallique, réflexif, grenu et fortement microimpacté. Arêtes et facettes sur les extrémités et flancs constitueraient donc bien les

« Tas » n°8
(n°15 iso 35)

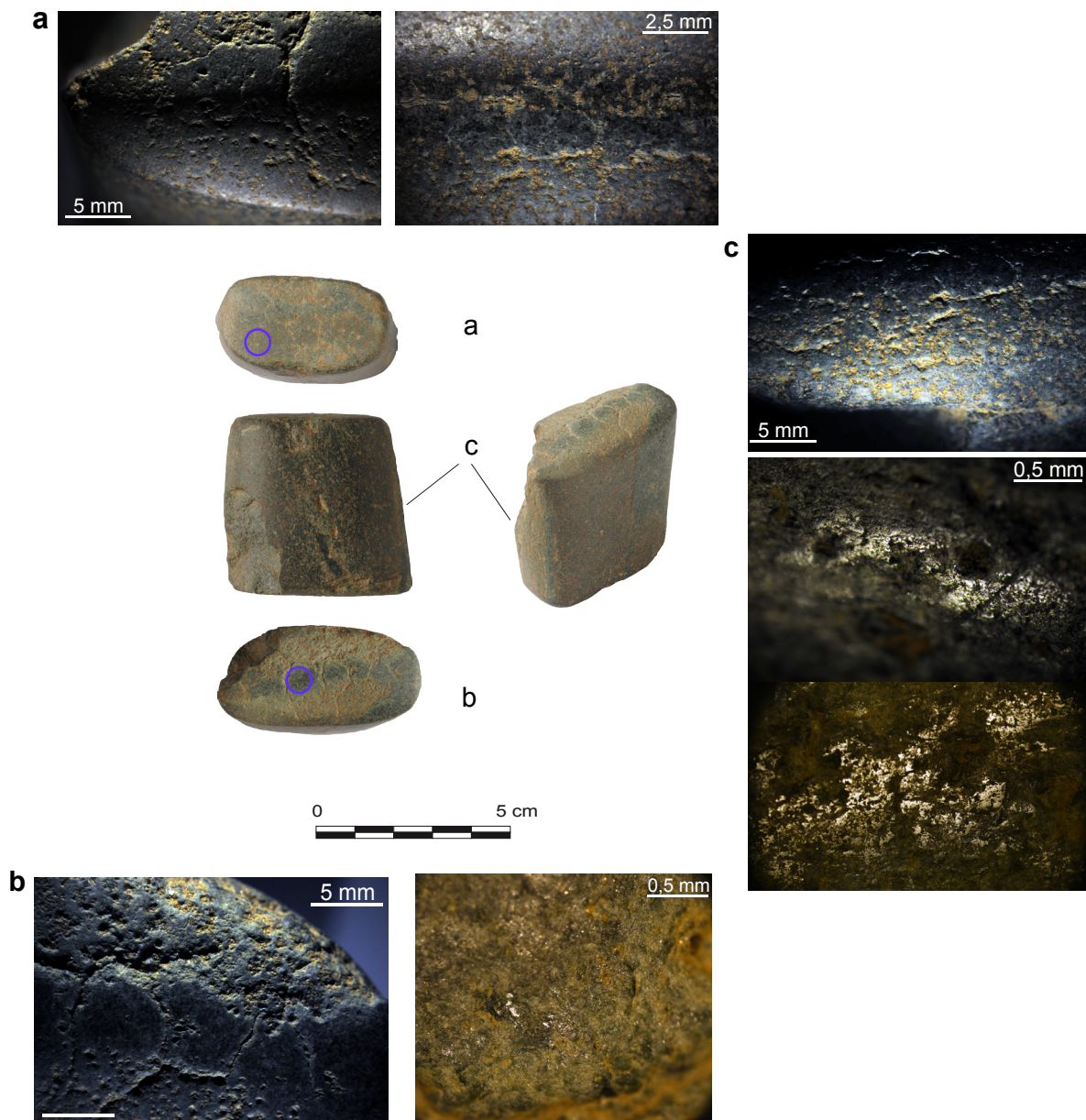


Fig. 6 – Ploneour-Lanvern, Kersulec : « tas » sur hache en éclogite réutilisée n°8 (n°15 iso 35) : **a**, macrotraces sur extrémité 1 (à gauche : micropoli visible sur les arêtes, à droite : microstriations transversales) ; **b**, macro- et micro-traces sur extrémité 2 (avec micropoli caractéristique) ; **c**, macro- et micro-traces sur tranche (avec micropoli caractéristique) ; pastilles violettes : localisation des analyses pXRF (clichés : E. Collado, micro-clichés : C. Hamon ; d'après Hamon *et al.*, 2020).

Fig. 6 – Ploneour-Lanvern, Kersulec : heap on a reused axe in eclogite n°8 (n°15 iso 35) : **a**, macrotraces on end 1 (on the left: micropolish visible on the edges, on the right: transverse microstriations) ; **b**, macro and microtraces on end 2 (with characteristic micropolish) ; **c**, macro and microtraces on the side (with characteristic micropolish) ; purple dots: pXRF analysis localisation (photo: E. Collado, micro-photos: C. Hamon; after Hamon *et al.*, 2020).

plages les plus sollicitées de cet outil, dans le cadre d'une action simultanée d'écrasement et d'abrasion de surfaces métalliques planes. Il a été interprété comme un tas, en raison de la régularité des déformations morphologiques de l'objet, même si la combinaison et les caractéristiques des traces ne permettent pas complètement d'exclure une utilisation active comme marteau.

À proximité de cet outil spécifique, était présent un galet de microgranite (ou rhyolite) fracturé dans la lon-

gueur (n° 7 ; fig. 7) avec de nombreuses plages de percussion sur ses différentes surfaces. Les deux extrémités du galet montrent des zones de fine percussion formant dans un cas un à-plat, et dans l'autre deux plages percutees en biseau. L'une des faces présente une cupule de percussion principale, tandis que l'autre face porte deux cupules de percussion centrées entourées de plages lustrées très prononcées, et deux autres plages distales où s'observent des concentrations d'impacts de percussion. Ces cupules

Outil de concassage / broyage n°7
(n°13 iso 35)

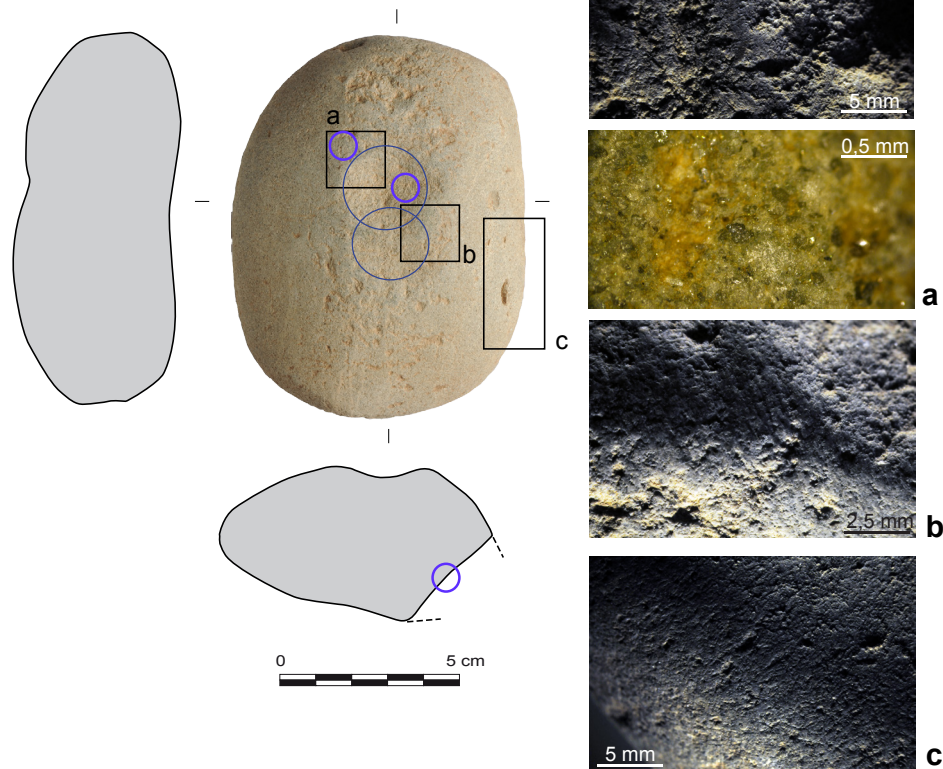


Fig. 7 – Ploneour-Lanvern, Kersulec, outil de concassage/broyage n°7 (n°13 iso 35) face 1 avec cupules indiquées en bleu : **a**, interface entre la cupule 1 avec impacts de percussion à droite et zone arasée réfléchive à sa périphérie ; **b**, interface entre la cupule 2 (avec traces de percussion à gauche) et zone microstriée et arasée à sa périphérie (au centre) ; **c**, macrotraces sur les bords de l’outil ; pastilles violettes : localisation des analyses pXRF (clichés : E. Collado, dessins : V. Brisotto, micro-clichés : C. Hamon; d’après Hamon *et al.*, 2020).

Fig. 7 – Ploneour-Lanvern, Kersulec, crushing-grinding tool n°7 (n°13 iso 35) face 1 with cupules indicated in blue: **a**, interface between cupule 1 with percussion impacts on the right, and shiny abraded zone on its periphery; **b**, interface between cupule 2 (with percussion traces on the left) and microstriated abraded zone in its periphery; purple dots: pXRF analysis localisation (in the center); **c**, macrotraces on the sides of the tool (photos: E. Collado, drawings: V. Brisotto, microphotos: C. Hamon; after Hamon *et al.*, 2020).

ont été formées par une série de gros impacts transversaux linéaires profonds, associés à de fins impacts de percussion. La cupule principale de cet outil présente une association de fins impacts et d’un émoussé couvrant sur les reliefs en fond de cupule, témoignant d’une action simultanée de concassage grossier puis de broyage fin. Cette action de broyage constitue la principale fonction des trois plages lustrées, localisées entre les zones de percussion et les bords des outils. Ces plages associent un émoussé très homogène, à des plages véritablement lustrées et à de courtes stries individuelles sur les faces, beaucoup plus régulières sur l’arête du bord, toutes orientées selon le geste d’utilisation transversal. Cet outil aurait donc servi comme outil actif utilisé alternativement pour réduire une matière minérale dure par concassage à l’aide de ses extrémités et plages centrées sur les faces, puis par broyage en plus petites fractions.

Un autre galet de microgranite de forme et de section ovoïde présente sur l’une de ses faces une profonde cupule de percussion de type entaille (n° 9 ; fig. 8). D’autres plages de percussion sont également visibles

sur chacune des extrémités ainsi que sur les deux bords opposés. La face principale présente une cupule formée par un gros impact linéaire à section en « V » témoin d’un choc important contre une matière anguleuse, associé à des impacts de percussion plus grossiers. Les deux extrémités présentent également des plages de percussion, avec des impacts peu nombreux et peu denses. Les flancs présentent trois plages circulaires plano-concaves bien circonscrites, et associant écrasements moyennement grossiers et émoussés des aspérités. L’image ainsi obtenue montre que cet outil a été utilisé successivement pour des opérations ponctuelles de percussion, et dans le cas des tranches avec des surfaces de contact très localisées.

L’habitat insulaire de Beg ar Loued à Molène (resp. Y. Pailler, Inrap Finistère)

Fouillé de 2003 à 2011, le site de Beg ar Loued au sud de l’île de Molène (Finistère) a livré les vestiges de deux maisons en pierres sèches superposées et occupées

Outil de concassage / broyage n°9
(n°18 iso 40)

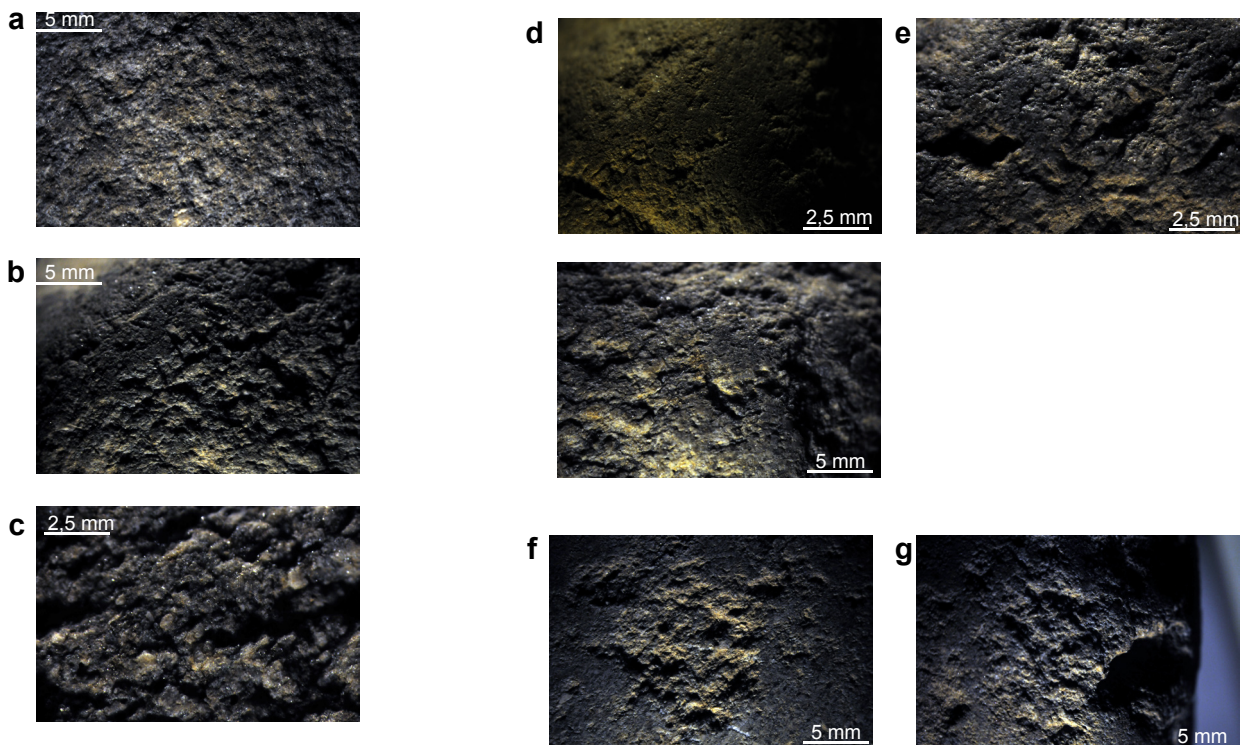
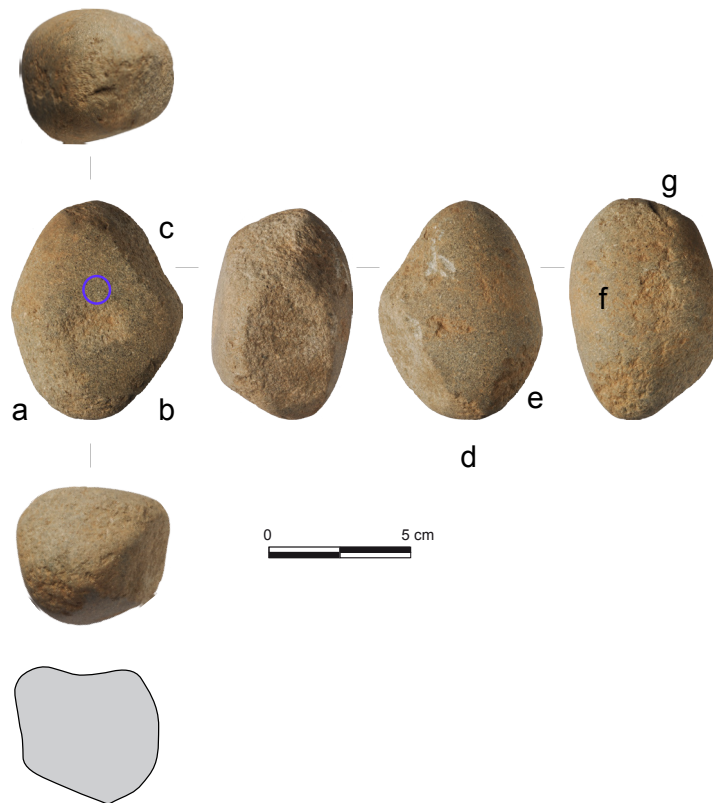


Fig. 8 – Ploneour-Lanvern, Kersulec, outil de concassage / broyage sur galet de dolérite n°9 (18 iso 40) : **a-c et e**, impacts de percussion sur certaines facettes aux extrémités ; **d et g**, arasement et émoussé combinés à une fine percussion aux extrémités ; **f**, impacts de percussion de la principale cupule de la face 1 ; pastilles violettes : localisation des analyses pXRF (photo : E. Collado, dessins : V. Brisotto, micro-clichés : C. Hamon ; d'après Hamon *et al.*, 2020).

Fig. 8 – Ploneour-Lanvern, Kersulec, crushing-grinding tool on a cobble of dolerite n°9 (18 iso 40): **a-c and e**, percussion impacts on some facets on the ends; **d and g**, abrading and smoothing combined to a fine percussion on the ends; **f**, percussion impacts on the main cupule on face 1; purple dots: pXRF analysis localisation (photo: E. Collado, drawings: V. Brisotto, microphotos: C. Hamon ; after Hamon *et al.*, 2020).

de 2150 à 1750 cal. BC (Pailler, Nicolas, 2019). À cette période, le plateau Molénaï, déjà insulaire depuis le Néolithique ancien, se présentait dans une forme assez proche de l'actuelle, exception faite des estrans qui étaient beaucoup plus vastes. Le site se trouvait alors à une centaine de mètres du trait de côte. L'étude du site a permis de mieux comprendre le mode de vie de cette communauté insulaire. Celle-ci pratiquait l'agriculture (céréales et fèves) et l'élevage des ovicaprinés, complétés par la pêche sur estran à l'aide de barrages de pêcherie, la collecte des patelles et, dans une moindre mesure, la chasse aux oiseaux migrateurs. La présence de bosquets sur l'île permettait aussi de disposer de bois de construction et de chauffage et de pratiquer la collecte des noisettes. La culture matérielle montre que ce groupe exploitait les ressources locales : argile, cordons de galets et affleurements rocheux. Une activité métallurgique précoce est suggérée par la présence d'une possible lingotière en granite local et un fragment de roche contenant du cuivre, qui pourraient témoigner d'un éventuel travail du métal *in situ*, du concassage à la fonte. Ce tableau d'une société autarcique se doit pourtant d'être nuancé, car l'architecture des bâtiments, les formes céramiques, la production lithique et les indices de métallurgie montrent que les occupants n'étaient pas à l'écart des circuits d'échange et qu'ils étaient en phase avec les innovations et les changements culturels identifiés sur le proche continent. Dès lors, se posent les questions de la navigation et de la nature des liens qu'entretenait cette communauté insulaire avec le continent. Si les maisons de Molène sont originales dans le Nord de la France du fait de leur mode de construction, un tour d'horizon des maisons érigées dès le Campaniforme montre que la forme ovale ou à façades arquées est largement répandue en Europe (Pailler *et al.*, 2019). Mais c'est surtout dans les archipels des Hébrides et des Shetland (Écosse) que se trouvent les meilleurs parallèles architecturaux, tant par le choix du matériau de construction, la forme des maisons et leur stricte contemporanéité avec celles de Molène, caractéristiques auxquelles pourraient s'ajouter leur implantation insulaire et le mode de vie des populations concernées.

Le site de Beg ar Loued a livré 1210 macro-outils, constituant un assemblage sans équivalent dans la région, en termes de quantité et de diversité (Donnart, 2019). Les matières premières sont locales, le grès armoricain (grès fin quartzitique) constituant plus de la moitié de l'assemblage et le granite un quart. Les galets sont largement privilégiés, leur collecte semble intégrée à l'exploitation des ressources alimentaires de l'estran de l'île. Avec 34 types, l'outillage est très varié. L'assemblage est dominé par les percuteurs et les outils de débitage lithique sur enclume. Mentionnons également des séries importantes de galets biseautés, de pilons et de meules, qui attestent l'usage du type « en cuvette » du Néolithique final au Bronze ancien. Pour les autres catégories d'outils, l'exploitation des galets permet d'obtenir des formes et des matériaux variés. La réutilisation de nucléus et de macro-outils abandonnés révèle des liens étroits entre les sous-systèmes techniques du macro-outillage et de la pierre tail-

lée. Les supports multifonctionnels sont nombreux : ils constituent plus d'un tiers de l'assemblage. L'analyse du macro-outillage de Beg ar Loued contribue à montrer que le site est un habitat pérenne. De nombreuses activités de subsistance et de production non spécialisée sont pratiquées sur place, avec une dominance et une relative diversité du travail de la pierre. L'organisation des activités indique qu'elles ont été réalisées par une population réduite, dans le cadre d'une économie insulaire à très large spectre. Sous leur forme naturelle, les galets de grès armoricain ou de quartz ont été largement mis à profit pour servir de supports aux macro-outils liés au travail de la pierre et plus particulièrement au débitage du silex comme les percuteurs et les enclumes (Donnart *et al.*, 2009). Parmi le macro-outillage, quelques rares outils de concassage (percuteur et molette de concassage) auraient pu servir à transformer du minerai. Bien qu'aucun dépôt de résidu métallique n'ait été observé macroscopiquement, la question restait donc ouverte. En revanche, les outils des phases finales de la chaîne opératoire (aiguillers aux traces caractéristiques, marteaux à extrémité active polie) sont absents de l'assemblage macrolithique.

Six des outils potentiellement impliqués dans un début de chaîne opératoire de métallurgie ont été intégrés à notre protocole d'analyses combinées afin de chercher des résidus élémentaires de cuivre qui seraient éventuellement passés inaperçus lors de l'étude macroscopique de la série (Donnart, 2019). Ces outils relèvent du concassage de matières minérales : deux percuteurs de concassage (n° 10 et 13), un outil multifonctionnel employé comme enclume de débitage lithique et percuteur de concassage (n° 11), une molette de concassage (n° 12, fig. 9a), une table de broyage (n° 15, fig. 9b) et une enclume (n° 14) se distinguant de ses homologues, majoritaires sur le site, impliqués dans le débitage bipolaire du silex. Les analyses élémentaires n'ont détecté aucune trace métallique. La probabilité de l'utilisation de ces six outils pour le concassage de minerai en est sensiblement diminuée, mais ne peut être catégoriquement exclue, car les résidus ont pu totalement disparaître du fait des conditions taphonomiques, comme supposé pour la lingotière. En effet, le réemploi de macro-outils dans l'architecture et le colluvionnement de niveaux du Néolithique final impliquent un important brassage, pouvant avoir affecté les outils analysés.

Le « dépôt » de la Colignière à Trémuson (resp. S. Blanchet, Inrap Côtes-d'Armor)

Un diagnostic mené en 2016 sur le site de la Colignière à Trémuson (Côtes-d'Armor) (Blanchet, 2017) a permis la découverte d'un petit ensemble de trois fosses. D'un diamètre de 0,60 m et profonde de 0,20 m, la fosse F8 s'apparente par son profil à un petit silo. Elle était obturée par une meule en granite, arrachée au moment du décapage. Le comblement basal de la structure correspond à un limon brun-gris foncé charbonneux relativement riche en restes carpologiques, mais sans mobilier archéologique associé. Une datation par radiocarbone

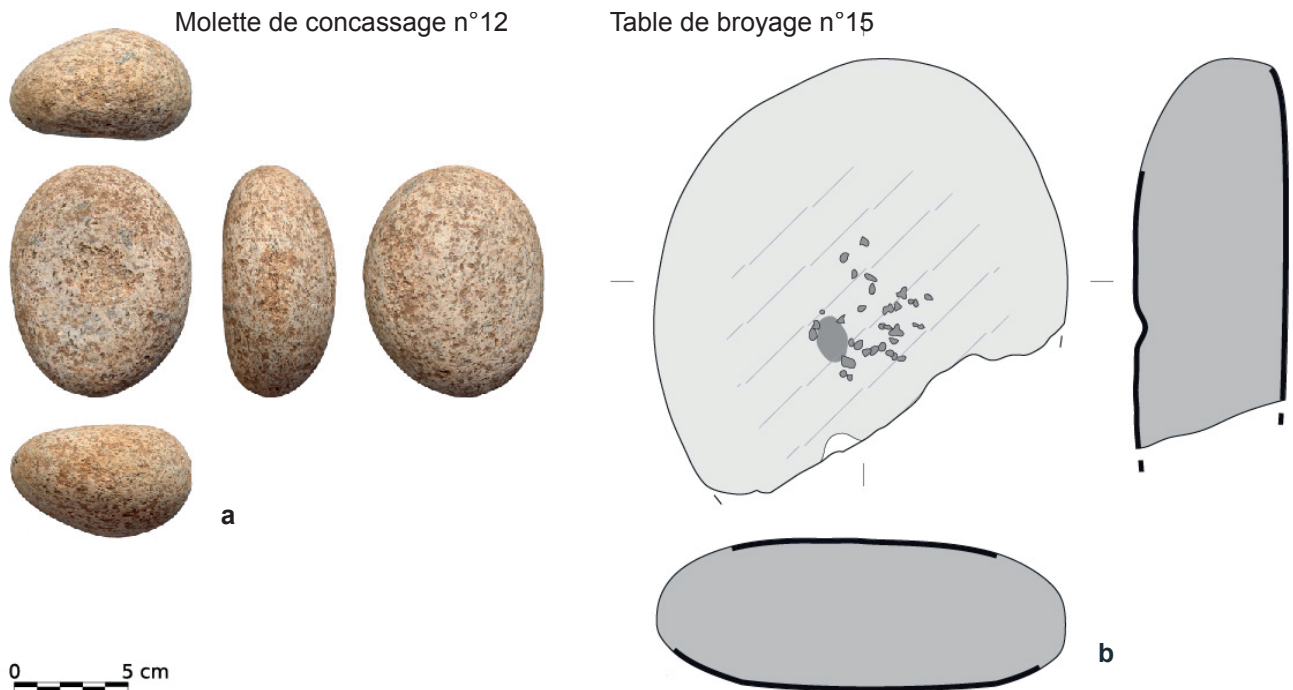


Fig. 9 – Molène, Beg ar Loued, exemples d'outils analysés : **a**, molette de concassage sur galet de granite n° 12 ; **b**, table de broyage sur galet de granite n° 15 (clichés et dessins : K. Donnart).

Fig. 9 – Molène, Beg ar Loued, examples of analysed tools: **a**, crushing handstone on a cobble of granite n° 12; **b**, grinding table on a cobble of granite n° 15; purple dots: pXRF analysis localisation (photos and drawings: K. Donnart).

obtenue sur une graine de légumineuse (*Vicia faba var. minor*), donne 3660 +/-30 BP soit une datation calibrée à 2 sigma de 2135-1945 BC. La dynamique de comblement de cette fosse F8 et le bon état de conservation du mobilier céramique témoignent d'un rebouchage volontaire, sans phase de colmatage naturel.

Le comblement supérieur de la fosse est exclusivement constitué de tessons de céramique répartis sur le pourtour du creusement et d'éléments macrolithiques. Au total, 172 tessons ou éléments de forme ont été mis au jour pour un Nombre Minimum d'Individus de 15, attribuables à la transition 3^e/2^e millénaire avant notre ère. Le mobilier lithique est principalement composé de macro-outillage. En plus de la meule évoquée précédemment, cinq outils ont été identifiés, dont une boucharde sur galet de grès silcrète, l'ébauche retaillée d'une probable hache en grès, ainsi que trois outils de percussion.

Deux de ces outils de percussion ont été sélectionnés pour la présente étude analytique.

Un marteau sur galet de grès silcrète est fracturé longitudinalement et transversalement (n° 17, fig. 10). Il porte en plusieurs endroits de nombreux impacts de percussion : sur l'extrémité conservée, ce sont des impacts groupés et grossiers ; sur l'une des faces, des impacts punctiformes, parfois linéaires à la fois regroupés et disséminés ; sur la face opposée, de fins impacts organisés en micro-cupules ; et enfin sur l'un des côtés conservés en partie, de fins impacts marqués et groupés. Par ailleurs, une coloration rouge-violacée est observée sur l'une des faces vers l'extrémité, alors qu'une teinte gris-brune est présente sur l'un des bords rejoignant la même extrémité.

L'autre objet considéré comme un marteau est un galet d'une roche sombre et dense à texture doléritique (n° 16, fig. 11). De forme pseudo-cubique, à section trapézoïdale, il présente plusieurs faces planes avec des arêtes fortement émoussées par les impacts de percussion. D'autres plages ou impacts de percussion sont par ailleurs visibles sur les faces et bords de l'objet. L'une d'elles localisée sur l'une des faces la plus réduite conduit à la formation d'une cupule, dont un des bords est fortement poli.

Si, dans un premier temps, la fosse F8 de Trémuson a été considérée comme une simple fosse détritique, une reprise récente des données a permis de reconsidérer la question en émettant notamment l'hypothèse d'un « dépôt » (Blanchet, 2020). Cette fosse se distingue en effet par l'abondance, la composition voire l'organisation ou la mise scène de l'assemblage mobilier. Cette configuration n'est pas sans rappeler celle de certains dépôts isolés (hors sépulture) du Néolithique moyen dont la composition et l'organisation offrent de réelles similitudes comme à Kerléan à Concarneau (Hinguant, 2002 ; Hamon, 2009), et Leslouc'h à Plouédern (Blanchet, 2013). Pour le Bronze ancien, des pratiques de dépôts dédicatoires ou de fondation sont également observées hors des sépultures. Sur le site de Leslouc'h à Plouédern, deux grands vases de stockage en position fonctionnelle ont par exemple été retrouvés au sein d'un vaste système agraire sans autres structures associées. À Penn an Alé à Lannion, un vase biconique richement décoré, mis au jour à l'entrée d'un enclos, s'apparente à un dépôt de fondation. En contexte mégalithique ou funéraire, mais hors sépultures, des dépôts sont également connus à l'image de celui des alignements du Moulin à Saint-Just où un

Marteau n°17
(Tr 4 str 8 n°2)

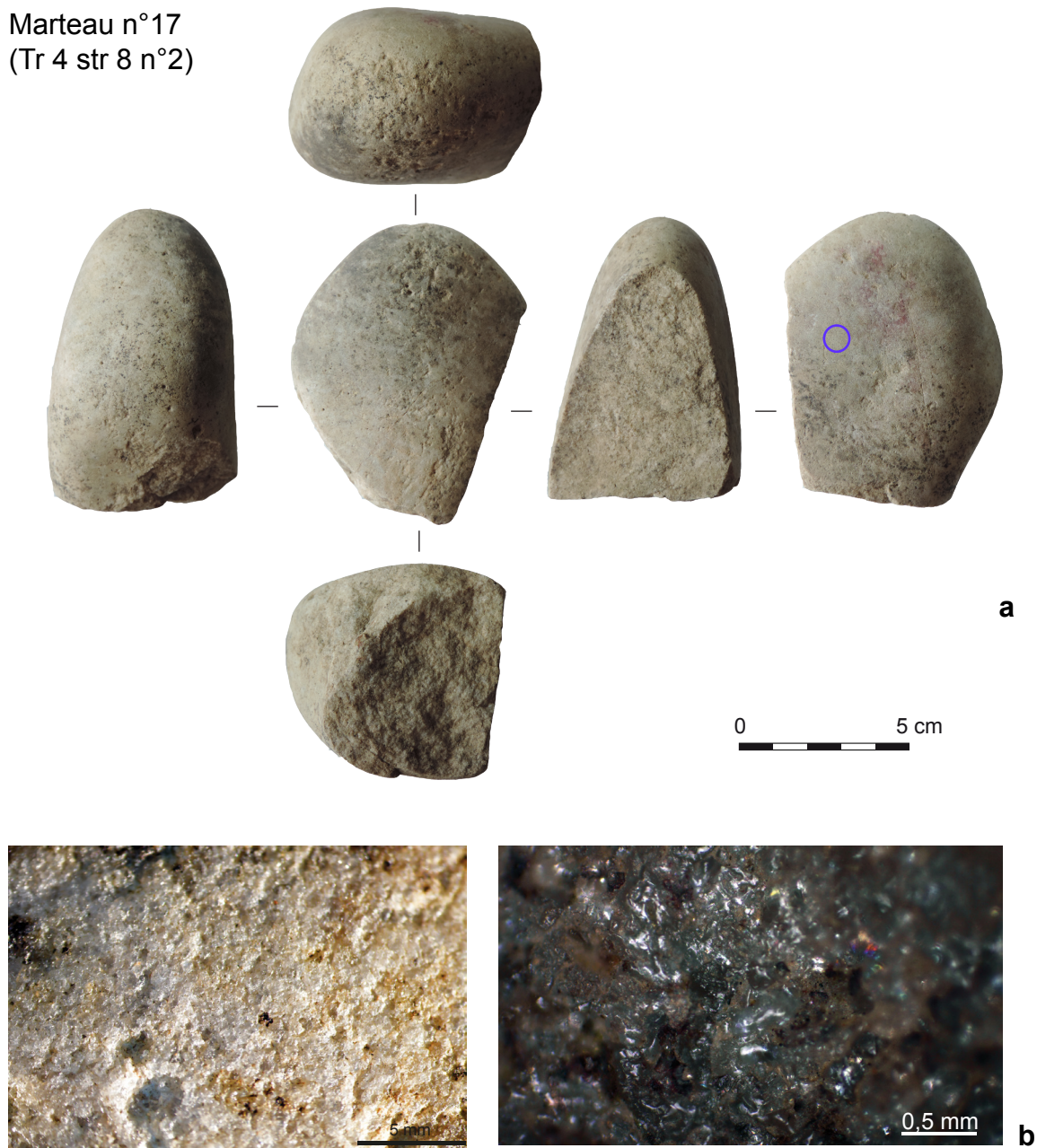


Fig. 10 – Trémuson, la Colignère n°17 (Tr. 4 st. 8 n°5) : **a**, marteau (enclume ?) sur galet fracturé de grès silcrète (photos : V. Brisotto) ; **b**, traces d'utilisation à faible et fort grossissement ; pastilles violettes : localisation des analyses pXRF (micro-clichés : C. Hamon).

Fig. 10 – Trémuson, la Colignère n°17 (Tr. 4 st. 8 n°5) : **a**, hammer (anvil?) on a broken cobble of sandstone (photos: V. Brisotto); **b**, use-wear traces at low and high magnification; purple dots: pXRF analysis localisation (microphotos: C. Hamon).

grand vase biconique à quatre anses arciformes est déposé à proximité de menhirs et de deux tombes en coffre dans la tradition du Bronze ancien armoricain (Briard *et al.*, 1995). Sur le site de la Route de Petit Camp à Lannion, une céramique disposée à l'envers dans une petite fosse semble par ailleurs agréger autour d'elle une dizaine d'inhumations (Blanchet, 2018). Cette pratique est aussi avérée pour le Bronze moyen et le Bronze final avec des dépôts isolés ou massifs de céramiques parfois associés à du macro-outillage. Observés au sein de réseaux agraires, ils sont le plus souvent déconnectés des contextes d'habitat. En revanche, leur proximité avec des contextes funéraires doit être soulignée dans plusieurs cas comme sur

le site de la ZAC de Kerisac à Plouisy (Mentele, 2013) ou à Penn an Alé à Lannion (Blanchet, 2016). Se pose alors la question de leur interprétation comme possibles dépôts magico-religieux, événements culturels, voire rites de libation, etc.

Une fosse d'occupation ZAC Kerisac à Plouisy (resp. S. Mentele, Inrap Côtes-d'Armor)

La fouille du site de la ZAC de Kérisac à Plouisy (Côtes-d'Armor) (Mentele, 2013) a permis de mettre en évidence des occupations successives s'échelonnant sur l'ensemble de la période de l'âge du Bronze. La phase

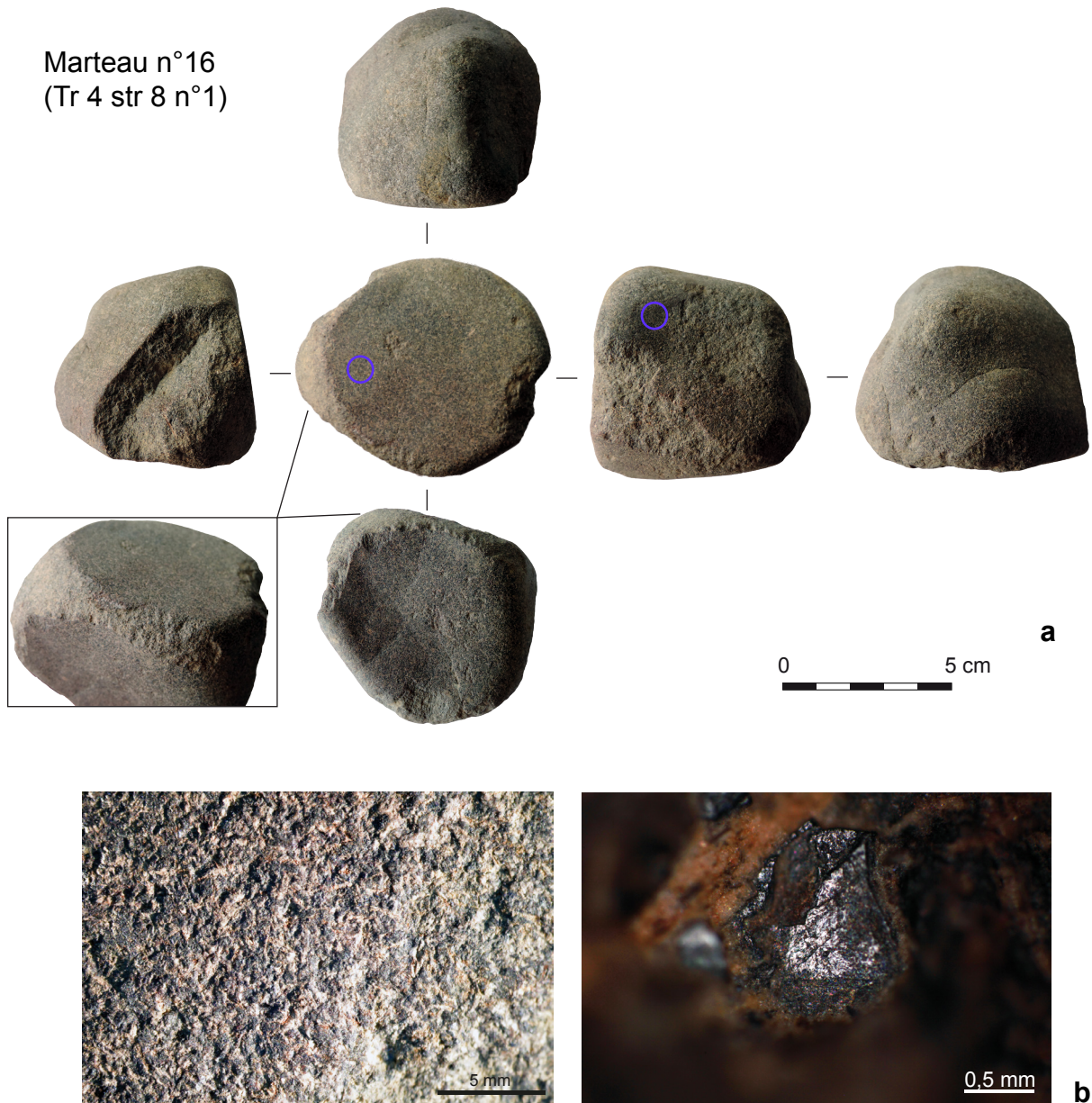


Fig. 11 – Trémuson, la Colignère n°18 (Tr. 4 st. 8 n°6) : **a**, marteau sur galet de roche sombre à texture doléritique (photos : V. Brisotto) ; **b**, traces d'utilisation à faible et fort grossissement ; pastilles violettes : localisation des analyses pXRF (micro-clichés : C. Hamon).

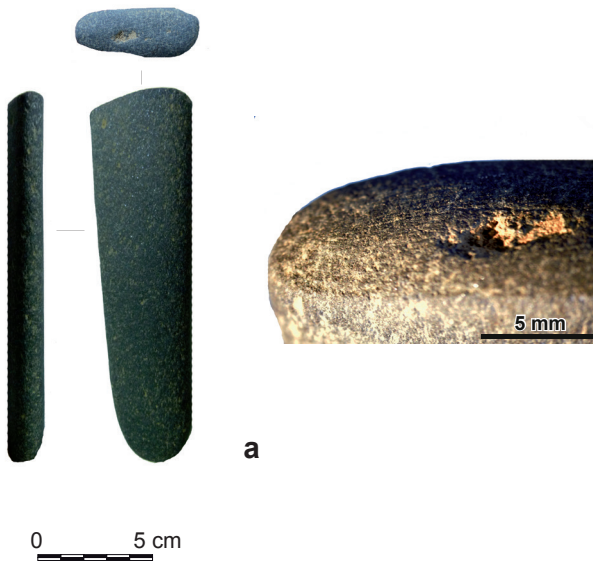
Fig. 11 – Trémuson, la Colignère n°18 (Tr. 4 st. 8 n°6) : **a**, hammer on a cobble of dark doleritic rock (photos: V. Brisotto); **b**, use-wear traces at low and high magnification; purple dots: pXRF analysis localisation (microphotos: C. Hamon).

ancienne, dont la présence est discrète, se caractérise par un petit ensemble de fosses ayant livré toutefois un corpus céramique et lithique significatif. Les deux outils en pierre analysés selon notre protocole proviennent d'une de ces fosses. L'âge du Bronze moyen est par ailleurs représenté par l'implantation d'une construction circulaire sur poteaux. Si, par son plan, elle s'apparente aux maisons rondes du Bronze final, l'absence d'un porche d'entrée nettement défini ne permet pas de la considérer comme une maison en tant que telle, ce d'autant plus qu'aucune autre structure domestique ne semble l'accompagner. Le dépôt isolé d'un vase de stockage situé le long d'un fossé, complète ces données. Deux enclos circulaires à vocation vraisemblablement funéraire sont quant à eux attribuables au Bronze moyen ou au Bronze

final. Enfin, la dernière phase de l'occupation est marquée par une probable nécropole à incinération du Bronze final comprenant des dépôts en fosse de résidus de bûchers. L'une de ces fosses a livré un remarquable anneau « *hair-ring* ». Par ailleurs, un réseau parcellaire non daté pourrait être en relation avec l'occupation de l'âge du Bronze dès sa phase ancienne.

Les deux outils analysés proviennent d'une fosse (fig. 12) qui correspond à un creusement à parois sub-verticales à fond plat d'un peu plus d'1 m de diamètre et profonde de 0,30 m. Le comblement de cette fosse, caractérisé par un limon argileux brun contenant des plaquettes de schiste et des inclusions charbonneuses a livré 6 céramiques, 2 pièces en silex et 5 macro-outils. Parmi ceux-ci, sont identifiés une petite herminette, une plaque

Tas n° 19
(F221 - surface)



Pilon n° 18
(F221 - surface)

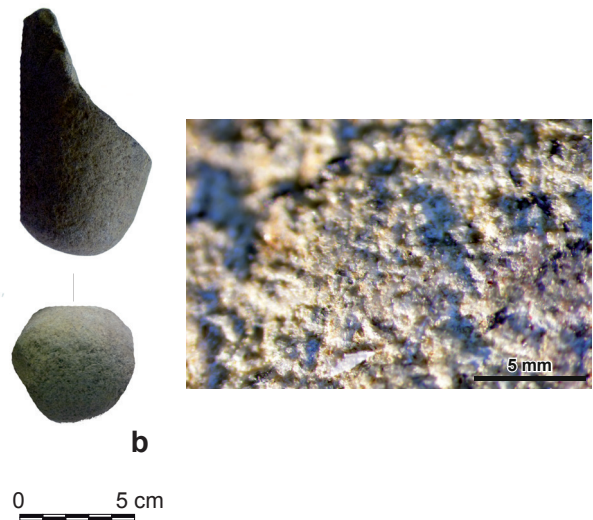


Fig. 12 – Plouisy, ZAC de Kérisac : **a**, « tas » sur galet de schiste n° 19 ;
b, pilon sur talon de hache en dolérite n° 18 (clichés et micro-clichés : C. Hamon).
Fig. 12 – Plouisy, Zac de Kérisac : **a**, heap on a cobble of schist n°19 ;
b, pestle on a butt of axe in doleritic rock n°18 (photos and microphotos: C. Hamon).

de schiste émoussée et un percuteur sur roche doléritique utilisé sur ses deux extrémités et ses deux faces opposées. Deux autres outils ont été sélectionnés pour analyse. Un outil sur fin galet de schiste micacé présente un émoussé couvrant de manipulation, une fine percussion de l'extrémité proximale et une surface distale convexe totalement lissée associée à des stries longitudinales. Une extrémité de pilon cylindrique cassé sur dolérite (diamètre 3 cm) montre une extrémité polie par fine percussion, un poli couvrant et un esquillement périphérique.

Le corpus ainsi rassemblé se compose de 19 macro-outils issus de types d'occupation différents, tous datés grâce au mobilier céramique ou datations par radiocarbone du Bronze ancien armoricain. L'existence d'activités métallurgiques est suggérée par différents indices souvent peu abondants, incluant des restes de possibles creusets ou des déchets métallurgiques. Les outils macrolithiques ont été sélectionnés sur la base de particularités de matières premières, de morphologie et de traces d'utilisation macroscopiques au sein des assemblages de chacun des sites. Des roches particulièrement denses, de type volcanique, ou dures, ont retenu notre attention en raison de leur caractère résistant à la fois aux chocs, mais également à la chaleur. La plupart des supports, hormis les outils sur haches, sont des galets bruts ne présentant aucun aménagement particulier. La présence de facettes d'utilisation, souvent biseautées, présentant des traces de percussion ou d'émoussé particulièrement intenses et marqués, a également été pistée. L'assemblage inclut plusieurs modes d'action sur la matière : 6 outils associant actions de concassage et de broyage, 1 pilon, 3 percuteurs et 1 outil de percussion indéterminé, 3 tas, 3 marteaux et enfin 2 aiguisoirs (tabl. 1). Ils couvrent ainsi potentiel-

lement la totalité du spectre des outils macrolithiques susceptibles d'avoir participé à la chaîne opératoire de transformation des minerais et des métaux, depuis le concassage des minerais jusqu'au façonnage et à l'entretien des objets métalliques.

MÉTHODES D'ANALYSE FONCTIONNELLE

La méthode d'analyse fonctionnelle adoptée repose sur le croisement des résultats d'une analyse tracéologique à faible et fort grossissements, et d'analyses élémentaires par fluorescence des rayons X (XRF), avec deux modalités de mesure mises en œuvre : par spectromètre de fluorescence X portable (pXRF) et par cartographies de fluorescence X sous rayonnement Synchrotron (Sy-XRF). Chacune de ces méthodes d'analyses est décrite ci-après. L'objectif est d'évaluer leur contribution respective, de révéler leur complémentarité, mais aussi de maîtriser leur implémentation selon les contextes, questions et conditions d'étude pour associer les traces d'usage et détecter/identifier les résidus métalliques potentiellement conservés en surface des outils.

Analyse tracéologique des macro-outils

L'analyse tracéologique des outils macrolithiques des 5 séries sélectionnées a été conduite à faible et fort grossissement à l'aide d'un stéréomicroscope SMZ 800 (jusqu'à 80×) et d'un microscope métallographique Olympus BX51M (jusqu'à 200×) au laboratoire Trajectoires. Les critères descriptifs des traces d'utilisation sur

	N° d'outil	Type d'outil	Action sur la matière	Matière première	longueur	largeur	épaisseur	poids	Morphologie	N° de figure
Bel Air (Lannion)										
	F50 Sd 470 us 6 n°1	outil de concassage / broyage dormant	concassage et broyage	quartzite	10,3	10,5	6,6	970	galeat circulaire de section ovoïde, à plages convexes	4a
	F470 sondage 474 us 3 à 50 cm	aiguiseur perforé	aiguïsage	schiste gréseux	10,2	4	2,6	191	support cylindrique, section ovoïde, perforation biconique proximale	4b
	F1260 sondage 455 surface	aiguiseur oblong	aiguïsage	schiste gréseux	22	6	4	518	fragment oblong de plaquette, de section triangulaire	4c
	F186	percuteur- pilon	percussion	dolerite	11,5	5,5	3,2	411	sur hache polie, forme triangulaire et section ovoïde à flancs droits	5a
	F186 us env. 0 à 20 cm ; n°1	percuteur	percussion	grès	12,2	5,6	3,2	440	galeat de forme et section quadrangulaire	5b
	F186 us env. 0 à 20 cm ; n°2	« tas »	martelage	grès	9	7	2,4	278	galeat de forme ovoïde et section quadrangulaire	5c
Kersulec (Ploneour-Lanvern)										
	n°13 iso 35	outil de concassage / broyage	concassage et broyage	microgranite	10,2	7,7	7,4	510	galeat de forme et section ovoïde	7
	n°15 iso 35	« tas »	martelage	eclogite	4,6	4,7	2,5	140	fragment mésial de hache polie, forme trapézoïdale section ovoïde	6
	n°18 iso 40	outil de concassage / broyage	concassage et broyage	diorite	8,7	7,8	5,6	470	galeat de forme et section ovoïde	8
Beg-ar-Loued (Molène)										
	n°815, st 4 base cairn 17	percuteur de concassage	concassage et broyage	grès					massif	-
	n°1107 Sd II, G0-G1	outil de percussion multifonctionnel : enclume lithique et percuteur de concassage	concassage							
	n°1152 Sd II, carré G4, us 2020	molette de concassage	concassage et broyage							9a
	n°1195 Sd I, carré 3-4	percuteur de concassage	concassage et broyage	grès						-
	n°1196 Sd II, Q2, us 2100	enclume							« pavé », massif	-
	n°1168 Sd I, R4 us 2100	table de broyage	broyage						meule réutilisée	9b
La Colignière (Tremuson)										
	Tr. 4 St. 8 n°1	marteau	martelage	diorite	7,5	7	6	389	galeat de forme ovoïde avec base quadrangulaire	11
	Tr. 4 St. 8 n°2	marteau	martelage	grès quartzitique	8,5	6,5	5	417	galeat de forme et section ovoïde, fracturé	10
F221 (Plouisy)										
	F221 - surface n°1	pilon	pilage	dolerite	-	-	3	-	extrémité fracturée, forme cylindrique, section circulaire	12a
	F221 - surface n°3	« tas »	martelage	schiste micacé	10	3	1	55	galeat plat de forme triangulaire, plage ovoïde sur extrémité distale totalement émoussée	12b

Tabl. 1 – Caractéristiques technologiques pour les outils analysés.
Table 1 – Technological characteristics of the analyzed stone tools.

outils macrolithiques suivent les conventions actuellement partagées par les tracéologues travaillant sur des outillages en roches grenues (Adams *et al.*, 2009 ; Hayes *et al.*, 2018). Au niveau macroscopique, les principaux critères descriptifs incluent la topographie et la micro-topographie des surfaces d'utilisation. Plusieurs critères permettent de caractériser le nivellement des surfaces : distribution, densité, incidence, morphologie et texture. Les stries sont décrites en termes de distribution, de densité, d'orientation et de dimensions. Les déformations du volume des grains impliquent la reconnaissance d'arrondis des arêtes et de microfractures. Au niveau microscopique, les micropoli sont décrits suivant la terminologie généralement admise, adaptée aux roches grenues. Notre référentiel expérimental de comparaison inclut près de 130 outils, impliqués dans une large gamme d'activités. Outre les tests réalisés sur le broyage et pilage des ressources végétales (céréales, légumineuses, noix, plantes) et des colorants, le référentiel comprend également des outils utilisés par percussion, abrasion et polissage, pour le façonnage de vases en céramique, d'objets de parure, d'outils en pierre et en os, ainsi que l'assouplissement des peaux animales et fibres textiles (Hamon, 2008). Concernant spécifiquement les outils à cupule, plusieurs travaux expérimentaux ont abordé leur utilisation pour une vaste gamme de produits allant des végétaux à coques dures au débitage lithique (Donnart *et al.*, 2009 ; Roda Gilabert *et al.*, 2012). Dans ce dernier cas, le débitage par percussion bipolaire sur enclume, dont les nucléus en forme de pièce esquillée, laissent sur les macro-outils des impacts punctiformes et linéaires caractéristiques. Les référentiels expérimentaux concernant l'emploi des outils en pierre pour la métallurgie restent quant à eux rares, bien que de récents travaux permettent aujourd'hui de disposer des premiers référentiels de traces d'utilisation relative au martelage et à l'abrasion des surfaces métalliques. Les travaux pionniers ont été conduits en particulier sur les objets en cuivre et en bronze des 3^e et 2^e millénaires av. J.-C. (Delgado-Raack et Risch, 2008). Nos récentes expérimentations, conduites en collaboration avec H. Gandois (UMR 8215 Trajectoires) et A. Burlot (University College Cork), ont permis d'élaborer un nouveau référentiel tracéologique de 18 tests incluant le concassage du minerai de cuivre, et la mise en forme des objets en cuivre et bronze par percussion et abrasion (Hamon *et al.*, 2020). Les observations tracéologiques des outils issus de ces deux séries d'expérimentations montrent que le travail du métal se caractérise par un nivellement dur et intense des surfaces, une fréquente micro-fracturation des grains et un micro-poli compact, fortement réflexif et micro-impacté, associés à de fines stries superficielles. Ces traces sont pour partie communes à celles observées lors du travail d'autres matières minérales dures, ce qui invite à la prudence dans l'interprétation des traces les moins développées ou les moins diagnostiquées.

Le tableau 2 ainsi que les figures 4 à 12 présentent le détail des analyses tracéologiques réalisées pour les 19 outils sélectionnés au sein des assemblages archéologiques considérés sur la base d'observations macroscopiques suggérant un possible usage comme outils de métallurgiste. Les outils sélectionnés pour le site de Beg ar Loued ont fait uniquement l'objet d'une analyse macroscopique, l'hypothèse d'un usage pour l'activité métallurgique n'ayant pas été celle privilégiée initialement pour ce type d'outil, dont l'utilisation semble sur ce site plutôt dédiée au débitage lithique sur enclume (Donnart, 2019). La synthèse des principales combinaisons de traces partagées par chacune des catégories d'outils archéologiques potentiellement employées dans le cadre de l'activité métallurgique peut se résumer comme suit.

- Les outils de concassage et de broyage présentent un certain nombre de traces d'utilisation aux caractéristiques communes, distinctes des outils à cupules associés au débitage lithique. La forme et la profondeur des impacts localisés dans le fond des cupules constituent des indicateurs du degré d'angularité des matériaux transformés, et de leur fraction minimale. La majorité des impacts en surface des outils sélectionnés indiquent des matériaux durs, anguleux, de fraction pouvant aller jusqu'à 2 à 3 cm, et fracturés avec une force certaine étant donné leur profondeur. En périphérie de ces impacts, les surfaces de broyage présentent un arasement prononcé, un émoussé doux et débordant des arêtes, et dans certains cas des plages lustrées fortement réflexives. Un micropoli, le plus souvent semi-fermé, grenu et micro-impacté, caractérise les surfaces à fort grossissement. Des stries obliques sont associées à ces traces. Si ces dernières renvoient sans conteste à la transformation de matières minérales, il reste très difficile en l'état actuel de pouvoir rattacher les caractéristiques des impacts de percussion spécifiquement à des actions en lien avec le traitement du minerai plutôt qu'à d'autres matières minérales dures. À l'inverse, l'analyse du galet à cupule (n° 26) de Plo-néour-Lanvern met en avant des plages émoussées à la morphologie fluide et des grains arrondis évoquant plutôt le travail de matières organiques.

Les outils interprétés comme des tas présentent généralement des plages actives convexes, avec des facettes longitudinales souvent doubles et biseautées sur leurs extrémités. Il s'agit d'outils passifs employés pour la déformation plastique des objets et surfaces métalliques. Les surfaces actives portent un émoussé uniforme couvrant semi-fluide et débordant, réflexif, associé à des stries d'orientations variables et, dans quelques cas, à des impacts de percussion punctiforme épars.

Les marteaux présentent, quant à eux, des zones de percussion plus ou moins fine punctiformes, associées à des plages à l'émoussé uniforme couvrant et très prononcé. Les surfaces résultant d'actions de martelage fin présentent un degré de nivellement dur de type plateau très prononcé et un mâchurage des grains.

→

Tabl. 2 – Caractéristiques tracéologiques pour les outils analysés (outils de Beg ar Loued excepté).
Table 2 – Use-wear characteristics of the analyzed stone tools (excepting stone tools from Beg ar Loued).

N° d'outil	Bel Air (Lannion)	Type	Traces de fabrication	Traces macroscopiques	Traces microscopiques
1	F50 Sd 470 us 6 n°1	outil de concassage et broyage dormant	galeat brut	Faces avec impacts de percussion concentrés en petites cupules à l'entame -et en complémentarité- d'une plage centrale polie de façon discontinue + Tranche convexe portant deux facettes de fine percussion couvrante formant un biseau sur près de 4 cm de large	Arasement des grains, absence de microfracturation, légère altération de surface des grains. Résidus rouges / cuivrés. Micropolis épars, semi-fermé à compact, fortement réflexif, plat, dur, d'aspect grenu. Entrecoupé de stries obliques.
2	F470 sondage 474 us 3 à 50 cm	aiguilleur perforé	perforation circulaire bitronconique	Faces et tranches totalement émoussées avec, larges, sillons transversaux le long des arêtes longitudinales. Perforation avec encoches de suspension.	Plaques de micropolis sur faces + très forte brillance de micropolis dans fond des sillons linéaires transversaux sur tranche.
3	F1260 sondage 455 surface	aiguilleur oblong	galeat brut	Une des extrémités avec tranchant aménagé écrasé, extrémité opposée avec une pointe triangulaire écrasée. Chacune des faces intensément et régulièrement polie avec courtes stries fines parallèles transversales. Arêtes latérales polies, à l'exception de l'une d'entre elle qui présente un écrasement et un esquillement d'utilisation	Fort arasement accompagné d'un amalgame des grains prononcé. Points de micropolis extrêmement localisés sur la surface. Pas de caractérisation possible.
4	F186	percuteur-pilon	polissage couvrant de la surface	2 extrémités associant fine percussion + lissage + esquillement périphérique, 2 tranches façonnées par bouchardage, 2 faces avec impacts de percussion épars et plages de concentration d'impacts linéaires.	Pas de micropolis associés aux impacts de percussion/martelage sur faces des haches.
5	F186 us env. 0 à 20 cm ; n°1	percuteur	galeat brut	Extrémités utilisées en pliage associant fine percussion, lissage couvrant et esquillement secondaire, tandis que sur faces : impacts de percussion occasionnelle et des plages de fine percussion, notamment des concentrations d'impacts linéaires de percussion.	Fort mûchage des grains, nivellement très marqué en plateaux et un lissage macroscopique. Pas de micropoli visible.
6	F186 us env. 0 à 20 cm ; n°2	« tas »	galeat brut	2 tranches plano-convexes totalement arasées avec développement d'un lissage uniforme couvrant associé à esquillement périphérique.	Indéterminée.
7	Kersulec (Ploneour-Lanvern) n°13 iso 35	outil de concassage / broyage	galeat brut	faces : lissage couvrant + microstries transversales : face 1 = 2 cupules type entaille, avec nombreux impacts de percussion + émoussé sur zone périphérique ; face 2 : cupule circulaire de fine percussion avec émoussé couvrant. 1 extrémité = à plat tot obtenu par fine percu + émoussé ; 2 extrémités = 2 plages de fine percussion en biseau.	A la périphérie des cupules, arasement concentré et fermé, de morphologie douce, reflexive, avec stries obliques, parallèles et couvrantes. Micropoli ouvert, doux à dur, avec une forte brillance métallisée.
8	n°15 iso 35	« tas »	polissage uniforme de l'ensemble des faces et tranches	Sur deux extrémités, surfaces plano-convexes en biseau présentent un lissage couvrant, semi-fluide, associé en particulier sur leur périphérie à des groupes de courtes stries obliques. L'arête périphérique de ces plages d'utilisation présente un émoussé débordant, un lustré brillant et de courtes et denses microstries transversales. Y sont généralement associées des facettes longitudinales polies. L'une d'elle sur l'un des flancs (n°5) porte très clairement des stries longitudinales.	Aucun micropoli visible sur l'une des extrémités. Sur l'autre extrémité, micropoli brillant, semi-fermé, dur, microimpacté.
9	n°18 iso 40	outil de concassage / broyage	galeat brut	1 face avec cupule de percussion profonde, 2 extrémités avec plage de percussion circulaire profonde à entame de surf. naturelle, 2 zones circulaires plano-concaves sur 1 bord avec fine percussion + émoussé, 1 zone circulaire plano-concave sur 1 bord avec fine percussion + émoussé.	Arasement doux avec orientation transversale, grains microfracturés, micropoli brillant, semi-fermé, dur, microimpacté.
16	La Coignière (Tremuson) Tr. 4 St. 8 : n°1	marteau	galeat brut	Arêtes et angles densément percutes jusqu'à aplanissement, en particulier sur l'extrémité distale opposée à la large extrémité quadrangulaire qui porte une cupule de percussion en son centre.	Zone émoussée et polie, grains avec émoussé luisant, de façon uniforme, fluide. Pas de micropoli visible sur 2 faces...
17	Tr. 4 St. 8 : n°2 F221 (Plouisy)	marteau	galeat brut	Extrémité avec percussion grossière, 2 faces portent un lissage couvrant très marqué et uniforme et des concentrations de petits impacts de percussion organisés en microcupules sur l'axe central de l'outil.	Percussion couvrante par arrachage de grains. Rares plages de micropoli, très localisées...
18	F221 - surface	pilon	galeat brut	Extrémité polie par fine percussion, un poli couvrant et un esquillement périphérique.	Emoussé très localisé sur groupes de grains en relief ; émoussé fluide et luisant. Rare micropoli discontinu, grenu, associé à microstries transversales.
19	F221 - surface	tas	galeat brut	Emoussé couvrant de manipulation, une fine percussion de l'extrémité proximale et une surface distale convexe totalement lissée associée à des stries longitudinales.	Stries longitudinales, fines superficielles, sécantes, denses. Associées à un émoussé des grains fluide et luisant Pas de micropoli visible.

Les surfaces actives des aiguisoirs associent des plages fortement arasées et totalement émoussées. Des groupes de stries denses et transversales sont généralement plus marquées le long des arêtes, tandis que leur orientation indique un geste plutôt régulier. Les micropolis apparaissent localisés, et très fortement réflexifs. Sur l'aiguiseur perforé de Lannion, des micropolis sont particulièrement visibles dans le fond des sillons et des plages linéaires orientées transversalement sur la tranche de l'outil, pour certaines potentiellement liées à une phase de façonnage de l'objet.

L'analyse tracéologique de cette série d'outils permet ainsi de déterminer plus précisément le fonctionnement détaillé, ainsi que le rôle respectif de chaque catégorie dans les chaînes opératoires de production métallurgique. Elle souligne la diversité des étapes et actions dans lesquelles l'outillage en pierre était employé, depuis la transformation probable du minerai jusqu'à l'entretien des outils.

Analyses élémentaires

Afin de consolider les hypothèses permises par les analyses tracéologiques, il paraissait important de tester la présence sur les outils d'éléments chimiques relatifs aux métaux, minerais ou alliages qu'ils auraient travaillés. Cependant, les traces métalliques laissées par le travail des métallurgistes sur ces outils lithiques qu'il s'agit de détecter par XRF correspondent à des quantités très faibles, avec des teneurs souvent proches des seuils de détection des instruments disponibles. Il faut aussi considérer que certains des éléments métalliques d'intérêt peuvent également être présents naturellement dans la composition des roches qui constituent ces outils. De plus, le comportement de certains éléments métalliques dans l'environnement immédiat de dépôt peut influencer leur conservation. En effet, si des éléments sont peu lixiviables, tel que l'étain, d'autres tels que le cuivre, voire l'arsenic, peuvent être facilement dissous, devenir mobiles et se disperser dans le sédiment environnant. De même, des éléments éventuellement présents dans le sédiment tels que l'arsenic, le zinc et plus encore le fer peuvent se déposer sur les objets. Ainsi, pour vérifier un enrichissement relatif au niveau des traces d'utilisation, des analyses ont été réalisées sur plusieurs faces, dont des surfaces naturelles, ou mieux encore, sur des cassures permettant l'accès au cœur de la roche.

Lors des analyses des outils précités, chaque mesure ou spectre XRF acquis permet d'identifier les éléments chimiques en présence et d'évaluer leur distribution sur les objets, soit ponctuellement (pXRF), soit sous forme de cartographie élémentaire (Sy-XRF). S'ils sont suffisamment épargnés par la taphonomie, la combinaison de ces deux modalités de mesure permet de révéler quels résidus métalliques étaient initialement présents dans les minerais ou alliages de bronze possiblement mis en forme avec les outils étudiés.

Analyses élémentaires avec une instrumentation pXRF

Instrumentation pXRF

L'analyse élémentaire des outils archéologiques a été effectuée par pXRF avec un instrument Thermo Scientific Niton XL3t GOLD (Laboratoire Archéosciences de l'UMR 6566 CReAAH) dont l'excitation par rayons X est produite par un générateur à anode Ag (22 keV). Outre les avantages de la portabilité de cet instrument, cette technique permet la détection et la quantification élémentaire en mettant quasi au contact l'instrument avec l'objet étudié (la distance entre l'objet et le détecteur est de quelques millimètres afin de limiter l'absorption par l'air des rayonnements X émis, important notamment pour les éléments légers) définissant ainsi une zone d'analyse d'un diamètre de 3 mm. L'appareil propose des algorithmes de calcul propriétaires pour la quantification des éléments adaptés aux types de matériaux analysés et aux éléments chimiques ciblés. Dans le cas présent, le mode de quantification intitulé « minerai Cu/Zn » a été employé, en raison des outils lithiques analysés qui sont caractérisés par une matrice constituée d'éléments légers et leurs oxydes, principalement le silicium, et dans laquelle des éléments métalliques plus lourds sont recherchés. Les acquisitions sont réalisées sous des tensions de 40 kV à 50 kV. Des mesures de standards internationaux sont également réalisées pour valider la quantification. Ces paramètres instrumentaux donnent accès à un large domaine en énergie et permettent de détecter et quantifier les métaux de transitions tels le Cu et le Ni, mais aussi l'As (raies K), le Pb (raies L) et le Sn (raies K).

Résultats pXRF

Les résultats des analyses pXRF sont présentés dans le tableau 3 récapitulatif. Les outils de Beg ar Loued et Plouisy n'ont pas pu faire l'objet de telles analyses.

Outils de Bel-Air à Lannion

L'aiguiseur perforé de Lannion Bel-Air (n° 2) présente des teneurs détectables en Ni, Zn, As et Cu. Ces résultats laissent penser au travail du métal. Néanmoins, toutes les surfaces analysées présentent des teneurs assez similaires, qu'elles portent des traces de travail ou non. Il est assez difficile de conclure quant à l'origine de ces métaux, entre marques de travail ou contamination.

En revanche, l'aiguiseur oblong de Lannion Bel-Air (n° 3) présente un enrichissement relatif en As, Zn et Ni sur la surface polie permettant d'y voir l'empreinte du travail du métal, peut-être un cuivre arsénié. Ce pourrait être le même type de métal, à savoir du cuivre arsénié qui aurait été travaillé sur l'outil de concassage et broyage dormant de Lannion Bel-Air puisque des enrichissements en cuivre et arsenic ont été détectés dans et autour de la cupule.

L'outil de Lannion Bel-Air (n° 6, F186) présente des traces de Sn montrant peut-être le travail d'un objet en bronze. L'absence de détection du cuivre par pXRF peut être due à un phénomène d'altération et de dispersion

Site	Lannion Bel Air			Lannion Bel Air			Lannion Bel Air		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n° outil	F50 Sd 470 us 6 n°1	F470 sondage 474 us 3 à 50 cm	F470 sondage 474 us 3 à 50 cm	F1260 sondage 455 surface	F1260 sondage 455 surface	F1260 sondage 455 surface	F186 us env. 0 à 20 cm ; n°2	F186 us env. 0 à 20 cm ; n°2	F186 us env. 0 à 20 cm ; n°2
localisation	outil de concassage et broyage dormant	F470 sondage 474 us 3 à 50 cm	F470 sondage 474 us 3 à 50 cm	F1260 sondage 455 surface	F1260 sondage 455 surface	F1260 sondage 455 surface	F186 us env. 0 à 20 cm ; n°2	F186 us env. 0 à 20 cm ; n°2	F186 us env. 0 à 20 cm ; n°2
nature outil	face principale, plages polies autour de la concentration d'impacts de percussion	aiguiseur perforé	aiguiseur perforé	aiguiseur oblong	aiguiseur oblong	aiguiseur oblong	« tas »	« tas »	« tas »
localisation analyse		contact face et extrémité distale (zone 1)	près de perforation (référentiel)	tranche avec stries et poli	face polie	surface naturelle (référentiel)	face supérieure	dos	tranche
temps analyse	3 mn	3 mn	3 mn	3 mn	3 mn	3 mn	2 mn	2 mn	2 mn
Ni	0	1150 (127)	1827 (135)	308 (110)	443 (114)	374 (113)	0	0	0
Cu	0	0	96 (45)	0	0	0	0	0	0
Sn	0	0	0	0	0	0	99	0	0
Zn	0	283 (43)	509 (51)	226 (43)	208 (44)	125 (38)	0	0	0
As	80 (8)	146 (28)	30 (15)	77 (25)	54 (24)	55 (26)	0	0	0

Site	Ploneour			Ploneour			Ploneour			Tremuson		
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
n° outil	n°13 iso 35	n°13 iso 35	n°13 iso 35	n°15 iso 35	n°15 iso 35	n°15 iso 40	n°18 iso 40	n°18 iso 40	n°18 iso 40	n°18 iso 40	n°18 iso 40	n°18 iso 40
localisation	outil de concassage / broyage	outil de concassage / broyage	outil de concassage / broyage	Marteau sur hache	Marteau sur hache	Marteau sur hache	outil de concassage / broyage	Marteau sur galeit de diorite	Marteau sur galeit de diorite	Marteau sur galeit de diorite	Marteau sur galeit de diorite	Marteau sur galeit de quartzite
nature outil	face, dans grande cupule	face, micropoli sur aspérités	face, micropoli sur aspérités	extrémité 1	extrémité 2	au dessus de la cupule principale	Base percutee sur zone polie	Grande face polie	Face émoussée	Face émoussée	Face émoussée	Face émoussée
temps analyse	3 mn	3 mn	20 s	3 mn	3 mn	3 mn	3 mn	3 mn	3 mn	3 mn	3 mn	3 mn
Ni	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cu	0	0	66 (23)	104 (21)	128 (24)	128 (24)	128 (24)	289 (27)	289 (27)	1556 (30)	1556 (30)	1556 (30)
Sn	0	0	45 (24)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zn	51 (11)	61 (11)	203 (18)	165 (15)	47 (11)	169 (17)	169 (17)	180 (18)	180 (18)	180 (18)	180 (18)	180 (18)
As	19 (12)	28 (8)	19 (12)	29 (9)	29 (9)	29 (9)	29 (9)	68 (12)	68 (12)	68 (12)	68 (12)	19 (8)

Tabl. 3 – Tableau récapitulatif des mesures réalisées au PXRf sur chaque outil analysé.

Table 3 – PXRf measures from each analyzed stone tools.

dans l'environnement. Néanmoins, cet outil aurait pu également servir au broyage d'un minerai d'étain.

Outils de Kersulec à Plonéour-Lanvern

Les outils n° 7 et n° 9 de Plonéour-Lanvern, associant actions de concassage et de broyage, présentent un léger enrichissement en As respectivement dans des aspérités d'un micropoli et près d'une cupule laissant penser à un éventuel travail du métal, probablement de type cuivre arsénié.

Le tas sur hache n° 8 de Plonéour-Lanvern présente un léger enrichissement en Cu et Sn évoquant le travail du bronze.

Outils de Colignière à Trémuson

Les marteaux sur galets de quartzite et dolérite de Trémuson (n° 16 et 17) présentent un enrichissement en Cu et plus faiblement en As sur les zones polies et percutées respectivement. Le travail du métal est mis en évidence par ces analyses, ce dernier pouvant correspondre à un cuivre faiblement arsénié.

Analyses XRF sous rayonnement Synchrotron

Instrumentation Sy-XRF

Les mesures de Sy-XRF ont été réalisées sur la ligne de lumière DiffAbs au synchrotron SOLEIL (France) en utilisant un faisceau de rayons X d'une énergie de 18 keV, monochromatisé par deux miroirs cylindriques à focalisation verticale et un monochromateur à doubles cristaux Si(111) permettant la focalisation horizontale. La taille du faisceau est classiquement de 300 µm, mais peut être réduite à 50 µm grâce à un *pinhole* en molybdène.

Un balayage bidimensionnel rapide de l'outil analysé est effectué en déplaçant les tables de translation qui le portent suivant un plan orienté selon un angle d'incidence de 25° par rapport au faisceau direct. Le protocole de mesure est effectué en deux temps : une première cartographie est réalisée sur quasi l'ensemble de l'objet, avec un pas de mesure de 300 µm puis une seconde cartographie est acquise avec une meilleure résolution, soit un pas de mesure de 50 µm, autour d'une zone d'intérêt, définie par les traces d'éléments métalliques révélés par la première cartographie. Les dimensions et résolutions des deux cartographies sont ajustées en fonction de la taille de l'outil et des zones d'intérêt définies par l'analyse tracéologique. Grâce à cette méthodologie, dont les détails et résultats ont fait l'objet d'une précédente publication (Hamon *et al.*, 2020), des cartographies élémentaires sur de grandes surfaces (pluri-centrimétriques), voire sur l'ensemble de l'outil sont obtenues en un temps limité (en une heure il est possible d'acquérir une cartographie de 5 000 mm² avec un pas de 300 µm ou une cartographie de 200 mm² avec un pas de 50 µm).

Un spectre XRF complet est acquis pour chaque pixel d'une cartographie à l'aide d'un détecteur Silicon Drift à quatre éléments (SDD Vortex-ME4® Hitachi) orienté à 90° par rapport au faisceau incident dans le plan horizontal afin de minimiser la contribution de la diffusion des rayons X. Comme toutes les expériences ont été réalisées à température ambiante et à la pression atmosphérique, les

raies K de l'Ar contenu dans l'air ambiant sont visibles dans les spectres XRF. Malheureusement dans ces conditions le Sn est difficilement identifiable en faible proportion car ses raies L d'émission pourraient être confondues avec les raies K de l'Ar, du K ou du Ca.

Résultats des analyses XRF sous rayonnement Synchrotron

Si l'ensemble des 19 outils de notre corpus ont fait l'objet de mesures selon le protocole établi, seules les analyses permettant de discuter de la présence de résidus de cuivre sont décrites en détail ici pour chaque outil.

Outils de Bel-Air à Lannion

Une première cartographie Sy-XRF réalisée sur la surface de l'outil de concassage et de broyage dormant (n° 1), montrant des traces d'utilisation, révèle un point intense de Cu, mais isolé (fig. 13). Une seconde cartographie réalisée autour de cette zone d'intérêt avec une meilleure résolution met en évidence les éléments qui se concentrent dans les stries ou fissures du matériau (tels que Ca, Ti, Sr, Y), ou distribués de manière un peu plus homogène (tels que Fe ou Pb). Quelques résidus de Cu se situent à proximité d'un impact d'utilisation et une petite tache de Ni est co-localisée avec la présence de Cu. Le nickel, rare dans l'environnement naturel armoricain peut être marqueur de la présence de métal travaillé sur la surface des outils. L'As est aussi détecté, la raie K β à 12,7 keV formant un épaulement léger du pic du Br (venant de l'air ?) (voir spectre fig. 13), mais la quantité présente est trop faible pour en déterminer une distribution visible sur la cartographie.

Suite à la mise en évidence de traces métalliques sur une première carte élémentaire englobant la surface d'intérêt de l'aiguiseur perforé (n° 2), deux cartographies Sy-XRF ont été acquises afin de définir au mieux les traces de Cu suggérées sur le côté abrasé, à la fois au centre de la face (zone 1) et sur le bord (zone 2) (fig. 14). Pour les deux zones, les éléments contribuant à la composition élémentaire de la roche sont mis en évidence, leur distribution n'étant pas corrélée aux traces d'usure : Ca, Ti, Mn, Fe, Sr, Y. Certains de ces éléments sont distribués de manière homogène, comme Ca et Fe, tandis que d'autres sont présents sur des îlots intenses, comme Mn et Ti, dépendant certainement de la distribution de minéraux spécifiques composant la roche. Sur la zone 1, la distribution du Cu n'est pas homogène et une augmentation de la teneur en Cu est mesurée sur des zones localisées. En outre, certaines traces de Zn sont également présentes, mais pas nécessairement co-localisées avec le Cu. Les zones contenant les signatures des résidus de Cu et de Zn sont *a priori* liées aux polis. La zone 2, située sur le bord de l'outil, montre des concentrations de Cu très légèrement supérieures le long de rainures. Pour les deux zones, la comparaison des spectres XRF issus seulement de la roche et ceux acquis sur les traces d'usure confirme la différence d'intensité de la raie K α du Cu du spectre XRF et confirme donc la présence de Cu liée spécifiquement aux traces d'usure.

Une cartographie Sy-XRF a permis d'identifier des résidus métalliques localisés sur la partie centrale de

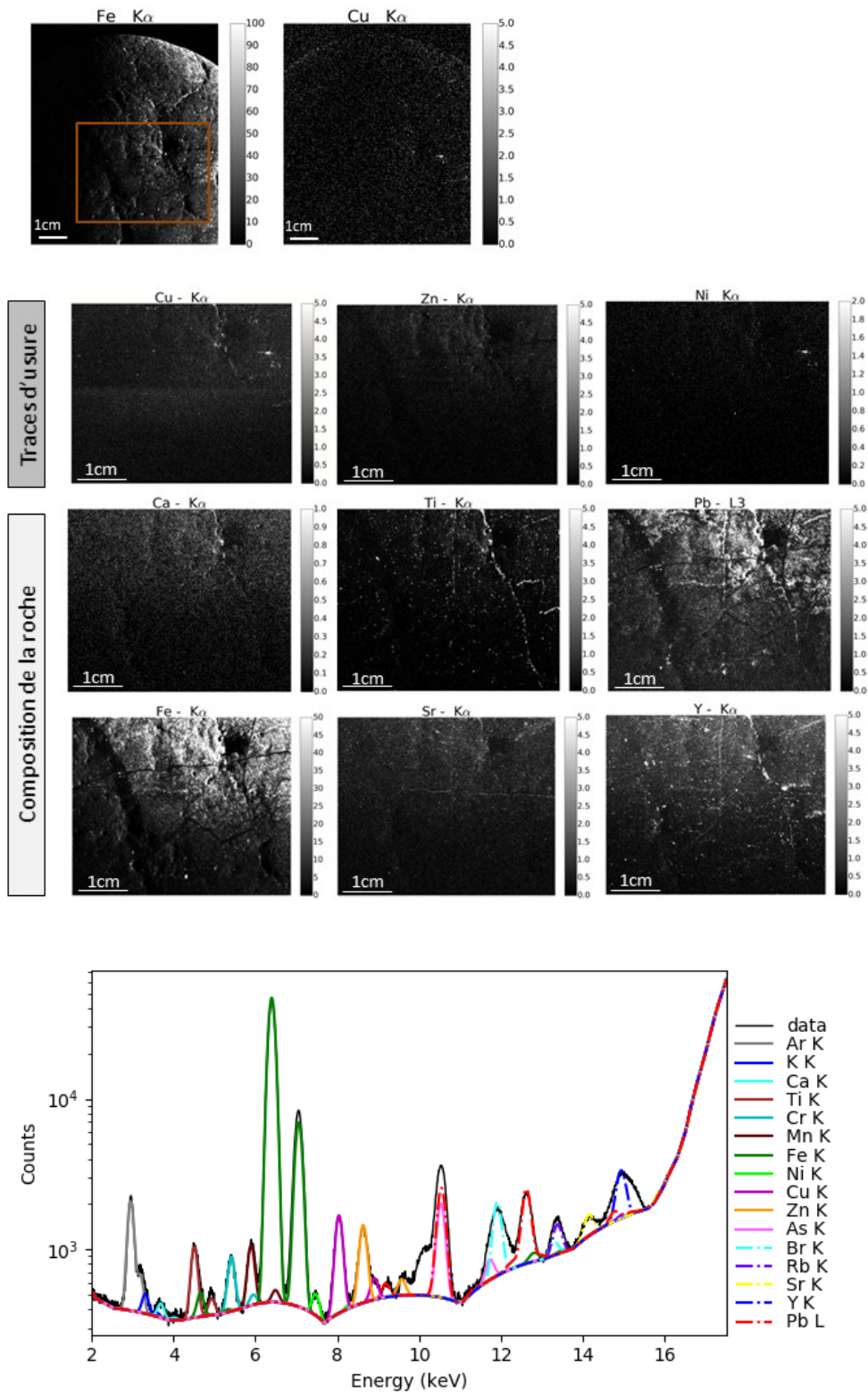
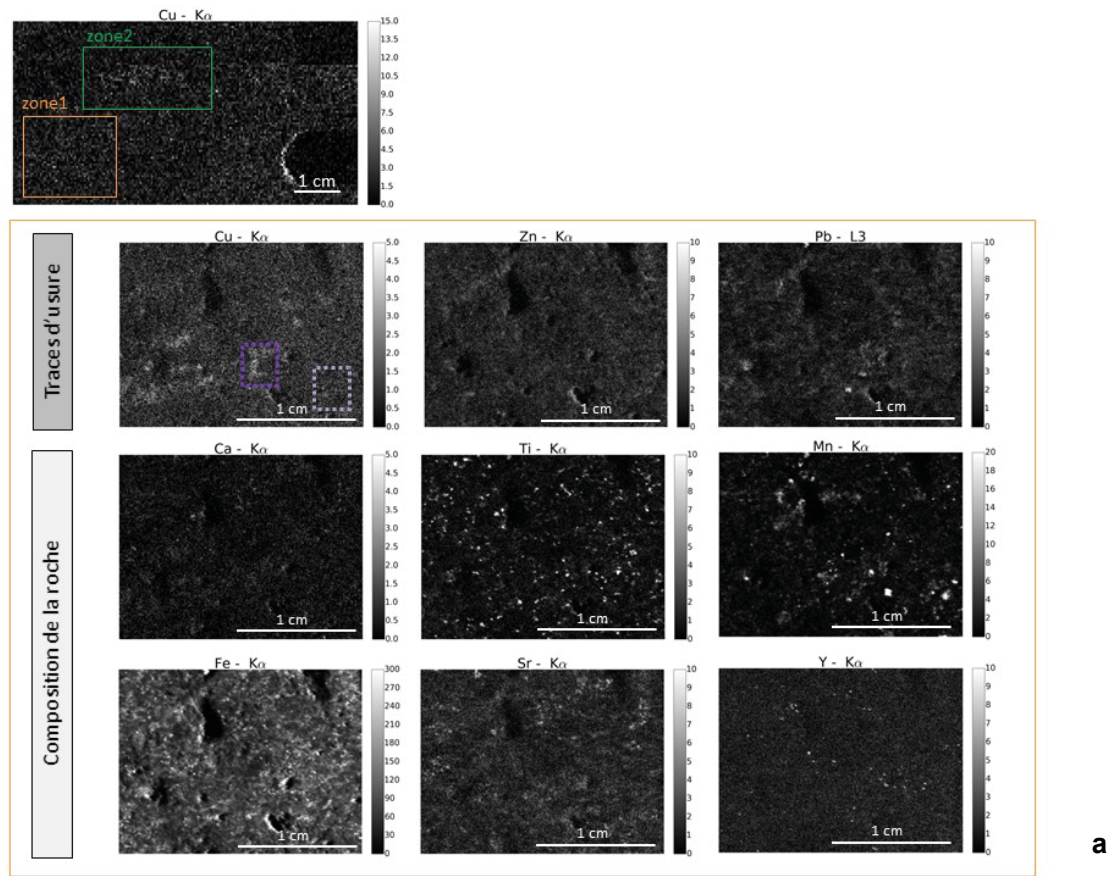
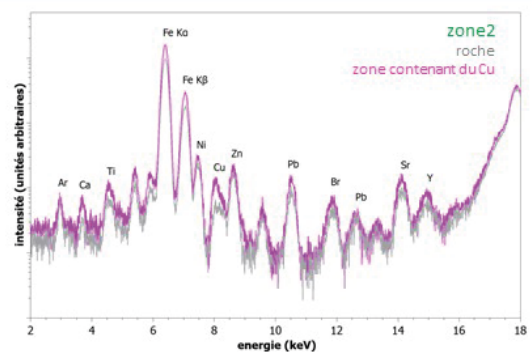
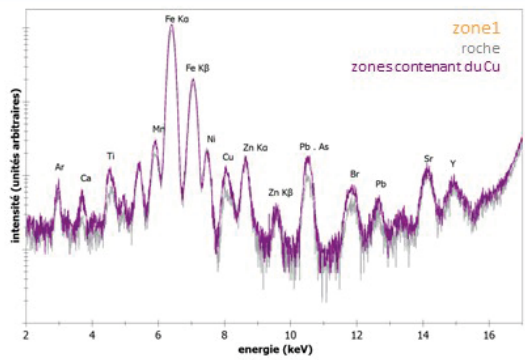
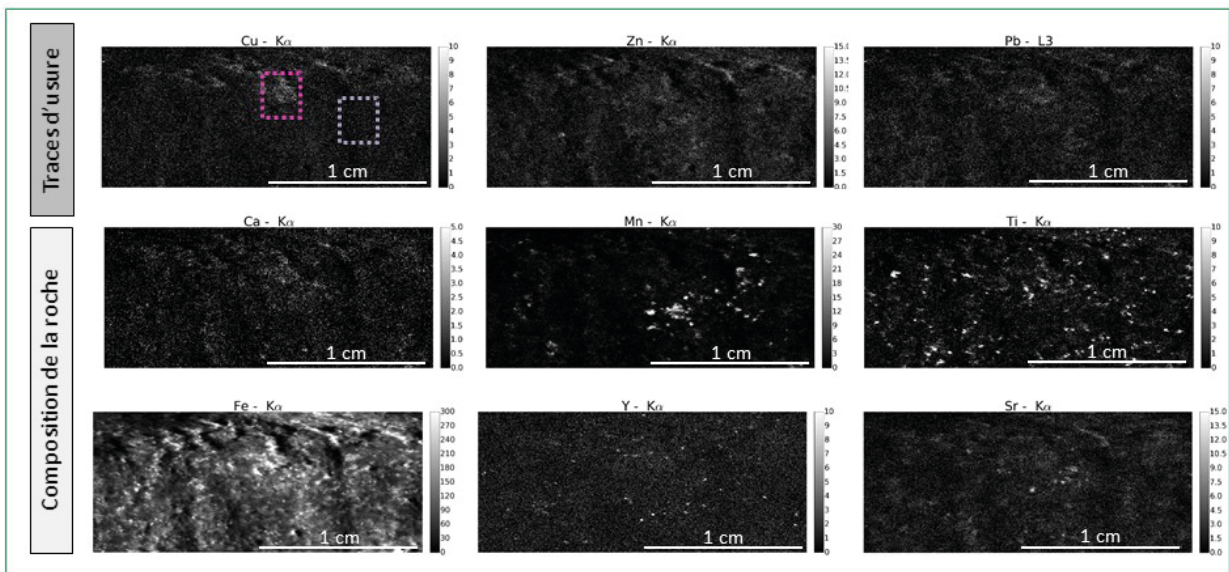


Fig. 13 – Analyses Sy-XRF, outil de concassage et broyage dormant Lannion Bel Air n°1 ; cartographie élémentaire. Fenêtre 1 (en haut) : paramètres d'acquisition : 80 × 90 mm2 (H × V), pas de balayage 300 μ m, 80 000 pixels, temps d'acquisition 30 ms par pixel ; zone d'intérêt : 47 × 40 mm² ; Fenêtre 2 (zoom sur le carré rouge ; au centre) : pas de balayage 50 μ m, temps d'acquisition 50 ms par pixel (durée totale de l'acquisition 12h). Légende : Ar = argon, K = potassium, Ca = calcium, Ti = titane, Cr = chrome, Mn = manganèse, Fe = fer, Ni = nickel, Cu = cuivre, Zn = zinc, As = arsenic, Br=brome, Rb = rubidium, Sr = strontium, Y = yttrium, Pb = plomb (cartographie et spectre : S. Reguer).

Fig. 13 – Sy-XRF analysis, anvil from Lannion Bel Air n°1; elementary map. Window 1 (top): acquisition parameters: 80 x 90 mm² (H x V), scan step 300 μ m, 80 000 pixels, acquisition time 30 ms by pixel; area of interest: 47 x 40 mm²; Window 2 (center) scan step 50 μ m, acquisition time 50 ms by pixel (total time of acquisition 12h) Caption : Ar = argon, K = potassium, Ca = calcium, Ti = titanium, Cr = chromium, Mn = manganese, Fe = iron, Ni = nickel, Cu = copper, Zn = zinc, As = arsenic, Br=bromine, Rb = rubidium, Sr = strontium, Y = yttrium, Pb = lead (map and spectrum: S. Reguer).



a



b

l'aiguiseur oblong (n° 3). Quelques très légères traces de Cu sont visibles au niveau du centre droit de la cartographie (fig. 15). Les éléments contribuant à la composition élémentaire de la roche sont : Ca, Ti, Mn, Fe, Rb, Sr et Y. Les distributions plus ou moins homogènes selon les éléments indiquent leur appartenance à certains minéraux. Une co-localisation du Cu et du Pb est marquée ; elle pourrait peut-être s'expliquer par le fait que dans cette région, le cuivre est associé aux minéralisations de plomb à moins que l'altération des filons de plomb ne conduise à la présence de minéraux d'altération du cuivre en surface.

Outils de Kersulec à Plonéour-Lanvern

Des cartographies Sy-XRF ont été acquises afin d'analyser les deux faces de l'outil de concassage et broyage (n° 7) portant des cupules visibles. Une de ces mesures, acquise avec une bonne résolution, se focalise sur la cupule qui occupe le centre de la face de l'outil. La répartition des principaux éléments chimiques identifiés est présentée en figure 16. Ca, Fe et Y sont répartis de manière assez homogène. Deux autres éléments, Ti et Rb, semblent liés à la répartition de certains minéraux spécifiques composant la roche. En effet, Ti apparaît sous forme de petites taches ou d'étoiles et Rb sous forme de taches diffuses. La répartition de ces cinq éléments ne montre aucune correspondance avec la distribution de traces d'utilisation indiquant donc clairement qu'il s'agit d'éléments constitutifs de la roche elle-même. En revanche, les cartographies élémentaires Sy-XRF (fig. 16) attirent l'attention sur deux autres éléments répartis sur une zone spécifique, Cu et Zn, localisées à la périphérie de la cupule où un nivellement lisse a été observé. Les traces sont visibles principalement sous forme de petites concentrations de points, de part et d'autre de la cupule, mais pas sur toute sa périphérie. En outre, les spectres XRF montrent une différence entre les mesures de ces zones spécifiques et la roche elle-même, où le Cu et le Zn sont nettement moins présents.

Les cartographies Sy-XRF acquises sur les deux faces du tas (n° 8) montrent des distributions élémentaires très particulières (fig. 17). En effet, les éléments Ti, Mn, Fe et Sr ont une distribution originale : certaines zones montrent des intensités diminuées tandis que d'autres sont inversement plus intenses. Par exemple la zone polie au centre est très marquée. Le polissage dû à l'usure masque les éléments composants la roche à cet endroit. En dehors de ces marques, Ca et Ti sont répartis de manière assez homogène, tandis que Fe et Mn présentent un aspect plus granuleux, ces effets sont certainement liés aux minéraux présents dans la roche.

Chaque face révèle un enrichissement en Cu et Zn au centre. Malgré la faible quantité mesurée, il convient de noter que la répartition du Cu et du Zn est en corrélation avec les zones polies.

Une cartographie des éléments a été acquise sur la face présentant des traces d'utilisation de l'outil multifonctionnel (n° 9) (fig. 18). Les mesures montrent clairement que Ca, Ti, Fe, Sr et Y et Pb sont des éléments constitutifs de la roche elle-même et liés à sa minéralogie. En effet la distribution de ces éléments est assez homogène malgré les points plus intenses, mais aléatoirement répartis pour Ti, Ca, Y. Deux petits points intenses révélant du Cu sont co-localisés avec Zn de part et d'autre de la cupule présentent un intérêt particulier. Leur localisation correspond en effet à celle d'une zone plus lisse, une trace d'usure. Cette présence de Cu est soulignée dans le spectre XRF (fig. 18).

Outils de la Colignière à Trémuson

Une cartographie élémentaire Sy-XRF de la surface plane du marteau n° 16 permet de localiser les zones d'intérêt tandis qu'une petite cartographie mieux résolue montre une roche très granuleuse constituée de Ca, Ti, Mn, Fe, Rb, Sr et Y avec des distributions marquées en pointillés pour Ti, liée à la minéralogie. Le spectre XRF permet d'identifier l'ensemble des éléments. La distribution élémentaire met aussi en évidence des traces très légères de Cu et de Pb sur l'objet (fig. 19).

La carte XRF (fig. 20) montre la distribution élémentaire sur la face principale du marteau n° 17 (Tr 4 St 8). Les éléments tels que Ca, Ti, Fe Sr et Y sont très probablement liés à la composition de la roche, avec une très grande homogénéité de distribution pour Ca et Sr. La distribution du Fe montre des taches, certainement en relation avec des minéraux spécifiques, de même pour Ti et Y. La zone analysée montre un très bel enrichissement en Cu avec une nette hétérogénéité dans sa distribution et de plus faibles traces de Zn. Les spectres XRF acquis sur la roche et sur la zone de Cu montrent une différence nette dans l'intensité des raies $K\alpha$ et $K\beta$ du Cu et du Zn (fig. 21).

Enfin, il doit être souligné que les analyses Sy-XRF n'ont détecté aucune traces d'éléments métalliques diagnostiques sur les outils provenant du site de Beg ar Loued à Molène.

Discussion croisée des analyses tracéologiques et élémentaires

L'analyse tracéologique seule a donc permis d'exclure pour 3 des 13 outils analysés une utilisation dans le



Fig. 14 – Analyse Sy-XRF, aiguiseur perforé Lannion Bel Air n°2 ; cartographie élémentaire du Cu : 90 × 40 mm², pas de balayage 500 µm, 14400 pixels, temps d'acquisition 50ms par pixel : **a**, zone 1 : 21 × 16 mm², pas de balayage 50 µm, 134 400 pixels ; **b**, zone 2 : 22 × 10 mm², pas de balayage 50 µm, 88 000 pixels, temps d'acquisition 30 ms par pixel. Spectres comparés sur résidus (carrés en couleur) et surfaces attenante (carrés gris) (cartographie et spectre : S. Reguer).

Fig. 14 – Sy-XRF analysis, perforated sharpener from Lannion Bel Air n°2; elementary map of Cu: 90 × 40 mm², step scan 500 µm, 14400 pixels, acquisition time 50ms by pixel: **a**, zone 1: 21 × 16 mm², step scan 50 µm, 134 400 pixels; **b**, zone 2: 22 × 10 mm², step scan 50 µm, 88 000 pixels, acquisition time 30 ms by pixel. Comparative spectra on residues (square in colour) and surrounding surface (square in grey) (map and spectrum: S. Reguer).

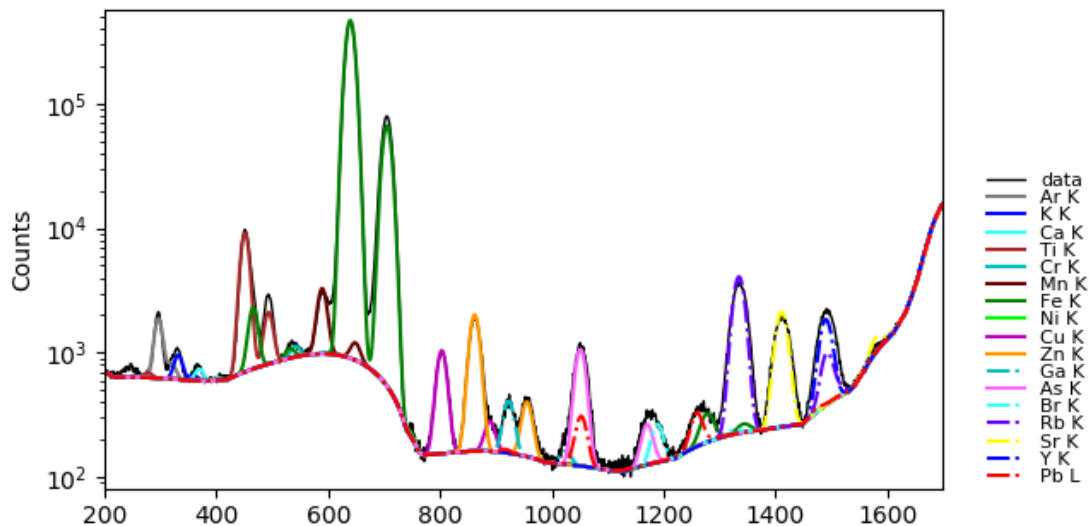
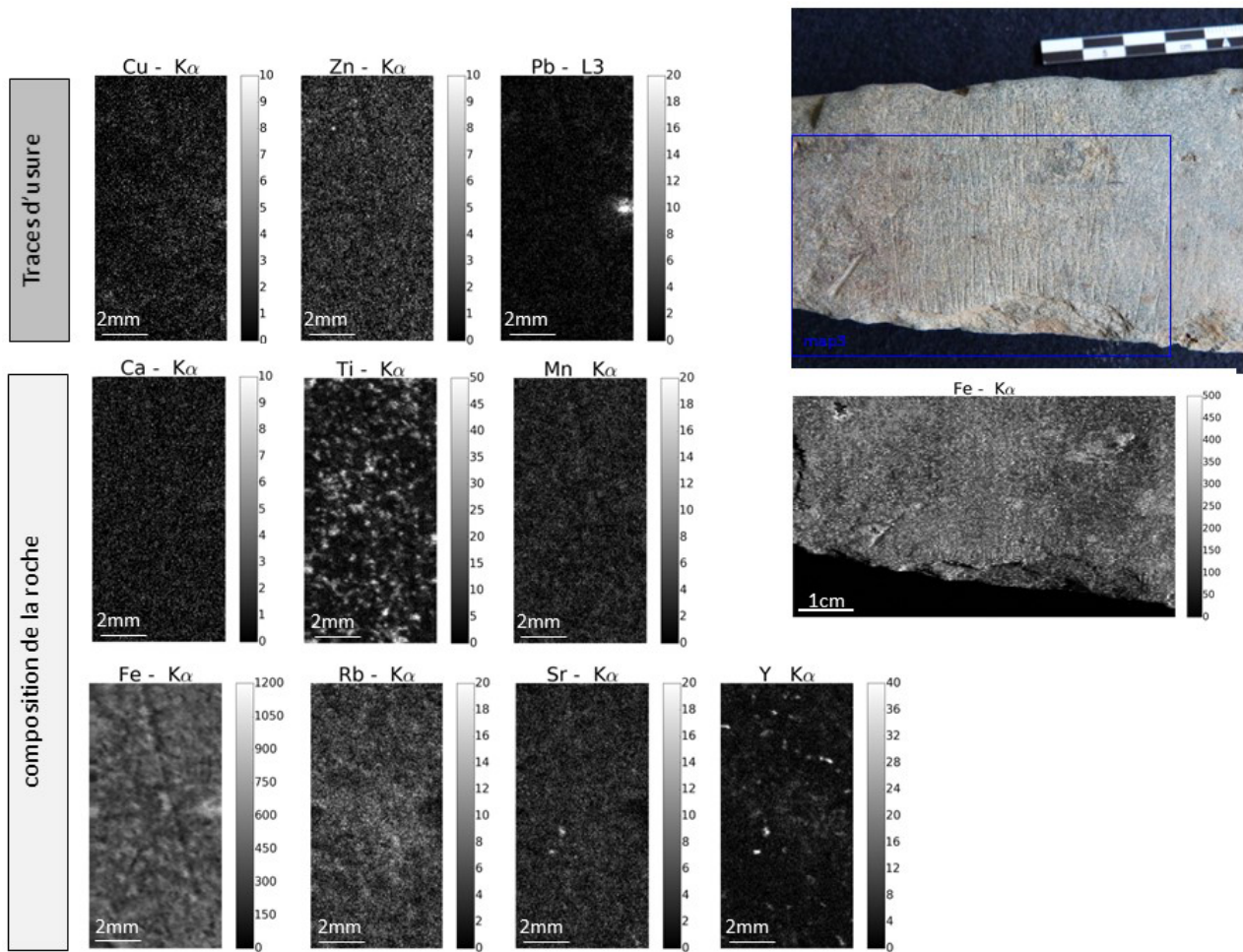


Fig. 15 – Analyse Sy-XRF, aiguiseur oblong Lannion Bel Air n°3 ; cartographie élémentaire globale du Fe (en haut à droite) : 80 × 42 mm², pas de balayage 300 μm, 37 333 pixels, temps d'acquisition 50 ms par pixel ; zone d'intérêt (à gauche) : 5 × 10 mm², pas de balayage 50 μm, 20 000 pixels, temps d'acquisition 50 ms par pixel (cartographie et spectre : S. Reguer).

Fig. 15 – Sy-XRF analysis, elongated sharpener from Lannion Bel Air n°3; elementary map of Fe (top right): 80 × 42 mm², step scan 300 μm, 37 333 pixels, acquisition time 50 ms by pixel; area of interest (left): 5 × 10 mm², step scan 50 μm, 20 000 pixels, acquisition time 50 ms by pixel (map and spectrum: S. Reguer).

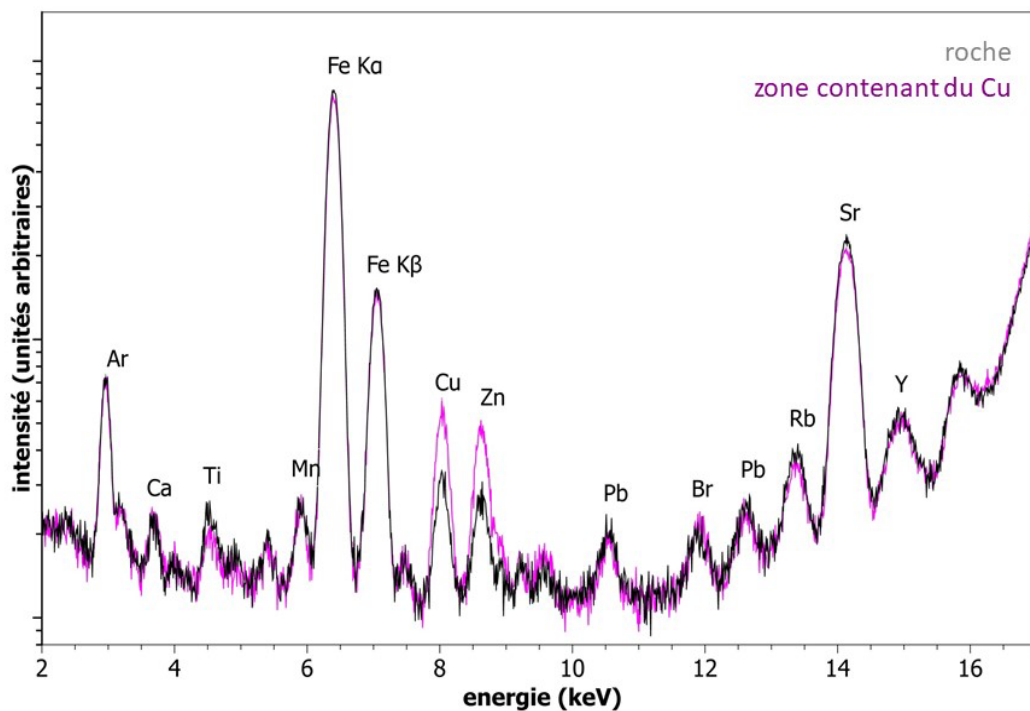
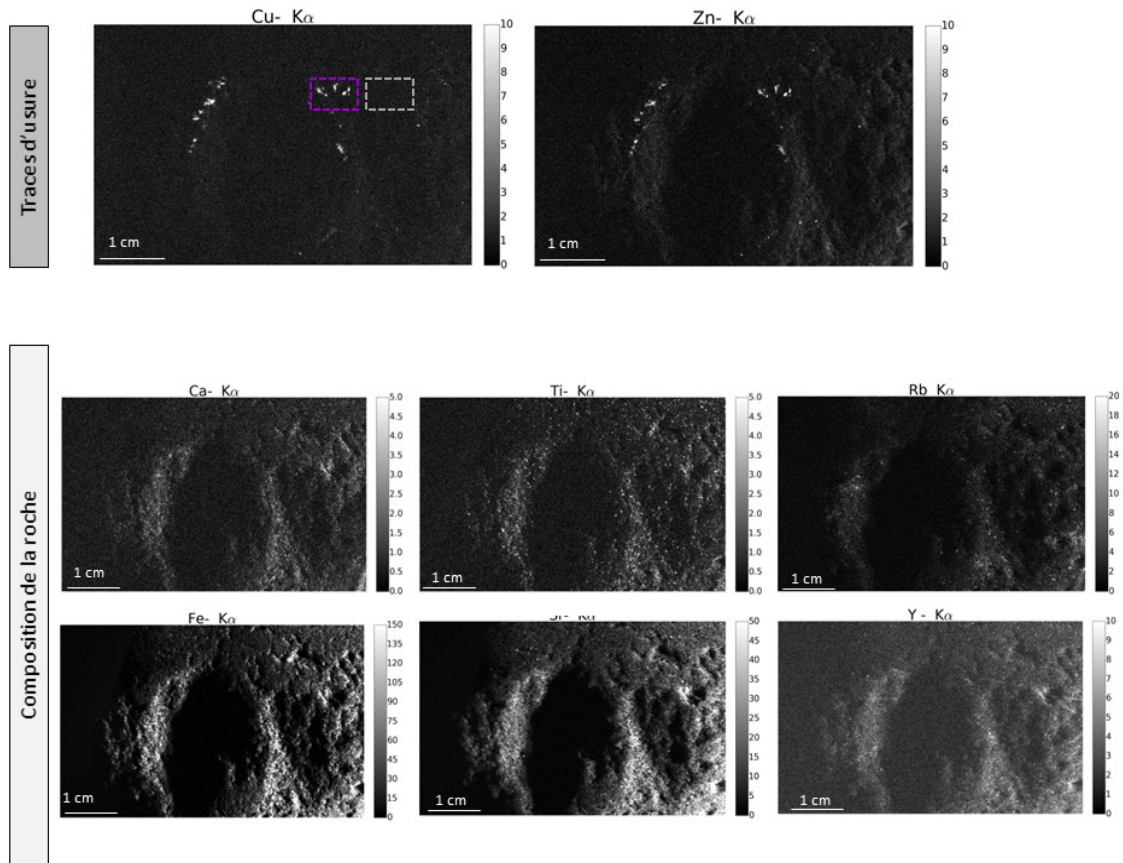


Fig. 16 – Analyse Sy-XRF, outil de concassage/broyage Ploneour-Lanvern n°7 ; cartographie élémentaire : 60 × 40 mm², pas de balayage 50 μm, 960 000 pixels, temps d'acquisition 50 ms par pixel (durée totale de l'acquisition 13h30). Spectres comparés sur résidus (carrés en couleur) et surfaces attenante (carrés gris) (cartographie et spectre : S. Reguer).

Fig. 16 – Sy-XRF analysis, crushing and grinding tool from Ploneour-Lanvern n°7; elementary map of: 60 × 40 mm², step scan 50 μm, 960 000 pixels, acquisition time 50 ms by pixel (total time of acquisition 13h30). Comparative spectra on residues (square in colour) and surrounding surface (square in grey) (map and spectrum: S. Reguer).

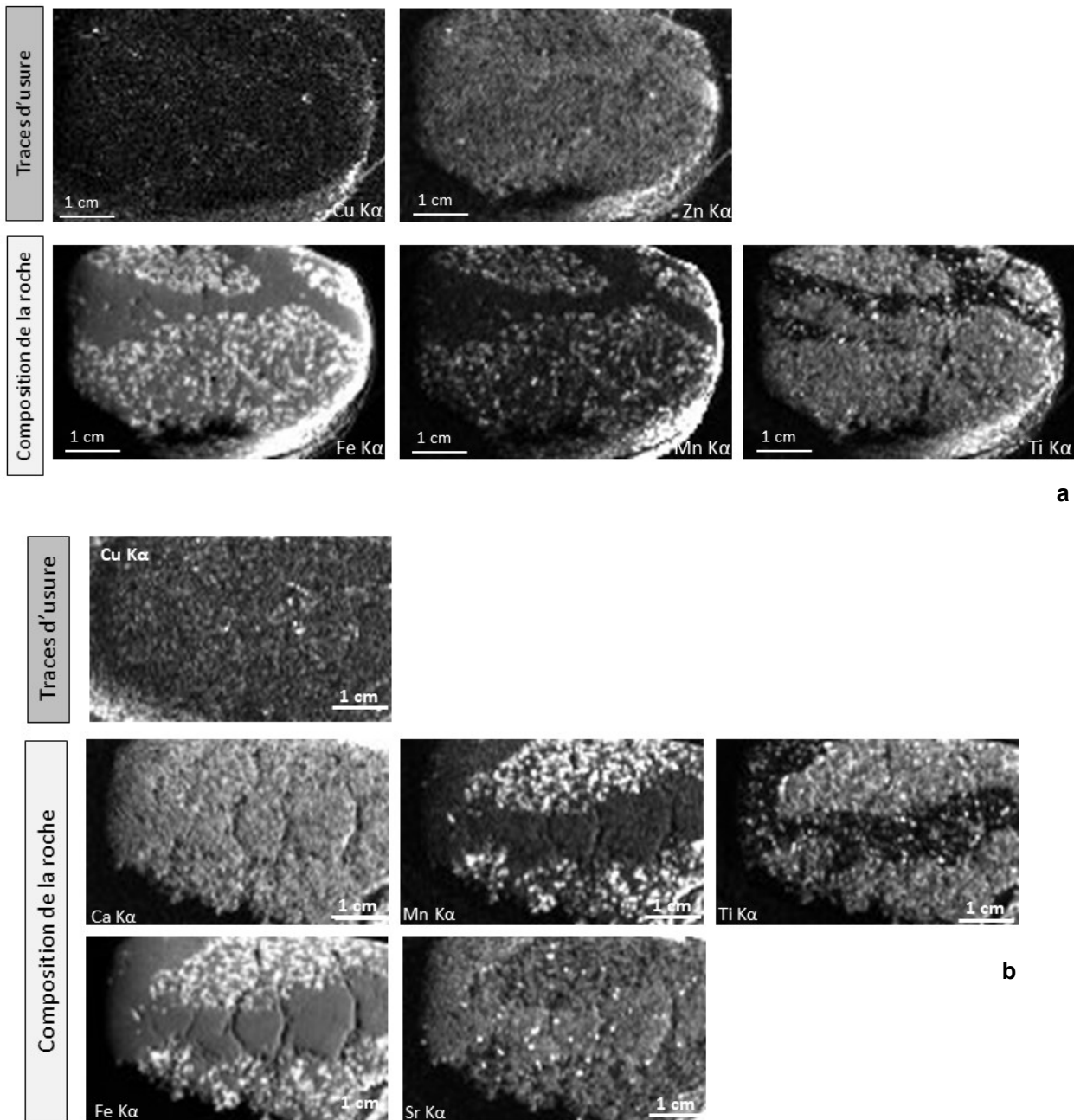


Fig. 17 – Analyse Sy-XRF, « tas » sur hache Ploneour-Lanvern n°8 (cartographie et spectre : S. Reguer).

Fig. 17 – Sy-XRF analysis, heap on reused axe from Ploneour-Lanvern n°8 (map and spectrum: S. Reguer).

cadre de la métallurgie, les 10 autres outils présentant des traces liées *a minima* au travail des matières minérales, avec pour les trois-quarts d'entre eux une combinaison de traces suggérant fortement le travail du minerai ou du métal. La combinaison des analyses tracéologiques et des analyses XRF permet de proposer un usage pour le traitement du minerai ou la transformation des matières métalliques pour 8 de ces 10 outils. Ce résultat permet de souligner que les hypothèses formulées à la suite de l'analyse tracéologique sont bien confortées par les analyses élémentaires de résidus (tabl. 4).

Ces résultats suggèrent que si l'analyse tracéologique trouve parfois ses limites dans la distinction entre minerais à faible teneur en éléments métalliques et autres roches de texture et dureté approchant, elle apparaît fon-

damentale pour guider pertinemment les analyses XRF. Seule une analyse tracéologique permettra en effet de pointer les plages où les traces microscopiques générées par l'utilisation sont mieux préservées. Cette analyse se révèle ainsi primordiale pour optimiser les chances de détecter des résidus préservés dans les interstices, les émoussés, et les micropolis formés par un processus non seulement d'abrasion de la surface de l'outil, mais aussi de dépôt de résidus de matières transformées (Hamon *et al.*, 2020). Plus généralement c'est aussi l'association et la concordance des indices apportés par les deux approches qui permet de conforter les interprétations sur l'usage des outils.

Outre sa facilité de mise en œuvre, l'analyse en p-XRF est en mesure de détecter des résidus de cuivre même

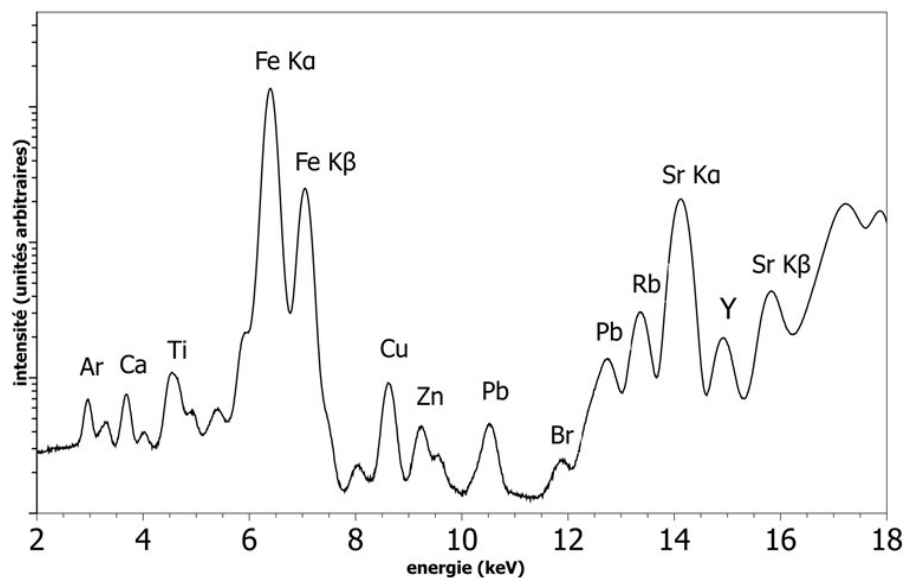
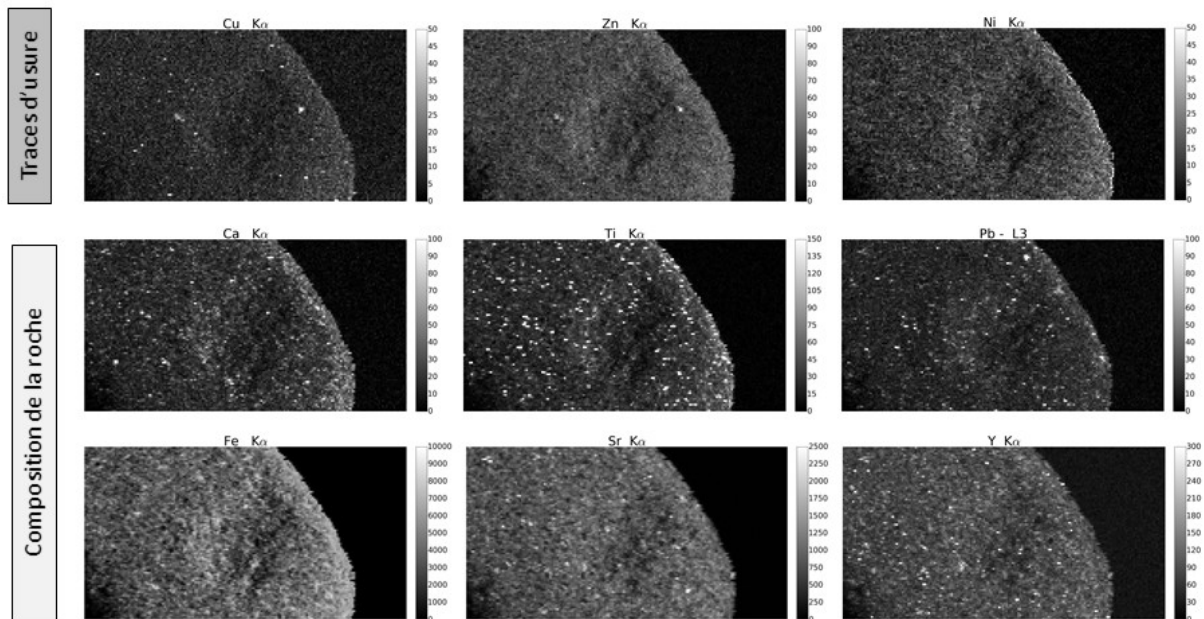


Fig. 18 – Analyse Sy-XRF, outil de concassage/broyage Ploneour-Lanvern n°9 (cartographie et spectre : S. Reguer).

Fig. 18 – Sy-XRF analysis, crushing-grinding tools from Ploneour-Lanvern n°9 (map and spectrum: S. Reguer).

dans des quantités relativement faibles et de détecter les éléments plus lourds, tels que l'étain. Une quantification moyenne est obtenue, représentant une surface d'analyse de l'ordre de 3 mm. Par ailleurs, la précision analytique permise par l'analyse Sy-XRF, grâce notamment aux cartographies de distribution élémentaires, avec une résolution choisie de quelques dizaines de micromètres, permet de bien distinguer des éléments chimiques relevant des minéraux composant les roches hétérogènes généralement utilisées pour le macro-outillage des résidus des matières transformées piégées à la surface. Elle montre également les corrélations entre les distributions élémentaires et les zones présentant des stigmates d'usage. Du fait des modalités de mise en œuvre, la complémen-

rité et concordance des résultats des analyses Sy-XRF et p-XRF en ce qui concerne la détection des résidus de cuivre est donc ici soulignée.

À partir de ces différentes mesures, il est envisageable de déterminer à partir de l'association des éléments détectés si la matière transformée relève plus du minerai ou du métal transformé. Les analyses XRF permettent dans tous les cas de préciser le type potentiel de métal potentiellement traité (cuivre ou bronze), et de pister certains éléments participant de manière importante à leur composition. En effet, la présence d'étain a pu être révélée sur quelques outils (Lannion Bel-Air n° 6, et Plonéour-Lanvern n° 8) grâce aux mesures p-XRF. Des cartographies Sy-XRF à plus haute énergie (supérieure

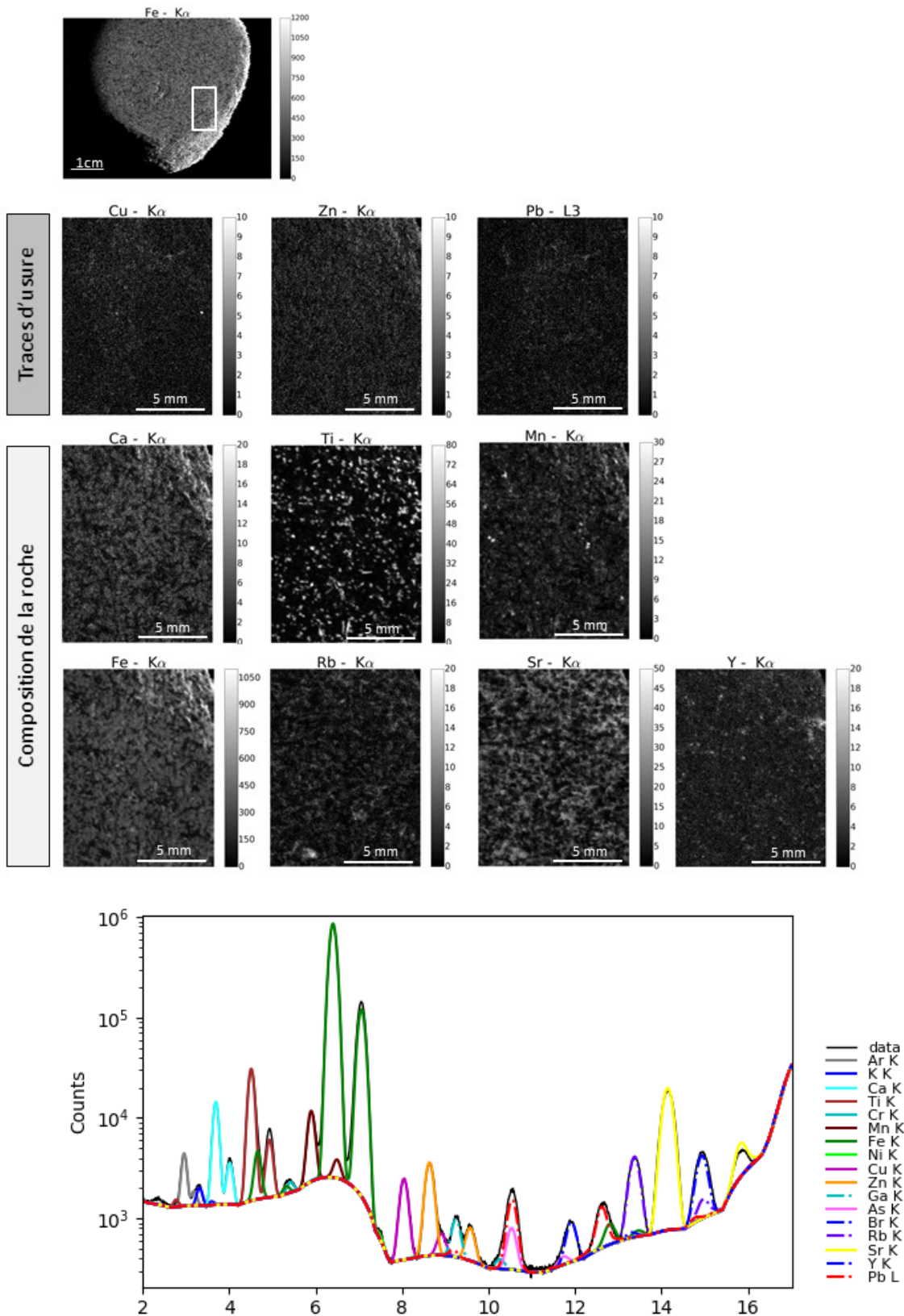


Fig. 19 – Analyse Sy-XRF, marteau Tremuson la Colignière n°16 ; cartographie élémentaire du Fe : 89 × 70 mm², pas de balayage 300 μm, 69222 pixels, temps d'acquisition 50 ms par pixel ; zone d'intérêt : 10 × 14 mm², pas de balayage 50 μm, 56000 pixels, temps d'acquisition 50 ms par pixel (cartographie et spectre : S. Reguer).

Fig. 19 – Sy-XRF analysis, hammer Tremuson la Colignière n°16; elementary map of Fe, acquisition parameters: 89 × 70 mm², step scan 300 μm, 69222 pixels, acquisition time 50 ms by pixel; zone d'intérêt : 10 × 14mm², step scan 50 μm, 56000 pixels, acquisition time 50 ms by pixel (map and spectrum: S. Reguer).

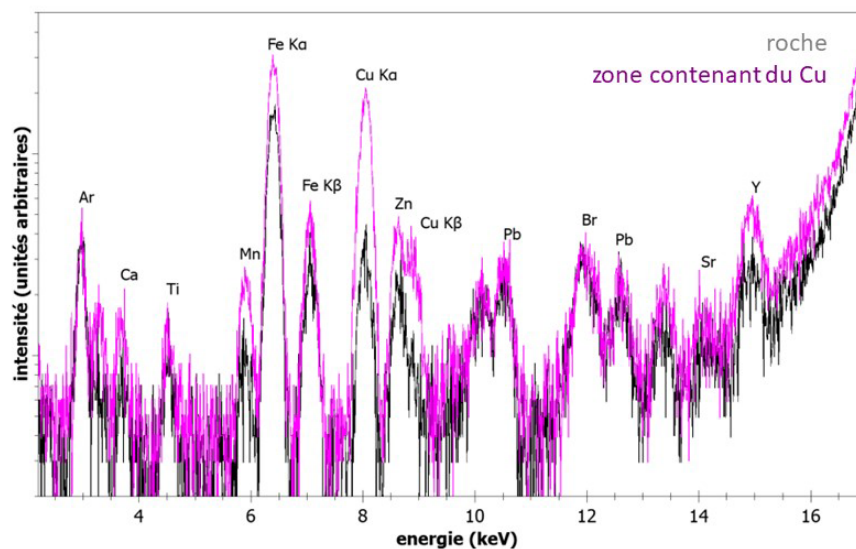
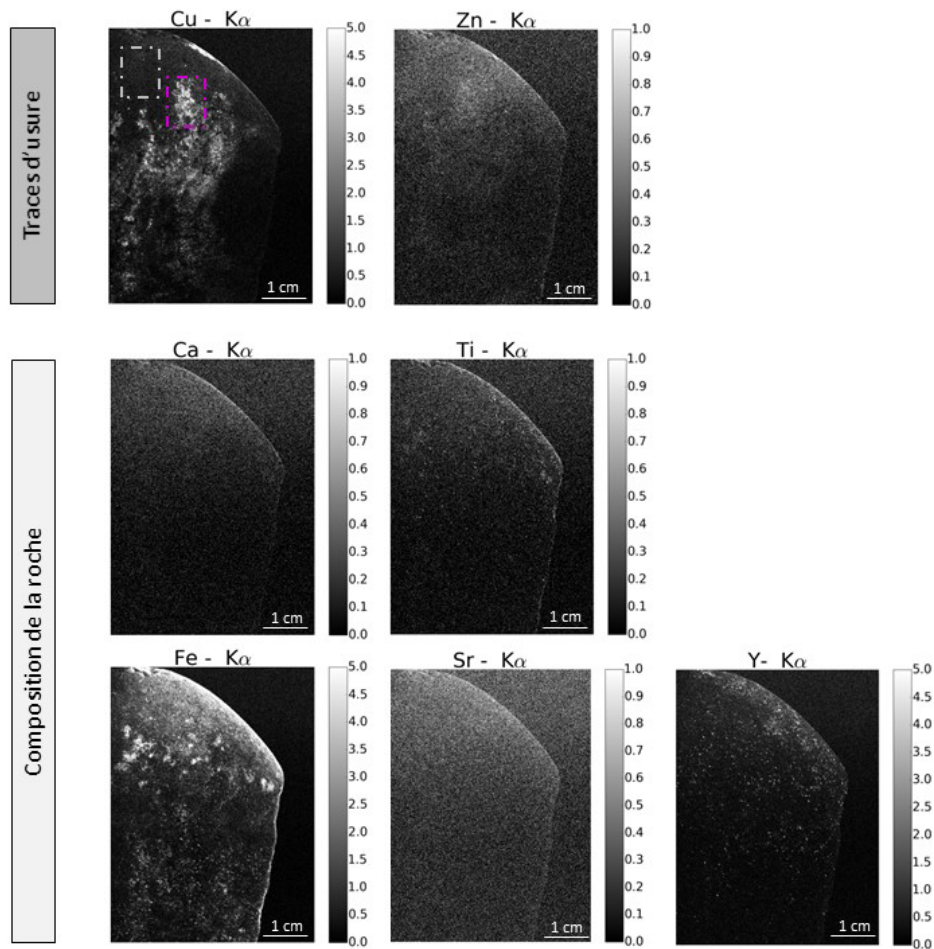


Fig. 20 – Analyse Sy-XRF, marteau Tremuson la Colignière n°17; cartographie élémentaire, 50 × 61 mm², 1 220 000 pixels, pas de balayage 50 μm, temps d'acquisition 50 ms par pixel (durée totale de l'acquisition 11h). Spectres comparés sur résidus (carrés en couleur) et surfaces attenante (carrés gris) (cartographie et spectre : S. Reguer).

Fig. 20 – Sy-XRF analysis, hammer Tremuson la Colignière n°17; elementary map 50 × 61 mm², 1 220 000 pixels, step scan 50 μm, acquisition time: 50 ms by pixel (total acquisition map 11h). Comparative spectra on residues (square in colour) and surrounding surface (square in grey) (map and spectrum: S. Reguer).

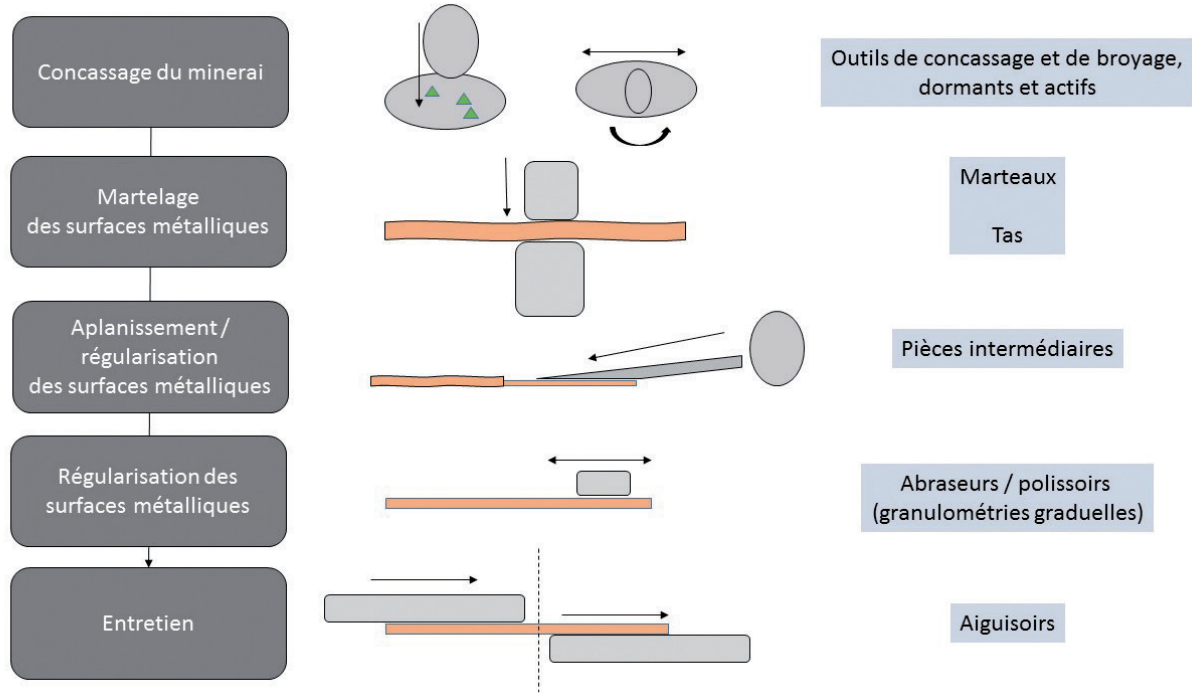


Fig. 21 – Représentation schématique de l’usage des outils en pierre aux différentes étapes de la production des objets en cuivre et bronze.

Fig. 21 – Schematic representation of the use of stone tools for the different steps in the production of copper and bronze objects.

à 25 keV, soit au-dessus du seuil K du Sn) permettraient d’en déterminer la distribution précise et ainsi affirmer les hypothèses suggérant le travail du bronze. D’autres méthodes pourraient également être envisagées, sous réserve de supports de positionnement et d’un dimensionnement des chambres d’analyses adaptés aux outils en pierre archéologiques parfois de grandes dimensions et poids. Ceci a notamment freiné la mise en œuvre d’analyses MEB-EDX, pour lesquelles la porosité de certaines roches pourrait constituer un autre obstacle dans le cas d’une mise sous vide nécessaire. La souplesse de la mise en œuvre de la mesure XRF sur ces objets volumineux et la flexibilité des échelles cartographiques en Sy-XRF sont des caractéristiques-clés pour le choix de ces instrumentations. En outre, la sensibilité des différents appareillages doit être prise en compte : là où le Sy-XRF offre des seuils de détection de quelques ppm, ceux du MEB-EDX se situent autour de 1000 ppm et ceux de la pXRF sont généralement de l’ordre de quelques dizaines de ppm.

Ces résultats se révèlent donc importants dans la mesure où les quantités de cuivre conservées et détectables restent malgré tout très faibles dans ces contextes de la fin du Néolithique et du début de l’âge du Bronze. L’absence seule de détection de résidus de cuivre ne permet pas en soi d’exclure un usage pour des activités métallurgiques. Ainsi, les analyses XRF n’ont permis de détecter aucun résidu métallique sur les six outils de Beg ar Loued, rendant la probabilité de leur utilisation pour le concassage de minerai faible en comparaison d’autres utilisations possibles. Leur utilisation pour la percussion bipolaire sur enclume, par ailleurs largement

représentée sur le site, reste donc une hypothèse fonctionnelle plausible, d’autant que plusieurs centaines d’outils à cupules sont par ailleurs utilisés à cette fin sur le site. Mais en l’état, elle ne peut être catégoriquement exclue non plus. Les résidus ont pu totalement disparaître du fait des conditions taphonomiques, comme supposé pour la lingotière trouvée dans le même contexte. De plus, le réemploi de macro-outils dans l’architecture et le collocation de niveaux du Néolithique final impliquent un important brassage, pouvant avoir affecté les outils analysés. Enfin, certaines roches ont pu piéger plus facilement les résidus de matières métalliques en raison de leur structure (porosité notamment).

Les résultats obtenus dans la présente étude confortent donc la nécessité de combiner une sélection rigoureuse des contextes et des séries d’outils, des analyses tracéologiques et des analyses élémentaires, pour pister l’utilisation des outils en pierre dans le cadre de la préparation des minerais métalliques et pour la transformation des matières métalliques dans les contextes de la Préhistoire récente.

OUTILS, MÉTALLURGISTES ET ÉCONOMIES À L’ÂGE DU BRONZE ANCIEN

Quelle gamme d’outils pour quelles actions ?

Les analyses tracéologiques et élémentaires réalisées sur plusieurs séries d’outils issues de différents sites de l’âge du Bronze ancien armoricain mettent en évidence

n° outil	localisation	Type	Tracéologie	pRXF - traces cuivre	Sy-XRF - traces de Cuivre	Lien avec la transformation du minéral / métal
	Bel Air (Lannion)					
1	F50 Sd 470 us 6 n°1	outil de concassage / broyage dormant	x	non	oui	oui
2	F470 sondage 474 us 3 à 50 cm	aiguiseur perforé	x	oui	oui	oui
3	F1260 sondage 455 surface	aiguiseur oblong	x	non	oui	oui
4	F186	percuteur-pilon	x	o	non	oui
5	F186 us env. 0 à 20 cm ; n°1	percuteur	x	o	non	oui
6	F186 us env. 0 à 20 cm ; n°2	« tas »	x	o	non	oui
	Kersulec (Ploneour-Lanvern)					
7	n°13 iso 35	outil de concassage / broyage	x	non	oui	oui
8	n°15 iso 35	« tas » sur hache	x	oui	oui	oui
9	n°18 iso 40	outil de concassage / broyage	x	non	oui	oui
	Beg ar Loued (Molène)					
10	n°815, st.4 base cairn I7	outil de percussion / concassage sur grès	o	o	non	non
11	n°1107 Sd II, G0-G1	outil à cupule massifs	o	o	non	non
12	n°1152 Sd II, carré G4, us2020	outil à cupule	o	o	non	non
13	n°1195 Sd I, carré 3-4	outil dormant de concassage sur meule	o	o	non	non
14	n°1196 Sd II, Q2, us 2100	percuteur sur grès	o	o	non	non
15	n°1168 Sd I, R4 us 2100	enclume pour débitage lithique?	o	o	non	non
	La Colignière (Tremuson)					
16	Tr. 4 St. 8 n°1	marteau sur galet de diorite	x	oui	oui	oui
17	Tr. 4 St. 8 n°2	marteau sur galet de grès quartzite	x	oui	oui	oui
	F221 (Plouisy)					
18	F221 surface n°1	extrémité de pilon	x	o	non	non
19	F221 surface n°3	« tas » oblong sur schiste micacé	x	o	non	non

Tabl. 4 – Analyses réalisées pour chaque outil. Tracéologie : x, réalisée ; o, non documenté ; oui, présence de résidus de cuivre ; non, absence de résidus de cuivre.

Table 4 – Type of analysis realized on each tool.

l'utilisation d'une large gamme d'outils pour le travail du métal. Si certains outils identifiés renvoient à des catégories typologiques déjà présentes au Néolithique et adaptées pour la production métallurgique (outils de concassage, perceurs, polissoirs), d'autres outils macro-lithiques préfigurent des catégories plus spécifiques (marteaux, tas) qui perdureront sur différents sites armoricains jusqu'à la fin de l'âge du Fer (Donnart *et al.*, 2012).

Ces outils partagent des caractéristiques communes de matériaux (densité, résistance à la chaleur), types de supports (galets ou supports de surface lisses) et morphologies qui contribuent à leur possible identification au sein des corpus de macro-outillage. Les caractéristiques des outils bretons renvoient directement à celles des outils de métallurgistes identifiés dans le sud-est de la péninsule Ibérique dans des contextes datés des III^e et II^e millénaires av. J.-C. (Delgado et Risch, 2008). Quartzite et micro-gabbro y sont ainsi sélectionnés préférentiellement pour servir comme marteaux d'extraction ou marteaux de façonnage dans les deux régions.

Notre analyse intégrée a permis d'identifier une large gamme d'outils employés pour la production, mais surtout la transformation des objets métalliques. Les outils ayant servi au travail du métal ne rentrent cependant pas tous directement dans la catégorie des outils dits de métallurgistes, certaines opérations intervenant en effet potentiellement lors d'opérations d'entretien des outils, et non lors des étapes de leur fabrication.

Plusieurs outils de concassage, livrant notamment des cupules de percussion, présentent des résidus de matériaux à composante cuivreuse suggérant que les minerais ont pu être réduits en fraction fine dans le cadre des premières étapes de la production métallurgique, ou que des gouttes de cuivre aient pu être récupérées par concassage des scories, bien qu'aucune n'ait été découverte sur les sites. Ces outils de concassage seraient donc intervenus lors des toutes premières étapes de la production de métal.

Des outils dormants, portant des traces multiples d'opérations de martelage et d'abrasion, ont servi pour de nombreuses opérations de mise en forme des objets métalliques. Plusieurs marteaux, de même que des tas, renvoient quant à eux au martelage des surfaces métalliques, notamment à l'amincissement et à l'étirement des feuilles de métal. Des pièces intermédiaires pouvaient être employées pour aplanir certaines surfaces métalliques par utilisation indirecte oblique en percussion posée. Ces différents outils entraient ainsi directement dans la panoplie des outils du métallurgiste, et auraient été employés pour la mise en forme par déformation plastique des outils métalliques après coulée.

La question est plus ambiguë pour les outils potentiellement impliqués à la fois dans les étapes de production et de finition des outils, et dans leur entretien régulier au cours de leur utilisation. Des polissoirs ont ainsi permis de régulariser les surfaces d'objets métalliques, tandis que les aiguisoirs ont servi à entretenir notamment des tranchants. Suivant ces observations, il n'est pas impossible qu'au moins deux qualités distinctes de roches, et donc deux types d'outils, aient été sélectionnés respectivement

pour la finition et l'entretien des outils métalliques. La régularisation des surfaces métalliques après coulée et une ou plusieurs phases de martelage a pu être réalisée à l'aide d'un abraseur en matériau plus ou moins grossier, tandis que la dernière étape de finition des tranchants des objets neufs a pu être assurée par un polissoir en matériau fin et homogène. L'entretien quotidien des objets métalliques a, quant à lui, pu être assuré par un aiguiseur dans un matériau plus ou moins grossier, conférant son caractère tranchant aux lames en particulier.

Ainsi, l'ensemble du corpus rassemblé illustre toute la panoplie des usages possibles de l'outillage en pierre dans les chaînes opératoires de production, de transformation et d'entretien des objets métalliques pour ces périodes.

Il reste pour autant délicat de relier directement ces outils, et leurs modes d'action sur la matière, à des types d'objets métalliques spécifiques. Les observations macroscopiques et les analyses tracéologiques sur les objets métalliques de ces périodes restent en effet très rares, notamment car les processus d'altération lors de leur enfouissement rendent souvent les surfaces difficilement lisibles et les observations incomplètes. Elles concernent principalement la fonction plus que la production des objets en cuivre chalcolithiques des péninsules Ibérique et Italienne (Dolfini, 2011 ; Gutiérrez Sáez et Martín Lerma, 2015). Les observations réalisées sur la production de certains de ces objets mettent tout de même en évidence le martelage partiel des lames de haches en vue de leur amincissement et éventuellement le durcissement du métal après la fonte, les traces de façonnage sur les autres types d'objets se révélant bien plus discrètes et délicates à interpréter. Ces actions affecteraient notamment la partie distale de la lame, du tranchant à la jonction avec le corps des haches, mais également en vue de la rectification de leurs flancs, et enfin l'ensemble des surfaces présentant un aspect très irrégulier à la sortie du moule. Des phases de régularisation par abrasion sont également fréquemment observées depuis le talon jusqu'à l'extrémité de différents types de lames, et se matérialisent par des groupes de fines stries denses en surface.

Étant donné la rareté des observations sur les traces de fabrication sur les outils métalliques produits ou circulant sur la façade atlantique durant le Campaniforme et l'âge du Bronze ancien, il apparaît difficile de déterminer précisément la fonction des outils en pierre pour telle ou telle étape de la mise en forme ou pour le façonnage de tel ou tel type d'objet. Il apparaît également difficile de préciser comment leur utilisation s'articulait précisément avec d'autres types d'outils en bois ou métal au sein des chaînes opératoires de production et de transformation. Des analyses structurales réalisées sur un certain nombre d'objets métalliques en cuivre et bronze du Campaniforme et de l'âge du Bronze soulignent que le martelage à chaud comme à froid était pratiqué pour aplanir différents types de lames et tranchants, modifier la morphologie des flancs des haches, ou encore replier les feuilles de cuivre pour la confection des objets de parure (Briard, 1984 ; Delgado et Risch, 2008). Cette diversité des techniques de mise en forme rappelle celle observée sur les objets

en cuivre de la péninsule Ibérique (Obon, 2020). Ces différentes observations sont pleinement compatibles avec notre analyse tracéologique des outils en pierre.

Pour quels métaux ?

Étant donné que les résidus métalliques sont généralement mal conservés sur les outils en pierre, il reste délicat d'interpréter les résultats des analyses élémentaires en terme de composition des alliages cuivreux, d'autant plus si l'on considère la conservation différentielle des éléments composant les alliages métalliques travaillés. Il est notamment connu que les résidus cuivreux sont plus susceptibles d'être affectés par des facteurs taphonomiques que d'autres composés métalliques, le cuivre pouvant se disperser dans le milieu environnant selon les conditions redox du sédiment (réaction d'oxydoréduction). Néanmoins, quelques observations ressortent des différentes analyses de résidus réalisées par XRF.

Le travail du cuivre arsénié semble le mieux représenté, que ce soit dans les outils de concassage, les outils de déformation plastique ou les outils d'aiguisage et d'entretien. À Lannion, les éléments majoritaires détectés sur un outil de concassage et broyage dormant (cuivre et arsenic), l'aiguiseur oblong (cuivre, arsenic, zinc, nickel) et l'aiguiseur perforé (cuivre et zinc) suggèrent le travail de cuivre arsénié. Les outils de concassage et de broyage n° 7 et 9 de Plonéour-Lanvern présentent quant à eux un léger enrichissement en arsenic et en zinc, ce qui là encore indiquerait le travail de cuivre arsénié. Les marteaux sur galets de quartzite et dolérite de Trémuson présentent plutôt un faible enrichissement en arsenic. Cet enrichissement s'accompagne cependant d'un apport de zinc et possiblement de plomb. La mise en évidence d'outils utilisés pour le concassage du minerai ou la récupération des gouttes de métal suggérerait la pratique d'une métallurgie primaire sur place. Il s'agirait là d'un des très rares témoins indirect d'une métallurgie locale du cuivre à l'échelle de la Péninsule armoricaine. L'ensemble des autres étapes de la production métallique, de la mise en forme à l'aiguisage, sont également représentées pour le travail du cuivre arsénié sur plusieurs des sites.

Seuls deux outils évoqueraient plutôt le travail d'objets en bronze. Il s'agit des tas de Lannion Bel-Air n° 6 et de Plonéour-Lanvern n° 8 qui portent des traces d'étain, en plus des traces de cuivre et de zinc. Ces outils apparaissent d'ailleurs durant l'âge du Bronze ancien, avant de se généraliser aux Bronze moyen et final (Boutoille, 2015 ; Hamon et Blanchet, 2015).

Le travail des objets en bronze serait ainsi principalement identifié à travers l'analyse des outils de déformation plastique. Aucun outil de préparation des minerais ou d'aiguisage n'a livré un signal compatible avec ce métal.

Outillage spécialisé *versus* artisanat spécialisé

Du fait de leur caractère innovant, les métallurgies des alliages cuivreux, arséniés puis à l'étain, ont longtemps été considérées comme le fait d'artisans nécessairement

spécialisés, aux compétences et au statut spécifiques au sein des sociétés de la fin du Néolithique et du début de l'âge du Bronze. Or l'étude des premiers indices de ces métallurgies suggère que leur pratique requerrait des compétences certes spécifiques, mais ne nécessitait que des installations et un équipement finalement sommaires, pouvant tout à fait être mis en œuvre en contexte domestique (Obon, 2020). Ainsi, c'est bien la combinaison des conditions techniques et de l'organisation économique qui permet de définir le degré de spécialisation de l'activité métallurgique, en intégrant les caractéristiques des outils de production, des espaces d'activités et des procédés de production, ainsi que le volume de production et l'accès au métal (Delgado et Risch, 2008).

Force est de constater que les outils macrolithiques employés dans la production et l'entretien d'objets en cuivre offrent des caractéristiques spécifiques. Tout d'abord, plusieurs des marteaux réalisés sur des galets voire sur d'anciens fragments de hache sont dans des matériaux de type dolérite ou micro-gabbro particulièrement résistants aux chocs, mais également à la chaleur. Certains de ces objets présentent d'ailleurs des modifications localisées de leur coloration pouvant résulter d'un contact avec une source de chaleur. Des grès plus ou moins fins sont également employés comme supports abrasifs, comme polissoirs ou aiguiseurs. Ces outils se distinguent également par certaines catégories qui ne trouvent leur utilité que dans le cadre de la métallurgie : c'est notamment le cas des marteaux, des tas, et des aiguiseurs, qui ne trouvent aucun équivalent dans d'autres chaînes opératoires de production des périodes précédentes. Les supports utilisés pour ces outils, de même que la localisation et la morphologie de leurs surfaces actives, ne laissent que peu d'ambiguïtés sur leur sphère d'utilisation. L'outil sur hache de Plonéour-Lanvern, interprété plutôt comme un tas, renvoie ainsi à la catégorie des outils à panne plane fréquemment rencontrés durant tout l'âge du Bronze de la Vendée au Calvados (Boutoille, 2015). Leur emploi vise au planage, « une opération consistant à régulariser l'épaisseur d'une tôle par le biais d'un martelage très soigneux ». Leur utilisation pour cette action bien spécifique sur le métal en fait des outils *de facto* spécialisés.

Comme nous l'avons déjà souligné, la question est plus complexe pour les outils à cupules. Ils peuvent relever d'actions de débitage bipolaire sur enclume, comme d'actions de concassage de matières végétales et animales de différentes sortes, et que l'on retrouve dans des contextes paléolithiques comme néolithiques. Plus largement, la gamme potentielle d'utilisation des percuteurs apparaît très large, et leurs caractéristiques ne les distinguent par forcément des autres types d'outils.

Reste que le nombre d'outils macrolithiques potentiellement impliqués dans la métallurgie des alliages cuivreux se révèle réduit sur chacun des sites étudiés, et que leur utilisation ne s'inscrit dans tous les cas pas dans le cadre d'une production de masse. Pour autant, les outils présentent généralement des déformations morphologiques importantes et apparaissent intensément utilisés.

Dans le cadre d'une production métallurgique réduite, ce degré d'utilisation pourrait s'expliquer par l'existence de véritables kits d'outils conservés précieusement par les métallurgistes eux-mêmes. Là encore, cela ne concernerait pas toute la gamme des outils impliqués dans la production métallurgique, mais certains outils à usage plus précis et ciblé.

L'étude des outils macrolithiques suggère donc qu'une partie au moins était un outillage spécialisé, aux caractéristiques propres et à l'utilisation circonscrite à l'une des étapes de la production. C'est en particulier le cas des outils mobilisés en fin de chaîne opératoire, qui présentent des morphologies spécifiques et adaptées, à l'instar des marteaux et des aiguisoirs. Il apparaît néanmoins difficile de préciser si l'outillage en pierre était employé pour tous les types de productions métalliques quel que soit leur fonction et statut, ou s'il était réservé à une production d'objets utilitaires domestiques, d'armes ou encore d'objets de prestige. Le contexte et le contrôle de la production restent cependant fondamentaux pour aborder la question de la spécialisation ou non de la métallurgie des alliages cuivreux (Delgado et Risch, 2008).

Quelles représentativité de la métallurgie sur les sites de l'âge du Bronze ancien ?

L'identification de différents types d'outils de métallurgistes, pour certains spécialisés, interroge sur la représentation de cette activité dans une large variété de contextes et de types d'occupations toutes datées du début de l'âge du Bronze. Elle pose également la question de la segmentation des étapes de la chaîne opératoire dans le temps et l'espace, en particulier entre les zones d'extraction, la métallurgie primaire visant à la production de métal et la métallurgie secondaire dédiées à la mise en forme voire à la finition des objets (Delgado et Risch, 2008).

Une abondante littérature souligne la rareté des indices de production des alliages cuivreux sur les sites du début de l'âge du Bronze armoricain, ce qui pourrait suggérer que ces métaux étaient produits dans d'autres régions, puis étaient importés avant éventuelle transformation sous la forme d'objets (voir par ex. Nicolas 2016). Pour autant, il semble qu'une production d'alliages cuivreux existait dans le Massif armoricain, de façon localisée et dans des quantités difficiles à estimer. L'aspect très confidentiel de ces indices d'atelier de production métallurgique pourrait être lié à l'exploitation de filons de minerais locaux voire d'étain alluvionnaire de plus ou moins bonne qualité, ou à la transformation de minerais importés sur des sites localisés sur les principales voies de circulation terrestres comme maritimes. Plusieurs travaux récents suggèrent ainsi que la réduction du minerai ne se faisait pas directement sur les sites d'extraction, et que le minerai pouvait circuler sous forme de blocs voire de poudre jusqu'aux lieux de réduction du métal (Rovira, 2001 ; Rousseau *et al.*, 2020). Les opérations de concassage de Plonéour-Lanvern s'inscriraient dans ce cadre, de

même que la production métallurgique de Beg ar Loued qui, malgré l'absence de mise en évidence d'outils de métallurgistes en pierre, est représentée par des indices variés (Gandois *et al.*, 2019a). Les outils de déformation plastique identifiés à Lannion, Plonéour-Lanvern et Trémuson auraient servi pour diverses opérations d'amincissement et d'étirement du métal. Face à la rareté d'autres indices métallurgiques sur deux de ces sites, il n'est pas possible de confirmer que ces opérations étaient réalisées systématiquement sur des objets au sortir de la coulée. Il est en effet tout à fait envisageable que le travail du métal ait été réalisé sur des objets existants et recuits, ou sur des outils en cours de recyclage et réparation. Ces différents contextes de production n'impliqueraient peut-être pas la même mise en œuvre en termes de structures de chauffe. Ceci confirmerait l'idée d'une réelle division spatiale et chronologique des étapes de production du métal d'une part, et de la mise en forme secondaire des objets métalliques d'autre part. La place des étapes de finition dans ce schéma reste discutée, puisque les indices ne permettent que difficilement de distinguer aiguisage primaire et entretien.

La question du contexte dans lequel s'inscrivent ces productions est donc posée, mais ne semble finalement pas éclairer la question du statut de ces productions. La localisation des sites sur des filons de minerais très localisés, ou sur des voies de circulation et d'échanges majeures, a certainement structuré la distribution des indices de production métallurgique. La position insulaire de Beg ar Loued au large de la pointe du Finistère est à ce titre tout à fait éclairante. La vocation centralisatrice des sites de type enceinte tout au long de l'âge du Bronze, associant habitat et productions variées, pourrait expliquer l'existence d'indices de production métallurgique ou de fabrication d'objets métalliques. C'est notamment ce qui ressort de l'analyse fonctionnelle des macro-outils de Lannion, sur le site à fossés et enclos du Bronze moyen de Plouédern et sur l'enceinte du Bronze final de Lamballe (Hamon et Blanchet, 2015). L'environnement archéologique de la fosse F8 de Trémuson et des deux petites fosses qui l'accompagnent offrent aussi des pistes de réflexion intéressantes. En effet, en l'état actuel de la recherche, il semble bien qu'elle se situe à l'écart d'autres structures domestiques du Bronze ancien. Les seuls vestiges d'habitat pour le moment reconnus sur le secteur se situent à 400 m au sud, avec une maison en amande campaniforme et les restes d'une autre construction sur tranchée de fondation possiblement du Bronze ancien (Toron *et al.*, 2018). En revanche, sur le plan funéraire les données sont plus nombreuses. Un ensemble constitué d'au moins quatre tumulus se développe juste à l'ouest du groupe de fosses. Un des monuments est daté du Bronze ancien (Blanchet, 2002). Il est à noter qu'il avait livré un lot d'outils macrolithiques dont un marteau de métallurgiste et un aiguiseur (Beuchet, 2020). L'espace funéraire semble par la suite perdurer avec, toujours sur le même secteur, les restes d'une sépulture à incinération du Bronze moyen (Blanchet, 2020) et un enclos circulaire avec incinération centrale daté du Bronze final

(Toron *et al.*, 2018). Dans ce paysage funéraire qui présente à la fois une variabilité des pratiques funéraires, de la typologie des sépultures et de la chronologie, il peut être envisagé avec toutes les réserves nécessaires que la fosse F8 ait un lien avec l'espace funéraire voisin. Certains travaux comme ceux réalisés dans la moyenne vallée du Rhône (Beeching *et al.*, 2010) sur les fosses circulaires du Néolithique et de l'âge du Bronze interrogent sur un lien fort entre structures de stockage, dépôts et sphère funéraire. Par conséquent, nous ne pouvons exclure que le monde des morts puisse parfois être lié à la sphère agricole et à certaines productions matérielles. L'idée est évidemment séduisante, mais les fosses de la Colignère ne sont bien sûr pas suffisantes pour développer plus avant ce sujet.

RÉALITÉ ET SYMBOLIQUE DE LA PRODUCTION MÉTALLURGIQUE DURANT L'ÂGE DU BRONZE ANCIEN ARMORICAIN

Dans le Massif armoricain, le macro-outillage intégré au mobilier funéraire de certaines tombes collectives campaniformes se résume à quelques brassards d'archers souvent mal contextualisés car issus de fouilles anciennes. Dans les tombes de chef du Bronze ancien, des aiguisoirs ont été déposés comme mobilier funéraire, voire possiblement dans un cadre commémoratif autour des monuments (Chatellier, 1882). Leurs caractéristiques (formes rectilignes, dimensions importantes, matériaux ciblés de type schistes ou grès) tranchent avec l'outillage plus profane issu des contextes domestiques (Chatellier, 1880 ; Nicolas, 2016). Parmi les découvertes récentes, de possibles outils de métallurgistes en contexte funéraire peuvent être cités : un outil à cupules à Châteauneuf-du-Faou (Lemée, 2019), un marteau et un aiguisoir à Trémuson La Morandais (Blanchet *et al.*, 2020) et un marteau sur tranchant de hache polie à Saint-Just (Briard *et al.*, 1995).

Hormis ces quelques exemplaires, les outils dits de métallurgistes sont donc rares dans les contextes funé-

raires du Campaniforme et du Bronze ancien armoricain. La quasi absence de « *cushion-stones* », dans les habitats comme les sépultures, est également notable et exclurait notamment le travail des métaux précieux, dans le Massif armoricain (Delgado et Risch, 2008 ; Armbruster, 2010 ; Boutoille, 2015 ; Nicolas *et al.*, 2015). La panoplie des outils de métallurgistes du Massif armoricain se révèle également plus limitée que dans d'autres régions d'une large façade Manche-Atlantique (Freudenberg, 2010 ; Drenth *et al.*, 2013).

Ceci contraste avec d'autres contextes européens où des outils de martelage et d'abrasion liés au travail du métal ont régulièrement été déposés, au point que les archéologues y ont vu des outils signifiants de l'identité des inhumés, perçus comme des artisans métallurgistes spécialisés et au statut social valorisé (Butler and van der Waals, 1966-67), ou le signe d'une position sociale assurant leur contrôle sur la production métallurgique (Turek, 2004).

Si notre étude atteste que la métallurgie des alliages cuivreux était donc bien pratiquée dans le Massif armoricain, son ampleur reste difficile à évaluer. Elle venait probablement en complémentarité d'une circulation plus large des objets métalliques qui fournissaient l'essentiel de la matière cuivreuse dans la région. Sa représentation même dans les contextes funéraires reste à mieux caractériser, pour mieux comprendre le statut des métallurgistes armoricains en regard d'autres régions de la façade Atlantique-Manche. Il n'en reste pas moins que l'identification de ces indices de production métallurgique sur les différents types de sites armoricains devrait permettre d'affiner notre compréhension de l'organisation de cette production à différentes échelles, et des dynamiques économiques comme sociales à l'œuvre au début de l'âge du Bronze.

Remerciements. Les auteurs tiennent à remercier SOLEIL pour l'accès aux installations de rayonnement synchrotron et toute l'équipe de la ligne de lumière DiffAbs pour l'aide lors des expériences. Ont été tout particulièrement appréciés l'initiative et le support de Cristian Mocuta lors des premières extractions des très grandes cartes Sy-XRF.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADAMS J., DELGADO S., DUBREUIL L., HAMON C., PLISSON H., RISCH R. (2009) – Functional analysis of macro-lithic artefacts, in F. Sternke, L. Eigeland and L. Costa (dir.), *Non-flint Raw Material Use in Prehistory Old Prejudices and New Direction*, 15th UISPP congress (Lisbon, September 2006), Oxford, Archaeopress (coll. BAR, International Series 1939), p. 43-66.
- AMBERT P., LAROCHE M., HAMON C., FIGUEROA-LARRE V., GUENDON J.-L., OBERWEILER C., REQUIRAND C., BOUQUET L. (2011) – Les outils de métallurgistes du site de La Capitelle du Broum (district minier de Cabrières-Péret, Hérault) : reconstitution d'une chaîne opératoire, in I. Sénépart, T. Perrin, E. Thirault, S. Bonnardin (dir.), *Marges, frontières et transgressions. Actualité de la recherche, Actes des 8^e Rencontres méridionales de Préhistoire récente (Marseille, 7 et 8 novembre 2008)*, Toulouse, AEP, p. 391-406.
- ARMBRUSTER B. (2010) – Lithic technology for Bronze Age metalworking, in B.V. Eriksen (dir.), *Lithic technology in metal using societies, Proceedings of a UISPP Workshop (Lisbon, September 2006)*, Højbjerg, Jutland archaeological Society, p. 9-21.
- BÁTORA J. (2002) – Contribution to the problem of "craftsmen" graves at the end of Aeneolithic and in the Early Bronze age

- in central, western and eastern Europe. *Slovenská Archeológia*, L2, p. 179-228.
- BEECHING A., BROCHIER J. L., RIMBAULT S., VITAL J. (2010) – Les sites à fosses circulaires du Néolithique et de l'âge du Bronze en moyenne vallée du Rhône : approches typologiques et fonctionnelles, implications économiques et sociales, in A. Beeching, E. Thirault et J. Vital (dir.), *Économie et société à la fin de la Préhistoire et Actualité de la recherche, Actes des VII^e Rencontres Méridionales de Préhistoire Récente, (Lyon-Bron, 2006)*, Lyon, Maison de l'Orient et de la Méditerranée (coll. DARA, 34), p. 147-169.
- BLANCHET S. (2002) – Trémuson « La Morandais », DFS de fouille préventive, Inrap Grand-Ouest, SRA Bretagne, 44 p.
- BLANCHET S. (2013) – Une longue occupation de la Protohistoire au Moyen Age, Plouédern (Finistère) : rapport final d'opération, Inrap Grand-Ouest, SRA Bretagne, 470 p.
- BLANCHET S. (2016) – Côtes-d'Armor, Lannion, Penn an Alé, occupations rurales de l'âge du Bronze et antiques : rapport de fouilles, Inrap Grand-Ouest, SRA Bretagne, 396 p.
- BLANCHET S. (2017) – Des silos de l'âge du Bronze ancien et un manoir du XV^e siècle, Trémuson, Côtes d'Armor, La Colignère, tranche 2, Rapport final d'opération de diagnostic archéologique, Inrap Grand-Ouest, SRA Bretagne, 97 p.
- BLANCHET S. (2018) – Côtes-d'Armor, Lannion, Route de Petit Camp. Un ensemble funéraire et un habitat de l'âge du Bronze : rapport de fouilles, Inrap Grand-Ouest, SRA Bretagne, 220 p.
- BLANCHET S., BRISOTTO V., MORZADEC H., NICOLAS T., WIEHOLD J. (2020) – De discrets vestiges de l'âge du Bronze in L. Beuchet, *L'occupation du plateau de Trémuson, de l'âge du Bronze au manoir de la Morandais*, Rapport final d'opération de diagnostic archéologique, Inrap Grand-Ouest, SRA Bretagne, p. 51-83.
- BEUCHET L. (2020) – L'occupation du plateau de Trémuson, de l'âge du Bronze au manoir de la Morandais, Rapport final d'opération de diagnostic archéologique, Inrap Grand-Ouest, SRA Bretagne, 286 p.
- BOUTOILLE L. (2012) – The Coppersmith and the Caster: Initial Thoughts on Irish Stone Casting Stone Mould Hoards, *Ulster Journal of Archaeology*, 71, p. 5-15.
- BOUTOILLE L. (2015) – Les techniques du dinandier de l'âge du Bronze : formes et fonctions des outils lithiques spécifiques à la déformation plastique des métaux, in S. Boulud-Gazo et T. Nicolas (dir.) *Artisanats et productions à l'âge du Bronze. Approches techniques et sociales, contextes de découvertes, Actes de la journée de la Société préhistorique française (Nantes, 8 octobre 2011)*, Dijon, Association pour la promotion des recherches sur l'âge du Bronze et Paris, Société préhistorique française (coll. Séances de la Société préhistorique française, 4), p. 83-96.
- BRIARD J. (1984) – L'âge du Bronze en France -3- Les Tumulus d'Armorique, Paris, Picard.
- BRIARD J., GAUTIER M., LEROUX G. (1995) – Les mégalithes et les tumulus de Saint-Just (Ille-et-Vilaine), Paris, Comité des travaux historiques et scientifiques, 176 p.
- BUTLER J. J., VAN DER WAALS J. D. (1966-67) – Bell Beakers and early metal-working in The Netherlands, *Palaeohistoria*, 12.
- CHATELIER P. du (1880) – Exploration du tumulus de Kerhué-Bras en Plonéour-Lanvern, *Matériaux pour l'Histoire primitive et naturelle de l'Homme*, 2, 11, p. 289-298.
- CHATELIER P. du (1882) – Exploration de quelques sépultures de l'époque du Bronze dans le nord du département du Finistère, *Bulletin de la Société d'émulation des Côtes-du-Nord*, 20, p. 1-26.
- COUSSERAN-NÉRÉ S., BOUTOILLE L., NÉRÉ E. (2020) – L'outillage lithique de l'atelier de bronzier du site du Bronze final de Montélimar la rue du Bouquet (Drôme, France) : un témoin de l'activité métallurgique ? in F. Manclossi, F. Marchand, L. Boutoille, S. Cousseran-Néré, *Stone in Metal Ages, Proceedings of the XVIII UISPP World Congress (Paris, 4-9 June 2018)*, Volume 6, Session XXXIV-6, Oxford, Archeopress.
- DELGADO-RAACK S., LULL V., MARTIN K., MICÓ R., RIHUETE HERRADA C., RISCH R. (2014) – Die Silberschmiede von Tira del Lienzo, Totana, Prov. Murcia im Kontext der El Argar Metallurgie, in H. Meller, R. Risch, E. Pernicka (dir.) *Metals of power, Early gold and silver, 6th Archaeological Conference of Central Germany (Halle, October 17-19, 2013)*, Halle, Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt, Landesmuseum für Vorgeschichte, p. 577-591.
- DELGADO-RAACK S., RISCH R. (2008) – Lithic perspectives on metallurgy: an example from Copper and Bronze Age south-east Iberia, in L. Longo, N. Skakun (dir.), *Prehistoric Technology, 40 years later: Functional Studies and the Russian Legacy, Proceedings of the International Congress, Verona 2005*, Oxford, Archeopress (coll. BAR International Series, 1783), p. 235-251.
- DOLFINI A. (2011) – The function of Chalcolithic metalwork in Italy: an assessment based on use-wear analysis, *Journal of Archaeological Science* 38, p. 1037-1049.
- DONNART K. (2019) – Le macro-outillage, in Y. Pailler, C. Nicolas (dir.), *Une maison sous les dunes : Beg ar Loued, île Molène, Finistère. Identité et adaptation des groupes humains en mer d'Iroise à la transition des III^e-II^e millénaires avant notre ère*, Leiden, Sidestone Press, p. 425-489.
- DONNART K., NAUDINOT N., LE CLÉZIO L. (2009) – Approche expérimentale du débitage bipolaire sur enclume : caractérisation des produits et analyse des outils de production, *Bulletin de la Société préhistorique française*, 106, 3, p. 517-533.
- DONNART K., HAMON C., DAIRE M.Y. (2012) – L'outillage en pierre à l'âge du Fer : exemples d'un potentiel à exploiter, in Marchand G., Querre G. (dir.), *Roches et sociétés de la préhistoire entre massifs cristallins et bassins sédimentaires : le nord-ouest de la France dans son contexte européen*, Rennes, Presses universitaires de Rennes, p. 239-252.
- DRENTH E., FREUDENBERG M., VAN OS B. (2013) – Prehistoric Stone Tools for Metal-Working from the Netherlands: an Overview, in M. Bartelheim, J. Peška, J. Turek (dir.), *From Copper to Bronze, Cultural and Social Transformations at the Turn of the 3rd/2nd Millennia B.C. in Central Europe*, Gewidmet PhDr. Václav Moucha, CSC. anlässlich seines 80. Geburtstages. Herausgegeben, Langenweissbach, Beier & Beran, p. 41-51.
- ESCATS Y. (2013) – Une vaste enceinte et deux tumulus de l'âge du Bronze, Lannion, Côtes-d'Armor, *Z.A. de Bel Air*, Rap-

- port final d'opération de diagnostic archéologique, Inrap Grand-Ouest, SRA Bretagne, 504 p.
- FITZPATRICK A. (2011) – *The Amesbury Archer and the Boscombe Bowmen: Bell Beaker burials at Boscombe Down, Amesbury, Wiltshire*, Salisbury, Wessex Archaeology (coll. Wessex Archaeological Reports, 27).
- FREUDENBERG M. (2010) – Stone Age or Bronze Age? Cushion Stones and other Stone Tools Used for Early Metalworking in Schleswig-Holstein, in B.V. Eriksen, *Lithic technology in metal using societies, Proceedings of a UISPP Workshop (Lisbon, September 2006)*, Jutland Archaeological Society, p. 23-32.
- GANDOIS H., LE CARLIER C., BOURGARIT D., COQUINOT Y. (2019a) – La métallurgie : artefacts et indices d'activité, in Y. Pailler, C. Nicolas (dir.), *Une maison sous les dunes : Beg ar Loued, île Molène, Finistère. Identité et adaptation des groupes humains en mer d'Iroise à la transition des III^e-II^e millénaires avant notre ère*, Leiden, Sidestone Press, p. 521-547.
- GANDOIS H., BURLLOT H., LE CARLIER DE VESLUD C. (2019b) – Early Bronze Age axe-ingots from Brittany: evidence for connections with south-west Ireland?, *Proceedings of the Royal Irish Academy*, vol. 119C, p. 1-36.
- GUTIÉRREZ SÁEZ C., MARTÍN LERMA I. (2015) – Traceology on Metal. Use-Wear Marks on Copper-Based Tools and Weapons, in J.M. Marreiros, J.F. Gibaja Bao, N. Ferreira Bicho (dir.), *Use-Wear and residue. Analysis in archaeology. Manuals in archaeological method, theory and technique*, Springer International Publishing, p. 171-188.
- HAMON C. (2008) – Functional analysis of stone grinding and polishing tools from the earliest Neolithic of north-western Europe, *Journal of Archaeological Science* 35, p. 1502-1520.
- HAMON C., AMBERT P., LAROCHE M., GUENDON J.L., ROVIRA S., BOUQUET L. (2009) – Les outils à cupules, marqueurs de la métallurgie du district de Cabrières-Péret (Hérault) au Chalcolithique, *Gallia Préhistoire* 51, p. 179-212.
- HAMON C., BLANCHET S. (2015) – Le macro-outillage lithique sur les sites de l'âge du Bronze armoricain: quelques hypothèses fonctionnelles pour aborder la notion d'artisanat, in S. Boulud-Gazo et T. Nicolas (dir.) *Artisanats et productions à l'âge du Bronze. Approches techniques et sociales, contextes de découvertes, Actes de la journée de la Société préhistorique française (Nantes, 8 octobre 2011)*, Dijon, Association pour la promotion des recherches sur l'âge du Bronze et Paris, Société préhistorique française (coll. Séances de la Société préhistorique française, 4), p. 63-82.
- HAMON C., REGUER S., BELLOT-GURLET L., PAILLER Y. (2020) – Tracking the first bronze metallurgists of Western Europe: combined use-wear analysis and X-ray fluorescence synchrotron spectroscopy of a stone toolkit from Ploneour-Lanvern (Brittany). *Archaeological Anthropological Science* 12, 14. doi:10.1007/s12520-019-00999-x
- HAMON G. (2009) – Modalités et finalités des dépôts céramiques au Néolithique moyen (4600-3800 av. J.-C.) entre Loire et Normandie, in S. Bonnardin, C. Hamon, M. Lauwers, B. Quilliec (dir.), *Du matériel au spirituel, réalités archéologiques et historiques des « dépôts » de la Préhistoire à nos jours, Actes des XXIX^e Rencontres Internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes (Antibes, 2007)*, Antibes, APDCA, p. 55-66.
- HAYES E., PARDOE C., FULLAGAR R. (2018) – Sandstone grinding/pounding tools: Use-trace reference libraries and Australian archaeological applications, *Journal of Archaeological Science: Reports*, 20, p. 97-114.
- HINGUANT S. (2002) – *Les occupations néolithiques, proto-historiques et médiévales de Kerléan*, Document final de synthèse de fouille archéologique, Inrap Grand-Ouest, SRA Bretagne, 60 p.
- KLASSEN L., PETREQUIN P., GRUT H. (2007) – Haches plates en cuivre dans le Jura français. Transferts à longue distance de biens socialement valorisés pendant les IV^e et III^e millénaires, *Bulletin de la Société préhistorique française*, 104, 1, p. 101-124.
- LE CARLIER DE VESLUD C., PAILLER Y., NICOLAS T. (à paraître) – Le creuset du site de Kersulec (Ploneour-Lanvern, Finistère) : la plus ancienne trace de production de bronze de Bretagne, in S. Blanchet, T. Nicolas, B. Quilliec, B. Roberts *Les sociétés du Bronze ancien atlantique du XXIV^e au XVII^e s. av. J.C., Actes du colloque de l'APRA (Rennes, 7-10 novembre 2018)*, Rennes, Presses universitaires de Rennes.
- LE CARLIER DE VESLUD C., SIPEI C., LE CARLIER DE VESLUD C. (2017) – Tin production in Brittany (France): a rich area exploited since Bronze age, in I. Montero Ruiz, A. Perea (dir.), *Archaeometallurgy in Europe IV*, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Biblioteca Praehistorica Hispana, p. 91-103.
- LEMÉE M. (2019) – *Mise en 2x2 voies de la N164, Magorven, Châteauneuf du Faou (Finistère): une nécropole de l'âge du Bronze ancien II - début du Bronze moyen, un établissement rural du Haut-Empire et des charbonnières*, Rapport final d'opération de fouille, Inrap Grand-Ouest, SRA Bretagne, p. 108-111.
- MARCIGNY C., BOURGEOIS J., TALON M. (2017) – Rythmes et contours de la géographie culturelle sur le littoral de la Manche entre le III^e et le I^{er} millénaire, in A. Lehoerff, M. Talon (dir.), *Movement, exchange and identity in Europe in the 2nd and 1st Millennia BC: beyond frontiers*, Oxford, Oxbow Books, p. 63-78.
- MENTELE S. (2013) – *Des implantations successives de l'âge du Bronze, ZAC de Kerisac, Plouisy*, Rapport final d'opération de fouille archéologique, Inrap Bretagne, SRA Bretagne.
- MILLE B., ARD V. (2011) – Les perles en cuivre de Puyraveau dans le contexte de la fin du Néolithique du Centre-Ouest, in V. Ard (dir.), *Puyraveau à Saint-Léger-de-Montbrun (Deux-Sèvres), le Dolmen II. Un monument au mobilier exceptionnel de la fin du Néolithique dans le centre-ouest de la France*, Chauvigny, Association des presses chauvinoises, p. 406-418.
- NEEDHAM S. (2009) – Encompassing the Sea: "Maritories" and Bronze Age maritime interactions, in P. Clark, *Bronze age connections: cultural contact in Prehistoric Europe*, Oxford/Oakville, Oxbow Books, p. 12-38.
- NICOLAS C. (2016) – *Flèches de pouvoir à l'aube de la métallurgie de la Bretagne au Danemark (2500-1700 av. n. è)*, vol. 1, Leiden, Sidestone Press.

- NICOLAS C., STEVENIN C., STEPHAN P. (2015) – L’artisanat à l’âge du Bronze ancien en basse Bretagne, in S. Boulud-Gazo et T. Nicolas (dir.) *Artisanats et productions à l’âge du Bronze. Approches techniques et sociales, contextes de découvertes, Actes de la journée de la Société préhistorique française (Nantes, 8 octobre 2011)*, Dijon, Association pour la promotion des recherches sur l’âge du Bronze et Paris, Société préhistorique française (coll. Séances de la Société préhistorique française, 4), p. 123-153.
- O’BRIEN W. (2015) – *Prehistoric copper mining in Europe*. Oxford, Oxford University Press.
- OBON A. Z. (2020) – Le mode de production de la première métallurgie du cuivre dans le Sud-Ouest de l’Europe, in R. Peake, S. Bauvais, C. Hamon, C. Mordant (dir.), *La spécialisation des productions et les spécialistes, Actes de la séance de la Société préhistorique française de Paris (juin 2018), Proceedings of the session n° XXXIV-2 of the XVIII^e UISPP World Congress*, Paris, Société préhistorique française (coll. Séances de la Société préhistorique française, 16), p. 41-62.
- PAILLER Y. (dir.), BRISOTTO V., COLLADO E., CONAN J., HAMON C., LE CARLIER DE VESLUD C., LE GOFF E., MORZADÉC H., NICOLAS C., NICOLAS T., ROLET J., SEIGNAC H., STEPHAN P. (2016) – *Plonéour-Lanvern (Finistère), Kersulec. Un dépôt en fosse du Néolithique moyen 2 et une occupation de l’âge du Bronze ancien*, Rapport final d’opération de fouille archéologique, Inrap Grand-Ouest, SRA Bretagne, 231 p.
- PAILLER Y., NICOLAS C. dir. (2019) – *Une maison sous les dunes : Beg ar Loued, île Molène, Finistère. Identité et adaptation des groupes humains en mer d’Iroise à la transition des III^e-II^e millénaires avant notre ère*, Leiden, Sidestone press, 734 p.
- PAILLER Y., NICOLAS C., AUDOUARD L., CONVERTINI F., DONNART K., DREANO Y., DUPONT C., HANOT P., LOURDEAU A., MARCOUX N., MOUGNE C., REGERT M., SELAMI F., STEPHAN P., TRESSET A. (2019) – Beg ar Loued, Molène Island, Finistère (France), an Early Bronze Age insular settlement. Between autarchy and openness to the outside world, in H. Meller, S. Friederich, M. Küßner, H. Stäuble und R. Risch, *Siedlungsarchäologie des Endneolithikums und der frühen Bronzezeit / Late Neolithic and Early Bronze Age settlement*, Archaeology. 11. Mitteldeutscher Archäologentag vom 18. bis 20. Oktober 2018 in Halle (Saale), Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt - Landesmuseum für Vorgeschichte, p. 949-988.
- PERNOT M. (1998) – L’organisation de l’atelier de bronzier, in Mordant C., Pernot M., Rychner V. *L’atelier du bronzier en Europe du XXe au VIIIe siècle avant notre ère*, Actes du colloque international « Bronze 96 » (Neuchâtel et Dijon 1996), Tome II. Du minerai au métal, du Métal à l’objet, Documents n°10, Paris, CTHS, p.107-116.
- ROBERTS B.W., FRIEMAN C.J. (2015) – Early metallurgy in western and northern Europe. In C. Fowler, J. Harding and D. Hoffman (eds), *The Oxford handbook of Neolithic Europe*, Oxford, Oxford University Press, 711-728.
- RODA GILBERT X., MARTÍNEZ-MORENO J., MORA R. (2012) – Pitted stones cobbles in the Mesolithic site of Font del Ros: some experimental remarks around a controversial tool type, *Journal of Archaeological Science*, 39, p. 1587-1598.
- ROUSSEAU L., GANDOIS H., FAVREL Q., CUENCA SOLANA D., DUPONT C., GARNIER N., GUERET C., LAFORGE M., POISSONNIER B., VIGNEAU T. (2020) – Cinquante ans après la découverte : état des connaissances et apport des fouilles récentes sur le site campaniforme de la République à Talmont-Saint-Hilaire (Vendée), *Bulletin de la Société préhistorique française*, 117, 1, p. 47-84.
- ROVIRA S. (2001) – Metallurgy and society in Prehistoric Spain, in B. Ottawya, E. Wager (dir.), *Metals and Society, Papers from a session held at the European association for Archaeologists, Sixth annual Meeting (Lisbon)*, Oxford, Archaeopress (coll. BAR International Series, 1061).
- TIMBERLAKE S., CRADDOCK P.T., LA NIECE S., HOOK D. (2007) – The Use of Experimental Archaeology/Archaeometallurgy for the Understanding and Reconstruction of Early Bronze Age Mining and Smelting Technologies, in *Metals and mines: studies in archaeometallurgy, Papers of the conference: “Metallurgy, a touchstone for cross-cultural interactions” (British Museum, 28-30 April 2005 in honour of Paul Craddock)*, London, Archetype Publications Ltd, p. 27-36
- TORON S., DONNART K., FAVREL Q. (2018) – Trémuson (22) « Le Coin des Petits Clos », un site du Néolithique moyen et final aux composantes continentales et atlantiques, *Internéo 12*, Actes de la journée d’information (Saint-Germain-en-Laye, 6 octobre 2018), Paris, Société préhistorique française, p. 116-126.
- TUREK J. (2004) – Craft symbolism in the Bell Beaker burial customs: Resources, production and social structure at the end of the Eneolithic period, in Besse M., Desideri J. (eds), *Graves and funerary rituals during the Late Neolithic and the Early Bronze Age in Europe (2700-2000 BC)*, Oxford, Archaeopress (BAR International Series 1284), p. 147-156.

Caroline HAMON

CNRS, UMR 8215 Trajectoires
9 rue Mahler, 75004 Paris
caroline.hamon@cnrs.fr

Solenn REGUER

Synchrotron Soleil
L'Orme des Merisiers Saint-Aubin
BP 48 91192 Gif-sur-Yvette Cedex
solenn.reguer@synchrotron-soleil.fr

Verane BRISOTTO

Inrap Grand-Ouest
37 rue du Bignon
35577 Cesson-Sévigné
verane.brisotto@inrap.fr

Cécile LE CARLIER DE VESLUD

CNRS, UMR 6566 CReAAH
Laboratoire Archéosciences
Bat. 24-25, Porte 009
Université de Rennes 1-Campus de Beaulieu
35042 Rennes Cedex
cecile.lecarlier@univ-rennes1.fr

Klet DONNART

Éveha (Études et valorisations archéologiques)
23 rue des Mxaréchaes
35132 Vezin-le-Coquet
klet.donnart@eveha.fr

Stéphane BLANCHET

INRAP Grand-Ouest et UMR CreAAH
37 rue du Bignon
35577 Cesson-Sévigné
stephane.blanchet@inrap.fr

Yvan PAILLER

Chaire ArMeRIE UBO/Inrap, UMR 6554
LETG-Brest, LTSER France
Zone Atelier Brest-Iroise
Institut Universitaire Européen de la Mer
Rue Dumont d'Urville
Technopôle Brest Iroise, 29280 Plouzané
yvan.pailler@inrap.fr

Yoann ESCATS

Inrap Grand-Ouest
37 rue du Bignon
35577 Cesson-Sévigné
yoann.escats@inrap.fr

Ludovic BELLOT-GURLET

Sorbonne Université, CNRS, MONARIS
UMR8233
4 place Jussieu
75252 Paris cedex 05
ludovic.bellet-gurlet@sorbonne-universite.fr

