



Année universitaire 2018-2019



# **CARACTERISATION TECHNO-FONCTIONNELLE ET ARCHEOMETRIQUE D'OBJETS DU BRONZE FINAL ASSIMILES A DES LINGOTS : L'EXEMPLE DE SAINT-SULPICE (LOT)**

Présenté par Gaëlle Meynieux

Sous la direction de **Pierre-Yves Milcent**, Maître de conférence

Et de **Luc Robbiola**, Ingénieur de recherche

Mémoire présenté le 03/07/2019 devant le jury du Master

Mémoire de **Master 2** mention **Histoire, Arts et Archéologie**  
Spécialité **Arts et Cultures de la Préhistoire et de la Protohistoire : Europe, Afrique**

## Remerciements

Je souhaiterais remercier tout d'abord mes directeurs Pierre-Yves Milcent et Luc Robbiola pour leur encadrement, leurs conseils avisés et le temps important qu'ils m'ont consacré.

Je remercie également Olivier Gaiffé du SRA pour son accueil dans les locaux en début d'année, Rolande Simon Millot, conservatrice au MAN, pour m'avoir aidée et permise d'accéder aux lingots du dépôt de Larnaud. Par la même occasion, je souhaite exprimer ma gratitude à Filippo M. Gambari conservateur au musée Pigorini à Rome et Mario Amore pour m'avoir donné l'opportunité d'examiner les lingots des dépôts toscans l'année passée.

J'ai une pensée également pour les personnes qui m'ont accompagnées dans le cadre du double diplôme avec l'université de Ferrare et qui ont rendu ce projet possible, notamment Federica Fontana, Annaluisa Pedrotti et Nicolas Valdeyron.

Je remercie aussi tous ceux qui de loin ou de près m'ont conseillé et m'ont fait avancer, Camille Loubatière, Marilou Nordez, Cécile Le Carlier...

Je tiens à saluer mes camarades de promotion, de Toulouse et de Ferrare, pour leur soutien, leurs conseils et leurs encouragements.

Mes dernières pensées sont pour ma famille et leur soutien indéfectible.

## **Résumé**

En archéologie, le lingot est une catégorie fonctionnelle mal définie et encore peu étudiée. Pour la période des âges des Métaux et notamment l'âge du Bronze, leur examen est un vecteur d'informations majeures, encore sous-exploité pour comprendre l'économie du métal.

Dans ce mémoire, nous développons une méthode d'étude des objets supposés lingots à partir d'un corpus issu du dépôt métallique non funéraire de Saint-Sulpice, daté du Bronze final 2 et situé dans le sud-ouest de la France. Nous avons essayé de retracer leur chaîne opératoire, de leur fabrication à leur fragmentation et mise en dépôt, par l'observation des formes et des surfaces. Nous avons également entrepris de caractériser la qualité de ce métal qui a circulé par l'étude de sa composition et de certaines de ses propriétés physiques. Les résultats mettent en évidence la diversité des compositions et des formes de notre corpus. Le métal pouvait circuler dans cette région sous la forme de lingots de cuivre ou de lingots directement alliés. Il se déclinait également en qualité, à travers la propreté des alliages. Les traces de fragmentation montrent que ces objets ont été fragmentés de façon systématique, selon des stratégies de division spécifiques.

**Mots-clés :** Bronze final, lingots, métallurgie, Saint-Sulpice, dépôt, archéométrie

## **Abstract**

In archeology ingots are a functional category that is poorly defined and not so much studied. For the metal ages and in particular the Bronze Age, their analysis is a vector of major information, still under exploited to fully comprehend the economy of metal.

In this thesis, we develop a method for studying these objects, supposedly ingots found from the non-funereal metallic hoard of Saint-Sulpice, dated from the Late Bronze Age and located in the south-west of France. We have tried to trace their "chaîne opératoire", from their manufacture to their fragmentation and depositing by the observation of shapes and surfaces. We have also undertaken the study of its composition and their physical properties to characterize the quality of this metal which has circulated. The results highlight the diversity of compositions and forms of our corpus. The metal could circulate in this region in the form of copper ingots or in the shape of alloyed ingots. It was also declined in quality, through the cleanliness of the alloys. Traces of fragmentation show that these objects have been fragmented in a systematic way and according to specific division strategies.

**Keywords :** Late Bronze Age, ingots, metallurgy, Saint-Sulpice, hoard, archeometry

## Sommaire

<b>Introduction</b> .....	3
<b>1. Etat de l'art, problématique et méthodologie</b> .....	7
<b>1.1. Les lingots de l'âge du Bronze : État des recherches en France et en Europe</b> .....	7
1.1.1. L'économie du métal .....	7
1.1.2. Etude des lingots de l'âge du Bronze en Europe : axes de recherches .....	9
1.1.3. La situation en France et les problèmes de recherches .....	9
<b>1.2. Problématique</b> .....	10
1.2.1. Définition du lingot .....	10
1.2.2. Étudier les lingots : les trouver et les identifier.....	12
<b>1.3. Méthodologie :</b> .....	13
<b>2. Étude morphologique et technologique des lingots supposés de St-Sulpice</b> .....	15
<b>2.1. Présentation générale du corpus</b> .....	15
<b>2.2. Morphologie et technologie</b> .....	15
2.2.1. Élaboration d'une typologie.....	15
2.2.2. Les lingots géométriques : .....	18
2.2.3. Les lingots-outils :.....	20
<b>2.3. Études des traces et des surfaces</b> .....	23
2.3.1. Solidification d'un lingot et traitement des surfaces : étape de fabrication .....	23
2.3.2. Les traces d'utilisation et de fragmentation : étape de post-fabrication .....	25
<b>3. Caractérisation des éléments de métallurgie : composition chimique et propriétés physiques</b> .....	31
<b>3.1. Composition chimique élémentaire</b> .....	31
3.1.1. Principes et résultats.....	31
3.1.2. Éléments de discussion .....	36
<b>3.2. Propriétés mécaniques et physiques : masse volumique et dureté</b> .....	40
3.2.1. La masse volumique des lingots .....	40
3.2.2. Dureté.....	43
<b>4. Discussion</b> .....	45
<b>4.1. La fonction de lingot ?</b> .....	45
<b>4.2. Un corpus varié aux provenances multiples ?</b> .....	46
<b>4.3. Diversité de lingots : palette de métallurgiste ?</b> .....	47
<b>4.4. Limites de l'étude et perspectives</b> .....	48
<b>Conclusion</b> .....	49
<b>Bibliographie</b> .....	50
<b>Annexes</b> .....	56

## Introduction

---

L'apparition de la métallurgie en Europe a bouleversé l'économie des sociétés agro-pastorales. Pour s'approvisionner en métal, il a fallu développer des réseaux d'échanges entre les régions d'extraction du métal et les ateliers de métallurgistes. La découverte de l'alliage cuivre-étain est une innovation qui complexifie davantage les circuits d'approvisionnement et de production dès l'âge du Bronze.

Pourtant, au cours de l'âge du Bronze européen, des objets métalliques ont été volontairement retirés de la circulation et enfouis. Ce phénomène se traduit en archéologie par la découverte de nombreux dépôts métalliques, en dehors de tout contexte funéraire ou d'habitat. Les raisons de l'enfouissement de ces richesses sont difficiles à déterminer. De nombreuses hypothèses économiques ou culturelles ont déjà été formulées par les chercheurs depuis 150 ans. Les approches sur ce sujet se sont diversifiées par des études sur leur agencement spatial et leur environnement, mais également par des examens de plus en plus approfondis des objets constituant les dépôts (Gabillot et Gomez de Soto 2004). Au cours de l'âge du Bronze et suivant l'aire géographique étudiée, la composition de ces dépôts change, se diversifie ou s'homogénéise. Les objets peuvent être entiers, cassés ou déformés. Certains dépôts sont composés d'éléments divers, de parures, d'armes, d'outils, et de lingots, tandis que d'autres contiennent les mêmes catégories d'objets.

Dans ces dépôts, en France, les lingots sont encore peu étudiés. Ils sont pourtant fréquents dans ces contextes et peuvent représenter une part majoritaire du mobilier archéologique. D'une manière générale, l'appellation « lingot » en archéologie est une interprétation fonctionnelle appliquée à un artefact. Cependant, il n'existe pas encore au sein de la communauté scientifique un réel consensus sur la définition du lingot et son application à l'archéologie (Kuijpers 2008 p.73). Par contre, en métallurgie<sup>1</sup>, un lingot est défini comme étant une masse de métal coulée dans un moule, afin de produire, dans un second temps, un ou plusieurs objets par fonderie.

À partir de cette définition, nous tirons deux constats importants. La notion de lingot est liée aux concepts de circulation et de stockage du métal puisqu'il est un intermédiaire entre les ressources et la fabrication de nouveaux objets. Elle n'est pas toujours évidente à démontrer.

La production d'un lingot est intentionnelle et réfléchie. C'est ce qui permet de différencier les lingots des déchets et ratés de fonderie ou des objets métalliques mis de côté pour être éventuellement recyclés. Le lingot est donc pensé avant d'être produit.

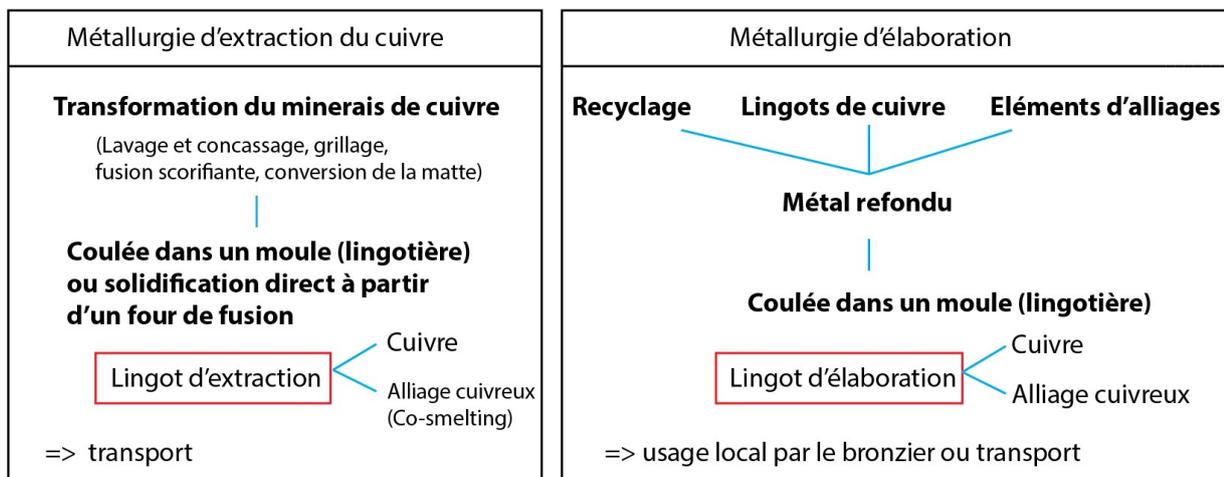
Deux familles de lingots à base cuivre sont à considérer selon le type de métallurgie à laquelle ils se rapportent (fig. 1). Dans le premier cas, la production des lingots est majoritairement

---

<sup>1</sup> *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries, 2017, commission européenne*

issue d'une métallurgie d'extraction du cuivre. Le minerai est ainsi traité pour obtenir du métal. Il se refroidit soit directement à partir de la structure de fusion, soit il est coulé dans une lingotière (moule spécifique). Dans le second cas, un lingot peut résulter d'une métallurgie dite d'élaboration et les sources du métal à l'origine de la fabrication du lingot peuvent être multiples. Elles peuvent provenir d'un mélange de lingots de cuivre issus de la métallurgie d'extraction, d'un mélange incluant des éléments d'alliages, soit sous forme de matière première ou lingots, soit éventuellement à partir d'objets recyclés.

Le lingot d'élaboration de l'âge du Bronze peut par conséquent être en alliage cuivreux, avec de l'étain et parfois du plomb ajouté. Il peut ensuite être stocké localement ou être mis en circulation.



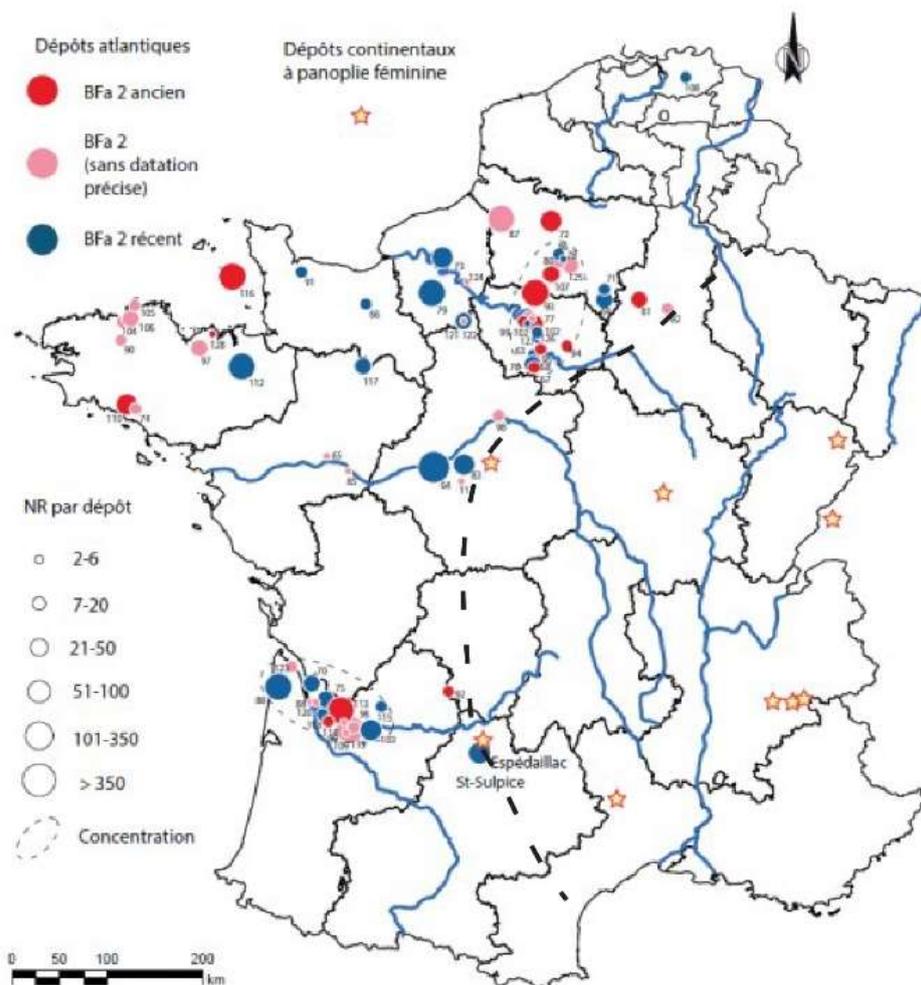
*Figure 1 Typologie de lingot selon leur chaîne opératoire*

Parmi les centaines de dépôt de l'âge du Bronze identifiés en France, un dépôt métallique non funéraire<sup>2</sup> a été mis au jour récemment à Saint Sulpice dans le Lot. Les éléments qualifiés de lingot y sont fortement majoritaires et représentent 11,5 kg sur les 13,8 kg de la masse totale du dépôt. Ce dépôt, daté entre le Bronze final 2 ancien et le Bronze final 2 récent (1050-1000 av. J-C.) fut découvert en 2013, suite à des fouilles non autorisées (Milcent, Tramon 2015). 77 objets sont connus et sont de nature très diversifiés. En plus des éléments supposés lingots, il y a des objets de parure, des armes, des outils et des restes de fonderie. Les vestiges métalliques sont majoritairement fragmentés et lacunaires.

Une première étude typo-chronologique du dépôt a montré que différentes traditions culturelles étaient représentées par des éléments de factures atlantique, ibérique, italique ou alpine (Milcent, Tramon 2015). Saint-Sulpice semble avoir été à la croisée de plusieurs courants culturels et économiques. Un second dépôt métallique découvert à seulement 12 km de distance à Espédaillac

<sup>2</sup> Par la suite, nous utiliserons le terme « dépôt » au sens de dépôt métallique non funéraire.

renforce cette idée. Bien que contemporain, la constitution de ce dernier montre une logique bien différente de celle du dépôt de Saint-Sulpice : les objets sont uniquement des éléments de parures entiers, et rattachent Espédaillac aux dépôts dits continentaux à panoplie féminine (Milcent et al. 2017 ; fig. 2). Saint-Sulpice serait donc dans une zone d'interface entre plusieurs régions culturelles, qui se traduit en particulier par des différences dans les contenu des dépôts.



*Figure 2 Répartition des dépôts atlantiques et continentaux à panoplie féminine du Bronze final 2 (Milcent, Tramon 2015, fig. 34 p.161)*

L'étude des objets interprétés comme lingot est fondamentale pour appréhender la circulation du métal au Bronze final dans le sud-ouest de la France. L'enjeu de ce mémoire est de caractériser les objets supposés lingots découverts à Saint Sulpice sous plusieurs approches.

Le premier objectif est de reconstituer leur chaîne opératoire à l'aide de critères intrinsèques de type morphologique et technologique. Nous cherchons à comprendre notamment leur mode de fabrication, les éventuelles utilisations opportunistes ou secondaires, leur fracturation et leur mise en dépôt. Le second objectif consiste à caractériser le métal de ces objets par l'investigation des propriétés physico-chimiques. C'est-à-dire examiner la composition et la qualité du métal mais aussi

les caractéristiques mécaniques et physique permettant de comprendre les possibilités d'utilisation du métal (coulée ou mise en forme).

Nous développerons d'abord l'état de l'art et les problématiques liées à l'étude des lingots base cuivre ainsi que la méthodologie que nous avons mise en place. Puis, nous nous intéresserons à l'examen morphologique et technologique des éléments considérés comme lingots du dépôt de Saint-Sulpice. Nous regarderons ensuite leurs caractéristiques physico-chimiques. Enfin, nous discuterons des résultats obtenus dans cette étude.

# 1. Etat de l'art, problématique et méthodologie

## 1.1. Les lingots de l'âge du Bronze : État des recherches en France et en Europe

### 1.1.1. L'économie du métal

Identifier et comprendre les réseaux d'échanges est un axe majeur de la recherche en archéologie. Pour la Protohistoire et notamment l'âge du Bronze, l'économie du métal occupe une place importante dans la recherche. Les nombreuses découvertes d'objets métalliques dans des dépôts et des sépultures éloignées des sources de cuivre ou d'étain prouvent l'existence d'un système d'approvisionnement efficace entre des régions métallifères et des régions qui en sont dépourvues. Des gisements exploités au cours de l'âge du Bronze sont documentés dans la péninsule Ibérique, les Alpes, les îles Britanniques et les Balkans (fig. 3). En revanche dans certaines régions comme le nord de l'Europe ou l'ouest de la France, le métal devait être importé (Radivojevic et al. 2018).

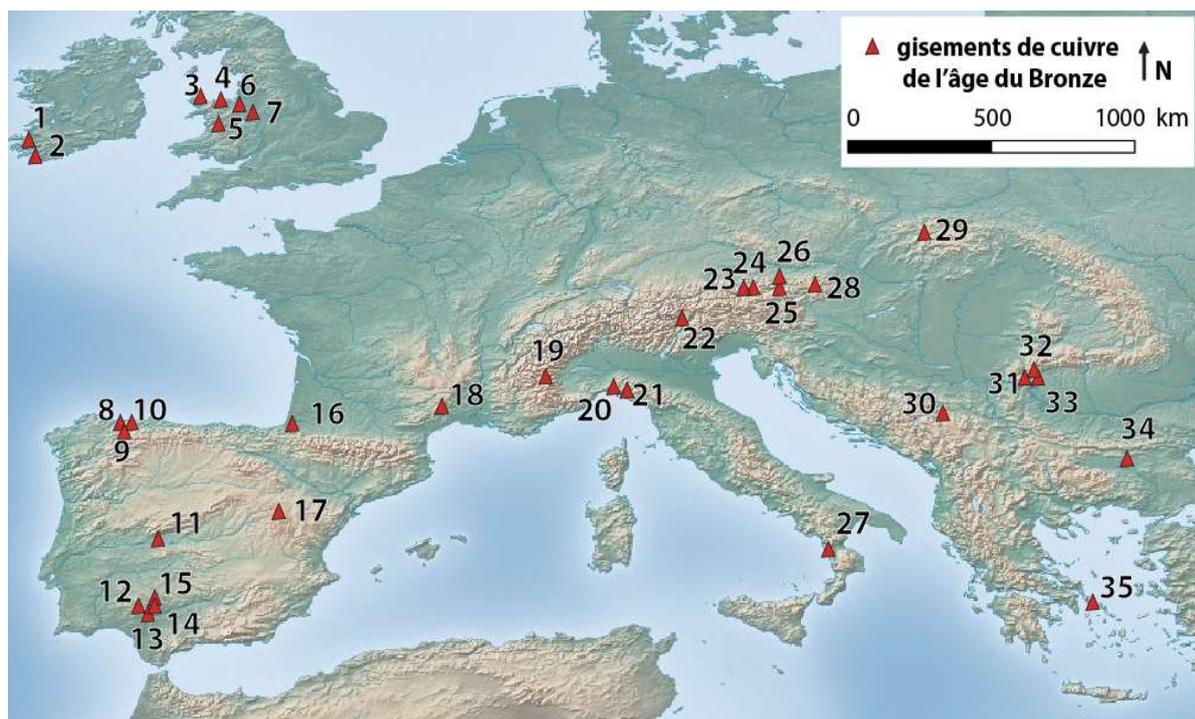


Figure 3 Carte des gisements de cuivre exploités durant le Chalcolithique et l'âge du Bronze. (D'après Radivojevic et al. 2018 p. 11 fig. 1)

1. Ross Island; 2. Mount Gabriel; 3. Parys Mountain; 4. Great Orme; 5. Cwm Ystwyth; 6. Alderley Edge; 7. Ecton; 8. El Aramo; 9. La Profunda; 10. El Milagro; 11. San Cristóbal de Logrosán; 12. Cuchillares; 13. Chinfón; 14. La Loba; 15. Berrocal; 16. Causiat; 17. Loma de la Tejeria; 18. Cabrières; 19. St. Véran; 20. Libiola; 21. Monte Loreto; 22. Trentino; 23. Schwaz-Brixlegg; 24. Glemmtal; 25. St. Veit; 26. Mitterberg-Bischofshofen; 27. Grotta della Monaca; 28. Eisenerz; 29. Špania Dolina; 30. Jarmovac; 31. Ždrelo; 32. Majdanpek; 33. Rudna Glava; 34. Aibunar; 35. Lavrion

Les archéologues se sont interrogés sur l'organisation de ces échanges, leur portée géographique, les interactions entre aires culturelles et leur contrôle à travers l'implication d'élites, de groupes sociaux. La perception que les sociétés devaient avoir du métal et en particulier du bronze, matériau assez rare qui se recycle, suppose qu'il pouvait être un moyen d'échange idéal (Pare 2000). Les chercheurs se sont demandés s'il existait des systèmes de pesée communs, permettant de faciliter les transactions entre des groupes différents. Ils se sont pour cela intéressés aux rapports de masses des dépôts et du mobilier funéraire (Pare 1999 ; Peroni 2004) et ils ont pu identifier d'éventuelles standardisations pondérales.

En parallèle, les recherches visent à retracer les circuits du métal, des sources d'approvisionnement aux zones de consommation les plus éloignées. Le développement des études de provenance a permis d'apporter des éléments de réponses sur les liens et les évolutions des sources de cuivre alimentant les réseaux de circulation. De grands programmes comme le SAM (Studien zu den Anfängen der Metallurgie) de 1954 à 1974 puis le SMAP (The Stuttgart Metal Analysis Project) ont permis de collecter des données géochimiques sur les gisements de cuivre exploités à l'âge du Bronze et sur les objets de cette époque (Krause, Pernicka 1996). À cela s'est ajoutée, à partir de 1978, la base de données OXALID (Oxford Archaeological Lead Isotope Database) éditée par Zofa Stos-Gale pour les analyses isotopiques. Les analyses de composition chimique élémentaire et isotopique des objets en cuivre ou en bronze permettent de discriminer des groupes de provenances du cuivre à partir de l'origine géologique. Les difficultés de ces approches sont nombreuses (Mille et Bourgarit 2000, Radivojevic et al. 2018). Les résultats obtenus en isotopie doivent être comparés avec les données de chaque source de cuivre probables, pour pouvoir en éliminer certaines. Cela implique qu'elles doivent être toutes référencées dans des bases de données accessibles. Cependant, celles-ci sont encore en construction (Artioli *et al.* 2014) et leur mise à jour peut impacter l'interprétation des résultats d'analyses obtenues lors d'études ultérieures.

Ces études de traçabilité du cuivre ont ainsi mis en lumière des scénarios complexes d'échanges du métal. Elles ont été conduites souvent en association avec l'étude de la composition chimique élémentaire des artefacts permettant de relier partiellement la composition du cuivre à un ou plusieurs minerais d'origine (Pernicka 1999 ; Begemann *et al.* 2001). En Scandinavie méridionale, des chercheurs proposent que le cuivre aurait été importé depuis diverses sources au cours de l'âge du Bronze, comme les Alpes, la Sardaigne, Chypre et la péninsule Ibérique (Ling *et al.* 2014). À ces modèles complexes, il faut ajouter le problème du recyclage du métal et la difficulté à l'estimer (Knapp 2000, Radivojevic *et al.* 2018).

Pour comprendre l'économie du métal à l'âge du Bronze, les archéologues ont interprété et regroupé sous le terme « lingot » des pièces de métal ayant spécifiquement vocation de faire circuler le métal.

### 1.1.2. Etude des lingots de l'âge du Bronze en Europe : axes de recherches

Les études sur les lingots ont souvent pour objectif de retracer les parcours du métal. En Italie du Nord, les lingots en forme de haches bipennes, *pani a piccone* du Bronze final, ont été au cœur d'un débat sur la provenance du cuivre : origine alpine (Borgna 1992) ou origine toscane (Bietti Sestieri 2008). Cette discussion a pu être tranchée récemment en faveur d'une provenance alpine par les analyses isotopiques du plomb (Jung *et al.* 2011). L'étude des dimensions et des masses des fragments de lingots ainsi que leur répartition en Europe a mis en évidence que plus on s'éloigne de l'arc alpin, plus la taille des fragments diminue (Teranzani 2006/2007 ; Leonardi *et al.* 2015).

Les recherches portent également sur l'évolution des formes de lingots dans l'espace et dans le temps et leur éventuelle standardisation. L'étude de certains types de lingot a permis d'élaborer des chrono-typologies comme celles des *Spangenbergbarren* et *Ösenringbarren* du Bronze ancien (Eckel 1992). En Espagne, P. Gomez Ramos (1993) a réalisé une première synthèse sur les morphologies de lingots rencontrés. En Hongrie, la diversité des lingots circulaires à section plano-convexe (*cake ingot*), l'évolution de leur taille et de leurs caractéristiques morphologiques ont pu être déterminées par A. Mozsolics (1984). Cette chrono-typologie a été affinée ensuite par Czajlik (1996) qui y ajoute des contraintes technologiques impliquant aussi la qualité du cuivre.

Ces dernières années, les chercheurs se sont penchés sur les modes de traitement des lingots et leur chaîne opératoire. Ces problématiques les ont amenés à avoir de plus en plus recours à l'observation métallographique sous microscope optique et microscope électronique à balayage (Junk *et al.* 2001). L'expérimentation se développe également. Les manières dont les lingots à section plano-convexe (*cake ingot*) pouvaient être coulés et fragmentés ont été testées (Modl 2010 ; Nessel 2014).

Un autre pôle de la recherche s'oriente vers des essais de reconstitution des processus de travail du métal par les sens pour comprendre les perceptions et les compétences des métallurgistes. Cela se traduit par exemple par des travaux de plus en plus nombreux sur la couleur du métal en fonction de sa composition et des propriétés sonores (Bourgarit 2003, Kuijpers 2017).

### 1.1.3. La situation en France et les problèmes de recherches

En France, l'étude des lingots et de leur typo-chronologie en est à ses débuts. Leur présence dans les inventaires muséaux est parfois mal documentée : il y a fréquemment des confusions entre lingots et résidus de coulée. C. Le Carlier de Veslud et ses collaboratrices ont étudié les lingots à section plano-convexe d'une partie des dépôts du Bronze final atlantique 3 (Le Carlier *et al.* 2014). Elles élaborent une typologie de ces lingots par des observations macroscopiques et une description

précise des formes, sections et surfaces. Elles les différentient des résidus de coulée produits par un surplus de métal. Ce travail a montré qu'auparavant les lingots en France n'avaient pas ou rarement fait l'objet d'examen détaillés et que tout, ou presque, reste à faire pour les autres périodes ou régions. Néanmoins, un article publié dans une revue hongroise (écrit en français) définit les principales formes de lingots rencontrés en France sur toute la période de l'âge du Bronze (Czajlik 2006). Z. Czajlik évoque également ce manque d'étude sur les lingots en France.

Si l'importance des lingots dans les dépôts en France est sous-estimée, ceci est aussi vrai pour d'autres pays comme l'Angleterre (Wang *et al.* 2018) ou l'ouest de l'Allemagne (Bachmann *et al.* 2002/2003).

Nous avons remarqué que le vocabulaire employé dans les descriptions n'est pas encore fixé et le terme de lingot n'est que très rarement défini, rendant compliquées les comparaisons à partir des seules publications. Cela engendre des confusions sur l'interprétation qui est faite du mobilier archéologique. Les photos ou dessins ne sont pas normalisés, quand ils existent. Les études archéologiques des lingots en Europe et les travaux pionniers pour la France de Z. Czajlik, C. Le Carlier et ses collaboratrices ont montré qu'il était possible d'obtenir toute une variété d'information à partir de ces objets, de la restitution des parcours du métal, aux modalités de sa circulation.

## **1.2. Problématique**

### **1.2.1. Définition du lingot**

Il est théoriquement possible que le minerai ait circulé directement. Cependant, cela suppose un volume encombrant de matière à transporter, pour n'en extraire à terme qu'une petite quantité de métal. L'usage d'une forme métallique plus aboutie est plus efficace : les lingots. Des chercheurs définissent la fonction des lingots par l'objectif d'optimiser le transport du métal primaire, de la région d'extraction à l'atelier du métallurgiste (Montero-Ruiz *et al.* 2011). Ils excluent de leur étude les formes de stockage du métal issues d'une production d'atelier, car elles n'entreraient pas, selon eux, dans une logique de circulation. Ils ne prennent donc pas en compte la possible circulation de matériaux transformés, comme le lingot d'alliage, élément pourtant fondamental en métallurgie. Il semble être implicitement considéré qu'un alliage est uniquement élaboré pour répondre à un besoin de fabrication « immédiat » par un atelier.

Notre définition du lingot est plus large et plus réaliste. Elle se fonde sur l'intentionnalité première du métallurgiste de créer un objet destiné à la refonte, indépendamment de l'origine du métal, primaire ou recyclé. Nous identifions deux catégories de lingots correspondant aux types de métallurgie dont ils sont issus : lingots d'extraction (primaire) et lingots d'élaboration (secondaire). Plusieurs lingots brut d'extraction, de même que des éléments d'alliage et du métal recyclé peuvent

entrer dans la fabrication d'un lingot d'élaboration « secondaire ». Les uns et les autres sont prévus dès leur conception comme une forme de stockage et de circulation potentielle du métal. Ils peuvent aussi répondre à un impératif technique d'élaboration d'un alliage, parfois refondu pour être homogénéisé avant d'être mis en œuvre par coulée et déformation thermo-mécanique. Il s'agirait dans ce cas d'un stockage de courte durée en lien avec l'activité de production du bronzier.

Cela pose la question de savoir si les lingots secondaires circulaient, ou si les bronziers se procuraient uniquement le cuivre et l'étain (ou minerais) séparément afin de réaliser eux même leur bronze.

Dans la littérature, il existe souvent un chevauchement entre l'idée de lingots secondaires et la notion de recyclage (Radivojevic *et al.* 2018 p. 4 ; Kuijpers 2008 p. 76). Le recyclage est un processus permettant la réutilisation du métal à partir de déchets métalliques ou d'objets finis qui ont perdu leur fonctionnalité (rebuts, chutes...). C'est une rupture fonctionnelle. En revanche, les lingots sont dès leur conception destinés à la production de futurs objets. Fondre un lingot, c'est l'utiliser. Les logiques du recyclage et du lingot sont donc différentes. Bien entendu, il est probable que les réalités du passé en matière de circuits du métal soient plus complexes que nos définitions.

Nous modélisons les principales formes sous lesquelles le cuivre et le bronze pouvaient circuler au cours de l'âge du Bronze dans le tableau 1. Les lingots primaires issus de la métallurgie d'extraction sont en principe en cuivre. Des études récentes ont montré qu'il était cependant possible d'obtenir un bronze directement par fusion de minerais de cuivre et de cassitérite (Rovira *et al.* 2009). Les lingots secondaires et les éléments de recyclage sont quant à eux majoritairement alliés.

*Tableau 1 Formes d'approvisionnement théorique du cuivre ou du bronze au cours de l'âge du Bronze*

	Minerais de cuivre	Lingots d'extraction « primaires »	Lingots d'élaboration « secondaires »	Objets à recycler
<b>Fonction de conception</b>	Matière première	Stockage (et circulation)	Stockage (et circulation)	Outils, parures, armement, déchets de coulée...
<b>Composition</b>	Gangue minérale et minéraux métalliques	Cuivre (ou exceptionnellement alliages par co-réduction)	Alliages, (Exceptionnellement cuivre)	Alliages (Exceptionnellement cuivre)
<b>Étape de fabrication et sources du métal</b>	Exploitation d'un gîte (Minéralurgie)	Métallurgie extractive : Réduction du minerai	Métallurgie d'élaboration : à partir de lingots primaires et/ou éléments d'alliage et/ou recyclage	Métallurgie d'élaboration : à partir de lingots primaires et/ou secondaires et/ou éléments d'alliage et/ou recyclage

### 1.2.2. Étudier les lingots : les trouver et les identifier

Pour étudier les lingots, les archéologues sont confrontés à deux problèmes majeurs. Le premier vient de leur finalité qui est leur future transformation en un nouvel objet. De fait, sur le plan archéologique, un lingot entièrement utilisé est un lingot qui n'existe plus. Ils peuvent donc être découverts uniquement dans trois situations : s'ils ont été égarés lors de leur transport ou oubliés au cours de leur période de stockage ou encore s'ils ont été volontairement abandonnés. Par exemple, un ensemble de lingots de cuivre et d'étain de l'âge du Bronze final a été découvert dans la mer au large des côtes de Salcombe dans le sud-ouest de l'Angleterre. Ils sont probablement issus d'une épave (Wang et al. 2018). Les lingots peuvent aussi être retrouvés lorsqu'ils ont perdu leur fonction première, le stockage du métal en vue d'une refonte. Leur présence dans des dépôts métalliques non funéraire est interprétée parfois comme résultant d'un acte d'enfouissement définitif plutôt que d'un stockage provisoire (Le Carlier *et al.* 2014 p.512). Ils seraient volontairement sortis du cycle de production (Milcent 2017).

L'identification des lingots est le second problème auquel les archéologues sont confrontés. Démontrer qu'un objet est véritablement un lingot peut être compliqué, car sa fonction de stockage du métal ne laisse pas de traces particulières. Les formes qui peuvent lui être données sont potentiellement infinies. Il existe cependant des indicateurs permettant aux chercheurs d'interpréter des objets comme d'éventuels lingots.

L'iconographie et les textes des Mycéniens représentent et mentionnent des lingots en forme de peau de bœuf, les *oxhide* (Jones 2007). Très étudiés, ils ont été découverts sur une vaste aire géographique en Europe. Ils sont facilement reconnaissables, lorsqu'ils ne sont pas trop fragmentés, et ont circulé principalement parmi les sociétés méditerranéennes au cours du second millénaire av. JC.

Une seconde façon d'identifier un lingot est de raisonner par élimination. Si sa forme et sa taille n'évoquent pas une fonction d'outils, de parure ou d'armement, alors il est possible que ce soit un lingot. La difficulté sera de ne pas le confondre avec des résidus de fonderie : « le simple fait qu'ils [objets en cuivre ou en bronze] ne ressemblent pas à des objets manufacturés suffit à les faire entrer dans la catégorie « lingot » (Le Carlier *et al.* 2014. p. 512). Les lingots à section plano-convexe et les lingots de formes irrégulières sont identifiés de cette façon. Ils sont souvent retrouvés fragmentés et l'on peut y voir des stratégies de division volontaire.

Certains lingots peuvent aussi prendre la forme d'objets utilitaires comme des haches. Ils présentent en général un aspect non fini ou peu investi, ni aucune traces d'utilisation comme outil ou d'aiguisage. Les opérations de finition comme l'ébarbage font perdre de la matière et sont donc peu recommandées pour un lingot (Renzi 2010). D'autres indices, comme des dimensions non

conventionnelles ou un tranchant non préparé permettent de comprendre qu'il s'agit plutôt de simulacres d'objet et donc d'éventuels lingots. Les exemples de cette catégorie de lingots sont courants. Nous avons déjà évoqué les lingots en forme d'outil bipenne, *pani a piccone* du Bronze final en Italie, dans les Alpes et les Balkans. Certains ne possèdent pas de trou d'emmanchement central, mais l'évoquent par une empreinte circulaire (Borgna 1992).

La loi du nombre et la calibration des masses peuvent pousser les archéologues à interpréter des objets comme lingots. Dans les dépôts du Bronze ancien en Europe centrale, les objets en cuivre de type *Spangbarren* et *Ösenringbarren* ont été découverts par milliers avec des masses standardisées (Lenerz-de Wilde 2002). Ils ont rapidement intéressé les chercheurs par leur accumulation et leurs aires de répartition précises. En revanche, leur interprétation fonctionnelle comme lingot est parfois nuancée et complexifiée par de nouveaux angles d'études qui prennent en considération les évolutions de fonction possible (objet prémonétaire, symbolique, prestige...) au sein de leur espace de circulation et de leur vie avant enfouissement (Vandkilde 2005).

Pas toujours évident à identifier et peu étudié, leur présence dans des dépôts métalliques non funéraire donne cependant l'opportunité de les examiner au sein d'ensembles clos. Dans cette étude de master 2 nous nous inscrivons dans les problématiques de recherches sur les modalités de circulation du métal en étudiant les lingots supposés d'un dépôt du sud-ouest de la France daté du Bronze final 2.

Le dépôt de Saint-Sulpice est constitué d'un mobilier métallique éclectique, tant dans les types d'objets que dans les traditions culturelles auxquelles ils semblent rattachés : atlantiques, continentales ou alpines, italiennes et ibériques. Parmi ces objets, trente sur 77 sont suspectés d'être des lingots.

### **1.3. Méthodologie :**

Le dépôt de Saint-Sulpice a été étudié sous la direction de P.Y. Milcent afin de le documenter, le contextualiser puis connaître la composition et la traçabilité chimiques des objets. Pour cela, une prospection autour du lieu de découverte ainsi que les dessins et une première étude morpho-typologique des constituants du dépôt ont abouti à un premier rapport (Milcent, Tramon 2015). Les analyses chimiques élémentaires par ACP-AES ont été réalisées par C. Le Carlier de Veslud du laboratoire de l'UMR 6566 CReAAH à Rennes et font l'objet d'un chapitre du second rapport (Milcent *et al.* 2017). À partir des prélèvements effectués, des analyses isotopiques sont en cours au Service d'Analyse des Roches et des Minéraux (SARM) du CNRS, sous la coordination de S. Baron.

Dans le cadre de ce master, l'approche méthodologique retenue permet d'investiguer les formes et les qualités du métal. La méthodologie suivie est représentée sur la figure 3. Nous avons

sélectionné les objets du dépôt assimilés à une fonction de lingots, afin de constituer un corpus de 30 éléments. Puis nous avons ajouté à l'étude les résidus de coulée et les objets soupçonnés de provenir de régions alpines ou italiques, afin de procéder à des comparaisons ponctuelles. Les éléments sélectionnés ont fait l'objet d'une convention avec le Service Régional de l'Archéologie.

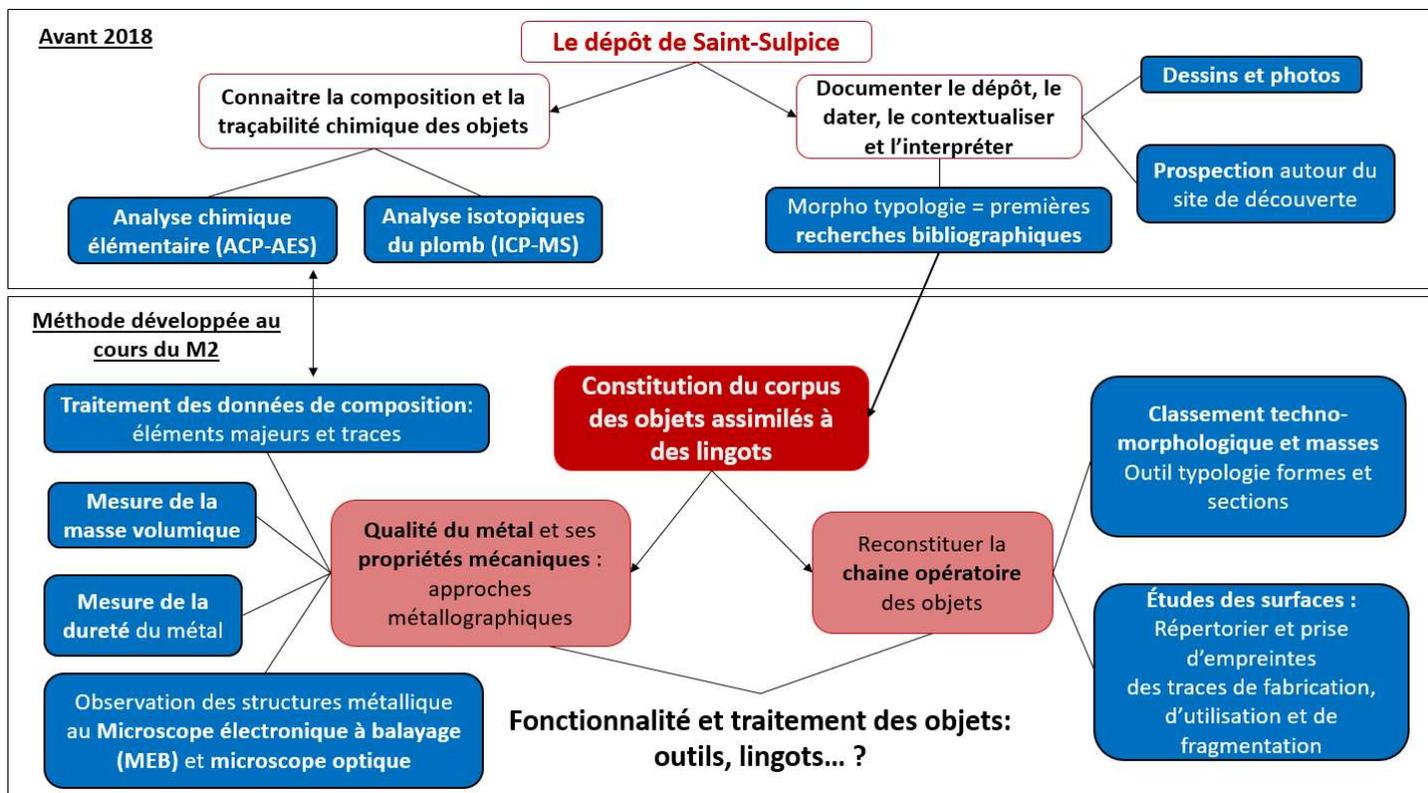


Figure 3 Schéma méthodologique

Nous avons mis au point deux axes d'étude qui correspondent à nos deux objectifs : reconstituer la chaîne opératoire puis caractériser la nature métallurgique des artefacts (composition et propriétés physiques simples). Le premier est réalisé en ayant recours à un premier classement techno-morphologique et à une étude des surfaces afin de répertorier les traces de fabrication, d'utilisation et de fragmentation. Nous avons réalisé parallèlement des planches photographiques de chaque élément du corpus (en annexe). La conception d'une base de données relationnelle nous a permis d'enregistrer toutes les informations relevées lors de cette étape d'observation. Ces premières observations ont révélé le remontage de deux fragments qui n'avait pas été vu lors de la première étude. Certains objets ont ensuite été examinés sous microscope électronique à balayage (MEB), afin d'approfondir certaines observations tracéologiques et structurelles.

Pour traiter le second axe d'étude, nous avons commencé par traiter les données des analyses chimiques élémentaires. Nous avons défini plusieurs critères et classes d'études que nous expliciterons dans la partie concernée. Nous avons ensuite mesuré la masse volumique de chaque fragment à l'aide de densitomètres. La dureté de certains objets a pu être mesurée en micro-dureté

Vickers. Sur ces objets, une observation métallographique de leur structure métallique a pu également être conduite localement permettant de confirmer la qualité des alliages et leur nature brut de fonderie.

## **2. Étude morphologique et technologique des lingots supposés de St-Sulpice**

---

### **2.1. Présentation générale du corpus**

Les objets retenus comme potentiel lingots sont au nombre de 30 fragments. Nous les avons mesurés, pesés, décrits et photographiés. Ces informations sont détaillées en annexe de ce mémoire (tableau A1 et planches).

### **2.2. Morphologie et technologie**

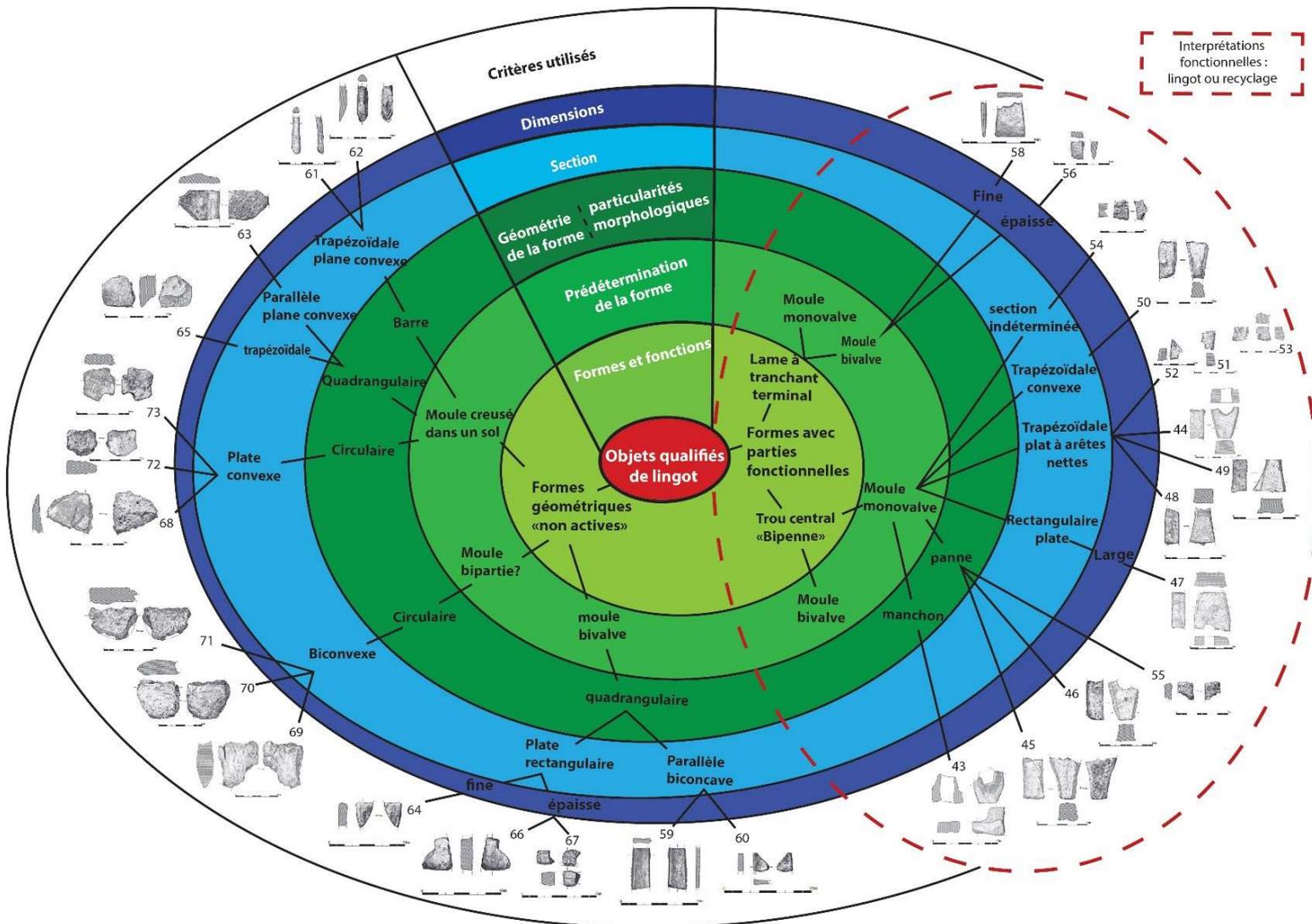
Notre objectif est de retracer la chaîne opératoire des objets interprétés comme lingots. Pour cela, nous avons d'abord cherché à comprendre leur fabrication notamment au moyen d'une typologie des formes.

#### **2.2.1. Élaboration d'une typologie**

Afin d'élaborer une typologie morphologique et technologique de notre corpus, nous avons dû sélectionner des critères pertinents permettant d'intégrer au mieux des éléments parfois très lacunaires. Dans cette première approche, nous les avons classés sans tenir compte de leur composition, cuivre ou cuivre allié. La présentation synthétique de la classification des potentiels lingots du dépôt de Saint-Sulpice est présentée à la figure 4. Les différents critères qui ont permis de sérier les 30 fragments métalliques du dépôt sont (i) leur forme et fonctionnalité potentielle, (ii) de leur conditions d'obtention en relation avec le mode de coulée, (iii) de la géométrie de la forme du fragment et des particularités éventuelles et (iv) leurs dimensions sur la base de leur section. Ces différents points sont détaillés ci-après.

En premier lieu, nous avons séparé les objets possédant une forme pouvant rappeler d'autres fonctionnalités que celle du stockage du métal. Ce critère fait sens avec les problèmes de définition et d'identification des lingots précédemment évoqués. Parmi notre corpus, la morphologie de certains éléments évoque des outils. Les formes rectangulaires ou en losange avec un œil central caractérisent des outils bipennes (fig. 4, n°43 à 55). D'autres, par un tranchant terminal, rappellent des haches simples (fig.4, n°56 et 58). Il est possible que ces objets aient été de véritables outils. Il pourrait s'agir d'éléments en cours de recyclage plutôt que de lingots ; d'autres arguments devront

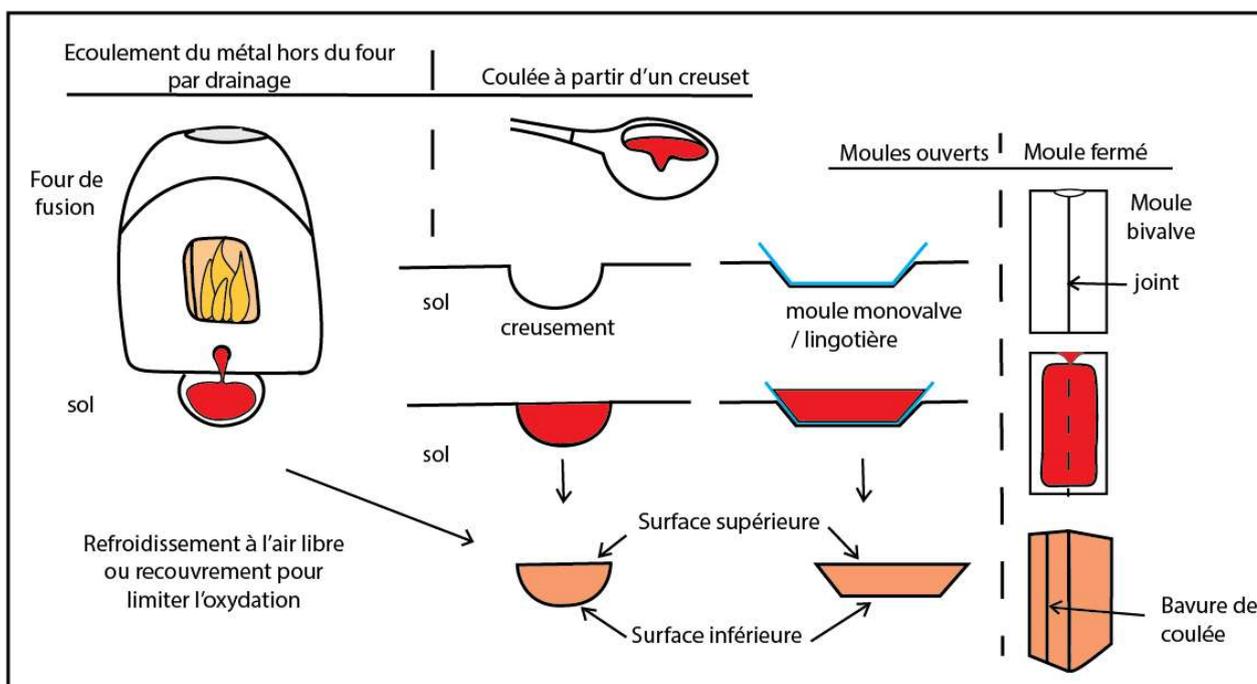
alors être pris en compte pour discuter de leur fonctionnalité première. La seconde catégorie regroupe des objets de formes simples et régulières géométriques qui ont plus de probabilités d'être réellement des lingots. Pour faciliter notre discours, nous emploierons le terme lingot pour qualifier tous les objets de notre corpus dans le sens d'objet supposé lingot.



*Figure 4 Classification des potentiels lingots du dépôt de Saint-Sulpice (Conception G. Meynieux, dessins des objets P. Billiant)*

Nous nous sommes ensuite intéressé à leur fabrication. La coulée d'un lingot peut se produire dans un moule ouvert ou dans un moule fermé (fig. 5). Les lingots issus de moules ouverts présentent une surface plane qui a donc refroidi en contact direct avec l'atmosphère. Nous nommons celle-ci surface supérieure. Le métal peut avoir été versé directement dans un creusement au sol, par coulée à partir d'un creuset ou sans intermédiaire, par écoulement hors d'une structure de fusion (Modl 2010). Le métal peut aussi se solidifier directement dans un creux au sein du four de fusion (Modl 2010). Des moules monovalves en céramique, en métal, en sable ou en pierre peuvent aussi être employés. Ils sont souvent désignés par le terme de « lingotière ». Les moules fermés permettent de

réaliser des formes plus élaborées. Ils sont généralement constitués de deux parties (bivalve) et peuvent être réutilisés selon le matériau dont ils sont constitués (Pernot 1998). Les moules à usages uniques, à partir des procédés de fonte au sable (Barbieri *et al.* 2015) ou à la cire perdue, sont théoriquement possibles. Néanmoins, ils ne présentent pas d'intérêt pratique pour un objet voué à être refondu et sont plutôt attribués à la fabrication de produits manufacturés qui requiert plus d'investissement et des formes plus complexes.



*Figure 5 Modes de coulée et principales techniques de moulage de lingots*

Dans notre corpus, nous avons pu distinguer les fragments issus de moules monovalves ou de creusement de ceux qui sont issus de moules bivalves. Pour les premiers, le critère principal est la présence d'une surface supérieure qui a refroidi à l'air libre, avec des rides ou une surface craquelée parfois dénommée « peau de crapaud » ou « peau de lait ». La coulée en moule bivalve ne possède pas ce type de surface de refroidissement, et laisse généralement des bavures à la jonction des deux parties du moule ; la section du lingot peut ainsi ne pas avoir de côté plat.

Nous pensons que trois fragments qui présentent une section légèrement biconvexe et qui n'ont donc pas de surface plane, proviendraient d'un moule fermé (fig. 5, n°69, 70 et 71). Il pourrait s'agir d'un moule en deux parties. Leur forme n'étant cependant pas aussi régulière que celle des fragments dont nous sommes sûre de leur coulés dans des moules bivalves, nous les avons classés à part.

Cette étape de notre typologie permet de trier les possibles lingots-outils et les lingots géométriques selon l'investissement et la prédétermination de leur forme, notamment à travers la préparation du moule. Une observation attentive de la rugosité des surfaces permet d'émettre des

hypothèses sur la matière du moule (Le Carlier *et al.* 2014), par exemple l'utilisation d'un moule en pierre ou en céramique donnera des objets plus lisses qu'un creusement dans un sol avec du sédiment épais.

La forme géométrique des lingots et les particularités morphologiques des possibles lingot-outils permettent de décliner des sous-groupes. Au travers des sections, nous avons observé si les faces latérales étaient parallèles ou convergentes, si les faces supérieures ou inférieures étaient planes, convexes ou concaves et si les arêtes étaient nettes, arrondies ou irrégulières. Les dimensions, notamment l'épaisseur se révèlent pertinentes également pour décliner les groupes.

Nous résumons notre morpho-typologie dans la figure 4. Elle fonctionne pour le dépôt de Saint-Sulpice et pourrait aisément être développée pour l'étude d'un corpus plus large.

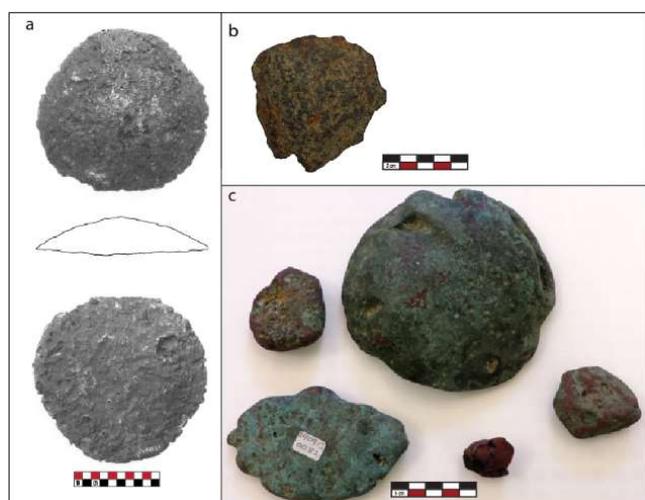
### 2.2.2. Les lingots géométriques :

La catégorie des lingots géométriques de Saint-Sulpice est composée d'une grande variabilité de forme : circulaire, quadrangulaire, oblongue. Les sections et les surfaces suggèrent également une diversité des types de moules utilisés : ouverts et fermés.

#### *Moules ouverts*

Les fragments coulés à-même un sol sont repérés par leurs bordures peu régulières et la texture granuleuse de leur face inférieure. En Europe, les plus connus sont les lingots circulaires à section plano-convexe. Dans le dépôt de Saint-Sulpice nous en dénombrons trois (Saint-Sulpice n° 68, 72, 73). Ils peuvent être fabriqués en général par coulée dans un trou creusé à même le sol ou par drainage hors du four de fusion (Modl 2010 ; fig. 5). Les surfaces inférieures en contact avec la terre ou le sable peuvent être très poreuses, car le métal réagit avec le sol, si ce dernier est encore

humide (Modl 2010 ; Le Carlier *et al.* 2014). Leurs dimensions sont variables. Les exemplaires entiers européens (fig. 6) font de quelques centimètres à plus d'une vingtaine de centimètre de diamètres. La forme et l'épaisseur peuvent être également très diverses, de la « galette » plate à la cloche.



*Figure 6 Lingots circulaires plano-convexes entiers : a. Nagyém-Gerha, Hongrie (Czajlik 1996) b. dépôt Tra Manciano e Samprugnano, Italie, c. Salcombe, Angleterre (Wang et al. 2018)*

Deux fragments de notre corpus (fig.7a) se distinguent par un angle ou des bords parallèles qui suggèrent une forme rectangulaire. Ils se différencient l'un de l'autre par leur épaisseur, leur rugosité et leur composition. Le n° 63 est un bronze en forme de plaque et ses surfaces inférieures et latérales indiquent une coulée dans un sédiment relativement fin. Il existe en Europe des lingots de forme rectangulaire comparables dans une certaine mesure à ceux de Saint-Sulpice (fig.7b) mais ils sont rares. La documentation souvent partielle des lingots en est probablement la cause. Une publication mentionne un bloc quadrangulaire en bronze du Bronze final 3 dans le dépôt de Viçosa au Portugal (Gomez Ramos 1993, p.86 fig.4), mais le dessin est trop lacunaire pour comprendre la forme de la pièce.



*Figure 7 lingots à bords sub parallèles ou possédant un angle: a. Saint-Sulpice, b. Tra Manciano e Samprugnano (Italie)*

Une dernière catégorie de formes coulées au sol est représentée par deux fragments allongés en barre (n° 61 et 62). Ce sont des lingots peu fréquents au Bronze final et au premier âge du Fer, du moins en France. Ils sont présents notamment dans les dépôts de Larnaud (Jura), de Soullans (Vendée) (Boulud *et al.* 2019) et plus tardivement dans les dépôts launaciens (Guilaine *et al.* 2017).

### *Moules fermés*

Les lingots géométriques coulés en moule fermé sont des lingots de forme quadrangulaire. Ils proviennent de moules bivalves. Les fragments n°66, 67 (fig. 4) ont des bords droits et des surfaces planes. Il peut s'agir de plaques rectangulaires, morphologiquement proche du n°63, coulées en moule ouvert. Nous nous sommes demandé si ces lingots seraient d'éventuelles ébauches en vue d'une mise en forme par martelage.

Deux autres fragments, les n°59 et 60 se distinguent par une section légèrement biconcave et peu épaisse. Ils ont des surfaces lisses et brillantes. Le n°59 présente plusieurs fissures et des craquelures, révélant la fragilité du matériau. Ils contrastent avec les autres fragments précédemment évoqués par leur épaisseur très fine (6 mm (n°59 et 60) comparé à 1,4 (n°66) et 2,4 (n°67) cm). Leur morphologie peut rappeler les haches lingots fines plus tardive d'époque phénicienne, découvertes en Espagne (Renzi 2010).

Les lingots circulaires à section biconvexe (n° 71, 70 et 69 fig.4) n'ont pas encore d'éléments de comparaison. Leur section et la symétrie des bords de leurs tranches cassées permettent d'exclure la possibilité d'un moulage dans un sol ou dans un moule monovalve. Leur surface ne montre pas de porosité, à l'exception des bords. Deux fragments cassés anciennement ont pu être remontés (fig.

8) ; ils portent de nombreuses traces, en relation avec leur fragmentation. Leur forme a notamment été aplatie par une phase de martelage, nous y reviendrons. Pour mieux comprendre leur fabrication, il faudrait procéder à une coupe métallographique afin de vérifier leurs conditions de refroidissement (milieu oxydant ou non). La présence d'oxyde de cuivre permettrait de savoir si l'objet a refroidi à l'air libre.



*Figure 8 Remontage d'un demi-lingot biconvexe à partir des fragments 69 et 70.*

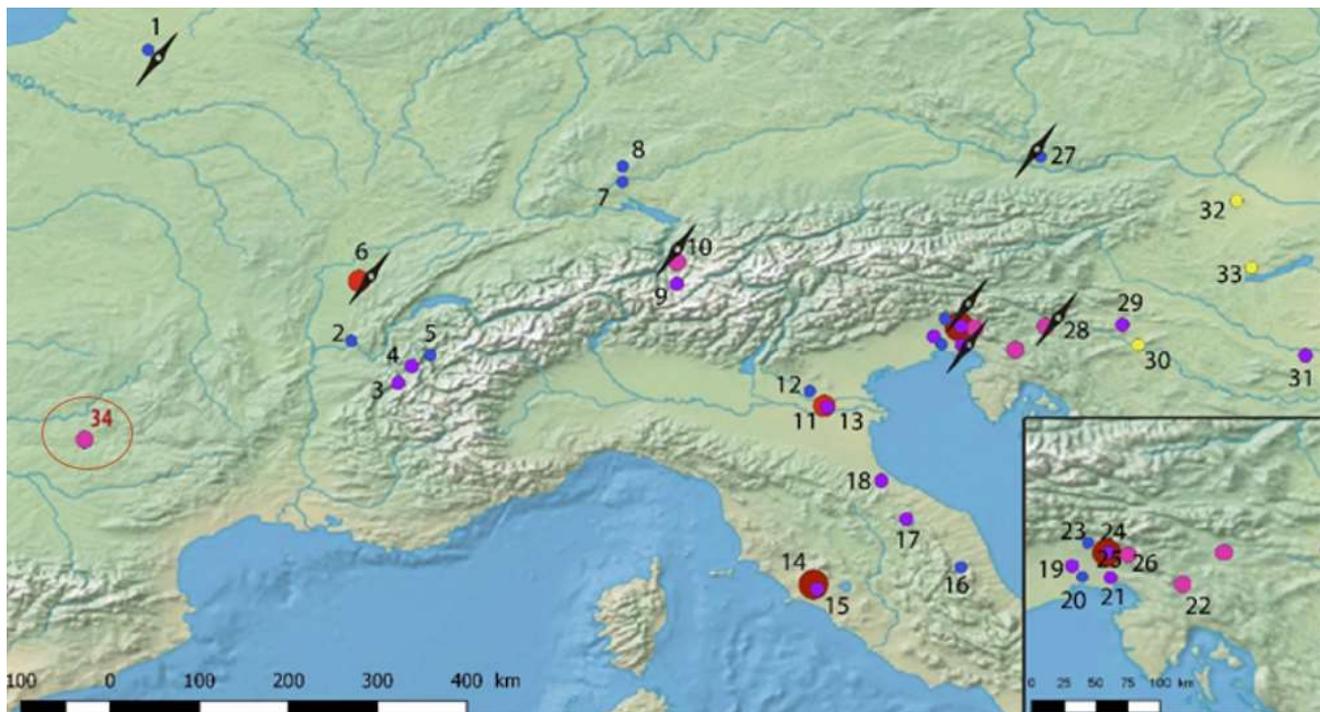
### 2.2.3. Les lingots-outils :

Deux catégories de lingots-outils sont représentées dans le dépôt de Saint-Sulpice : des haches et des bipennes.

Les fragments des objets en forme de hache se caractérisent par un tranchant terminal et une section rectangulaire mince (n°58 et 56). Les bavures de coulée indiquent qu'ils proviennent de moules bivalves. La non-préparation du tranchant et leur porosité apparente en surface les font classer parmi les lingots. Ces objets contrastent avec les véritables haches du dépôt qui présentent des marques d'utilisation et un tranchant aiguisé.

La seconde catégorie de lingots-outils est celle des bipennes. Au nombre de treize, les bipennes représentent presque la moitié du corpus. Ils sont issus de moules monovalves en pierre ou en céramique car ils présentent une surface refroidie hors du moule et une texture lisse ou légèrement rugueuse sur les faces latérales et inférieures. Ils ont des formes d'outils symétriques avec un trou correspondant à un éventuel emmanchement. Ce trou implique pour la plupart un moule avec une pièce supplémentaire pour parer aux contre-dépouilles lors du démoulage. Le trou semble être réalisé par un cylindre que l'on maintient lors de la coulée ou par un noyau (Borgna 1992, p.13).

Bien connus, les bipennes ont été découverts principalement dans l'arc alpin oriental, l'Italie septentrionale et centrale. Saint-Sulpice est le point le plus à l'ouest (fig. 9). Ils appartiennent tous au Bronze final 2 ou 3, et sont majoritairement des bronzes à l'étain (Jung *et al.* 2011).



1. Caix; 2. Lagnieu; 3. Goncelin; 4. Albertville; 5. Thénésol; 6. Larnaud; 7. Beuron (Allemagne); 8. Pfeffingen; 9. Filisur (Suisse); 10. Schiers; 11. Frattesina (Italie); 12. Montagnana; 13. Villamarzana Campagna Michela; 14. "Fra Manciano e Samprugnano"; 15. Piano di Tallone; 16. Marsia; 17. Chiuse del Frontone; 18. Poggio Berni. ; 19. Galleriano; 20. Porpetto; 21. Redipuglia; 22. Veliki Otok (Slovenie); 23. Nimis (Italie); 24. Madriolo; 25. Purgessimo; 26. Kanalski Vrh I e II (Slovenie); 27. Mahersdorf (Autriche); 28. Dragomelj (Slovénie); 29. Miljana (Croatie); 30. Ivanec Bistranski (Croatie); 31. Kapelna ; 32. Mosonszentpéter (Hongrie); 33. Uzsabánya.

#### Légende

- nombre de fragments inconnu
- 1 entier ou fragment
- entre 2 et 5 fragments
- entre 6 et 15 fragments
- entre 16 et 20 fragments
- plus de 20 fragments

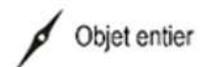


Figure 9 Le dépôt de Saint-Sulpice (n°34) parmi les principales découvertes de « lingots bipennes » ou « *pani a piccone* » documentées en Europe.

A partir du dépôt de Madriolo dans la plaine italienne du Frioul, E. Borgna a tenté d'élaborer une typologie des lingots bipennes (Borgna 1992). La fragmentation et la diversité des formes empêchent un classement par section. L'auteure utilise alors leur ressemblance avec des outils considérés comme fonctionnels tels les exemplaires découverts en Sardaigne ou à Chypre. Ces derniers ne présentent ni déformations, ni porosités. Les extrémités de ces outils ont défini les types des lingots bipennes avec celles en pointe comme une pioche (*pani a piccone*), celles planes comme un marteau (*pani a martello*) et celles à tranchant comme une hache double (*doppia ascia*). Néanmoins, les lingots bipennes sont rarement découverts complets et, dans le cas de Saint-Sulpice, seul 2 sur 13 ont une moitié entièrement conservé. En raison de l'hétérogénéité des formes et sections, il n'est pas possible de mettre en relation des extrémités isolées et des fragments centraux. Pour pouvoir cependant discuter de ces objets et les comparer, nous avons utilisé le critère de la régularité des arrêtes et des surfaces. Les bipennes de Saint-Sulpice se rapprochent par des arêtes régulières et vives de ceux qui sont issus du dépôt de Larnaud (Jura) et que nous avons pu étudier.

La plupart des bipennes issus des dépôts slovènes (Kanalski Vrh et Velitik Otok) et toscans (Piano di Tallone et Tra Manciano e Samprugnano) ont tendance à avoir des arrêtes plus irrégulières et arrondies. Le trou central peut être inexistant ou totalement de travers (fig.10).



Figure 10 Exemples de lingots bipennes (Kanalski Vrh : photo Trampuz Orel, Heath 2001, p.154, fig. 12)

Le dépôt de Saint-Sulpice livre un cas particulier, le fragment n° 43 possède un manchon autour du trou central (fig. 11). Cette caractéristique n'a pas encore été observée parmi les lingots bipennes connus à ce jour. En revanche, en Sardaigne ou à Chypre pour la période du Bronze moyen



Figure 11 Bipennes particuliers de St-Sulpice (n° 43 et 47)

et final, il n'est pas rare d'en rencontrer sur des haches considérées comme de véritables outils fonctionnels (Lo Schiavo et al. 1985, p.21, fig.8). Un autre fragment de St-Sulpice se démarque par sa morphologie. Le bipenne 47 est bien plus large que les autres et présente de nombreuses traces de martelages sur sa surface. Il est aussi l'unique bipenne du corpus à ne pas contenir d'étain.

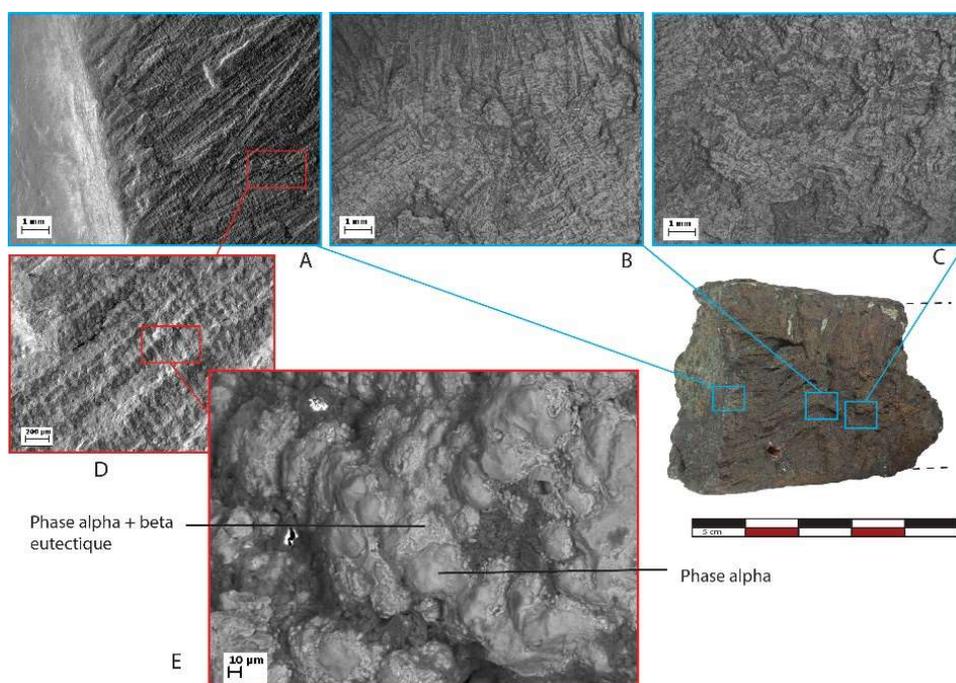
Si pour certains fragments de bipenne, leur caractère non utilisable en tant qu'outil semble probable, pour d'autres, notamment ceux de Saint-Sulpice, c'est encore à démontrer, les pannes conservées des n° 45 et 46 présentant des traces de déformation.

### 2.3. Études des traces et des surfaces

Nous avons passé en revue les différentes morphologies des fragments de notre corpus et nous les avons reliées avec les types de moules dont ils pourraient être issus. Afin de poursuivre notre travail de caractérisation de ces objets et de leur chaîne opératoire, nous avons observé plus en détails leurs surfaces à travers les structures métalliques, les traces d'utilisation et de fragmentation.

#### 2.3.1. Solidification d'un lingot et traitement des surfaces : étape de fabrication

Une fois coulé, le métal refroidi et solidifie progressivement du bord du moule vers son centre. Cette évolution de l'interphase liquide/solide métallique est appelée le front de solidification dont la vitesse de propagation (liquide-solide) dépend du gradient de température entre le bord du lingot et son centre. Dans un premier temps, des grains métalliques de petites tailles vont se former au contact de la paroi du moule. Ils constituent la « peau » du lingot. Par la suite, d'autres grains vont croître vers le centre du lingot au fur et à mesure que le liquide se solidifie, en formant des structures colonnaires ou basaltiques (fig. 12 A). Finalement au centre du moule, d'autres grains vont précipiter sans orientations cristallines particulières (croissance équiaxe - fig. 12 C). Ceci conduit à différentes structures cristallines au sein du lingot, observables sur les sections des lingots fragmentés (fig. 12 B).



*Figure 12 Exemple de structures métalliques observées sur un fragment de bipenne en bronze (n° 52), images topographiques sous microscope électronique à balayage. Images G. Meynieux et L. Robbiola*

Lorsqu'il s'agit de cuivre allié brut de coulée, les grains forment des structures arborescentes : les dendrites. Avec l'avancée du front de solidification, les dendrites se forment en

premier et sont constitués de la phase alpha<sup>3</sup> très riche en cuivre. Si la teneur en étain est supérieure à 7-8% en masse, l'espace interdendritique (intergranulaire) intègre un composé eutectoïde formé d'une phase métallique dure et cassante (phase delta) en plus de la phase alpha (fig.12 E) (Dour 2004).

La formation et le développement de ces structures sont corrélées à plusieurs paramètres. La vitesse de refroidissement, la morphologie et le type de moule ont des conséquences sur la taille des dendrites et sur la croissance des grains. Les structures dendritiques sont caractéristiques d'un alliage à l'état brut de coulée. Si un objet est recuit, les dendrites disparaissent et de nouveaux grains avec des macles thermiques ou mécaniques se forment (Scott 1991). La teneur en étain, si elle est élevée (7-8% pour les bruts de coulée ou 14-15% en masse après recuit), conduit à l'apparition d'une nouvelle phase, la phase delta Cu<sub>41</sub>Sn<sub>11</sub>.

L'observation de ces structures permet ainsi de donner trois types d'information. Elle renseigne sur l'alliage et sa composition par la reconnaissance des différentes phases de solidification et de leur proportion relative. Elle permet également d'obtenir des données sur les conditions de refroidissement du métal et la méthode de coulée appliquée, notamment à partir des morphologie et dimension des dendrites, et de déterminer par exemple si le moule était préalablement chauffé. Enfin, ces structures nous renseignent sur le traitement thermo-mécanique subi par l'objet, et donc sur une éventuelle mise en forme par martelages et recuits.

Nous avons pu observer au moyen d'une loupe binoculaire les surfaces corrodées des fragments de notre corpus. Leur altération résulte d'un processus de corrosion uniforme de type I (Robbiola 1990) et leur surface originelle a été « fossilisée ». Nous nous sommes intéressé en particulier aux bipennes qui sont des bronzes à l'étain pour savoir s'ils avaient pu être recuits, polis ou martelés. Nous avons regardé les surfaces fragmentées et les surfaces intactes. Certains fragments ont également été observés par microscopie à balayage électronique (fig. 12 et annexe B). Ces observations ne nécessitent pas de prélèvement, ni de préparation de la surface des échantillons, et sont donc non invasives.

En surface des fragments de bipennes, des structures dendritiques sont visibles (fig. 13 et 14). La corrosion participe à les révéler car les phases riches en cuivre, plus anodique, sont plus marquées par les produits de corrosion créant un effet de couleur. Par conséquent, ces éléments de bipennes sont tous brut de coulée : ils n'ont pas eu de traitement ultérieur qui aurait pu déformer les structures dendritiques.

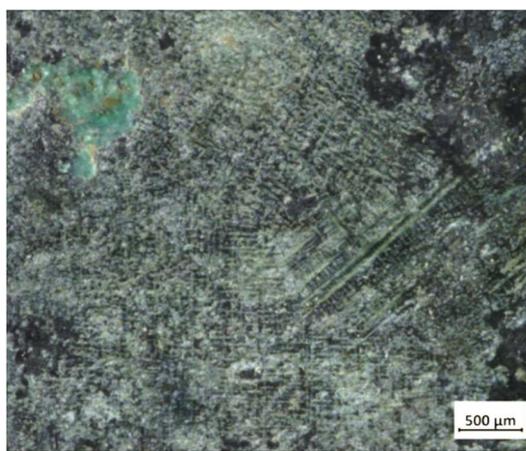
---

<sup>3</sup> Une phase cristalline est caractérisée par un domaine de composition et des propriétés physiques et chimiques uniformes (Dour 2004).

La « peau » n'est pas visible car les grains ont cru directement en dendrites. Les dendrites observées sont longues et témoignent d'un temps relativement lent de formation, impliquant des températures de moules élevées. Cela signifie que le moule devait être préchauffé à une température élevée. D'autres fragments, comme le n° 52 (fig. 12), présentent sur leur face cassée des structures colonnaires à l'échelle du centimètre, témoignant également d'un refroidissement très lent. Nous pourrions calculer ce temps de refroidissement en mesurant l'espace entre les branches secondaires des dendrites (Martorano, Capocchi 2000). Nous n'avons pas pu développer ces mesures dans le cadre de ce mémoire. C'est cependant une piste intéressante pour recueillir d'avantage d'informations et comparer les objets.



*Figure 14 Structures dendritiques du Bipenne n° 44 (grossissement x50) Images G. Meynieux.*



*Figure 13 Structures dendritiques du Bipenne n° 46 (grossissement x40). Images G. Meynieux.*

Pour les lingots coulés à l'air libre, il est à noter qu'il n'a pas été observé de traces de finition (ébarbage ou polissage). Ces objets sont des bruts de coulée n'ayant reçu aucun traitement de surface observable.

### 2.3.2. Les traces d'utilisation et de fragmentation : étape de post-fabrication

Nous avons ensuite examiné les traces post-fabrication des lingots géométriques et des lingots-outils, à savoir les marques d'éventuelles utilisations opportunistes et les traces de fragmentation.

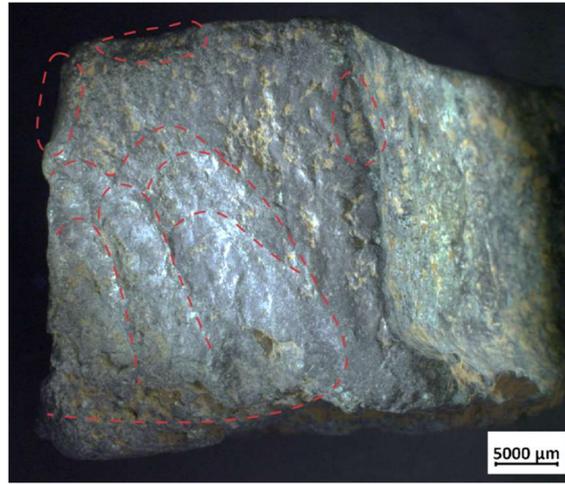
#### *Traces d'utilisation des bipennes*

Sur deux fragments de bipennes possédant encore une extrémité (n°45 et 46, fig.15-16), des déformations ont été observées. Ils ont donc été utilisés à un moment donné. Sur les arêtes des deux panes, plusieurs encoches sont visibles. Elles résultent à notre avis de quelques coups violents qui

ne répondent pas d'une logique d'usage durable d'un outil. Le surplus de métal qui a dépassé du moule lors de la coulée du n° 44 n'a pas été rectifié. Cette caractéristique a peut-être intéressé et l'on s'en est servi à plusieurs reprises avec une orientation préférentielle. L'angle en bas à gauche sur la figure 16 est déformé, mais pas suffisamment pour que les structures dendritiques aient totalement disparu.



*Figure 16 Encoches, bipenne n° 45*



*Figure 15 Déformations et encoches, bipenne n° 46*

Il a déjà été relevé que d'autres fragments de bipenne et notamment ceux avec panne révèlent des traces d'utilisation, comme à Redipuglia en Frioul (Borgna 1992, p.29). Elles se trouvent également uniquement sur une partie de la superficie de la panne. Les chercheurs ont rapidement conclu qu'il s'agissait d'utilisations opportunistes, et que ces objets pouvaient éventuellement participer à des activités métallurgistes comme outil, en plus de leur fonction de stockage (Borgna 1992). Cependant, nous n'avons pas de connaissance précise de cette étude tracéologique et technologique. Aucune documentation photographique des surfaces des extrémités n'a été présentée. Cependant à titre de comparaison, nous avons pu examiner au Musée des Antiquités nationales (MAN) les bipennes du dépôt de Larnaud (Jura). Ce dépôt comporte une vingtaine de fragments de bipenne dont 10 d'entre ont une extrémité conservée et un bipenne entier en forme de marteau. Nous n'avons relevé aucune trace d'utilisation, ce qui corrobore ici l'hypothèse d'une utilisation très occasionnelle des bipennes comme outils. L'absence de finition et souvent le manque de soin dans la coulée indiquent plutôt un aspect premier non utilitaire de ces bipennes. Les nombreux exemplaires privés de trous centraux, en Slovénie (Terzan 1996) et en Italie (Borgna 1992, Peroni 1961), possèdent à la place une empreinte circulaire. La forme de l'outil semble importante pour matérialiser la circulation du métal.



*Figure 17 Déformation de surface sur la face A du Bipenne n° 47 (grossissement x3,5)*

Le bipenne n° 47 déjà mentionné pour sa morphologie unique, d'une largeur deux fois plus grande que la plupart des bipennes, se distingue également par les nombreuses traces de déformations en surfaces supérieure et inférieure (fig. 17). Ces faces sont recouvertes d'impacts ovales d'un centimètre de large sur deux. Nous ne pensons pas que ces traces soient en lien avec la fracturation du bipenne car elles sont nombreuses et réparties sur l'intégralité des surfaces inférieure et supérieure, contrairement aux autres bipennes. Ces traces sont probablement liées à une autre utilisation. Le bipenne n° 47 aurait peut-être pu

servir de tas ou d'enclume.

### *Traces de fragmentation*

L'action de fracturer des objets ensuite placés dans des dépôts est parfois mise en relation avec une volonté de les défonctionnaliser. Dans le cas de lingots, cela n'affecte pas leur fonctionnalité, mais, au contraire, la sert en créant des portions. Cette fragmentation des lingots géométriques et des lingots outils ne peut être que volontaire. Les traces d'impact sont nombreuses et couvrent parfois toute la surface des objets. Nous avons cherché à comprendre par quels procédés ces objets ont pu être fracturés, ainsi que leur précision, pour obtenir d'éventuels fragments calibrés.

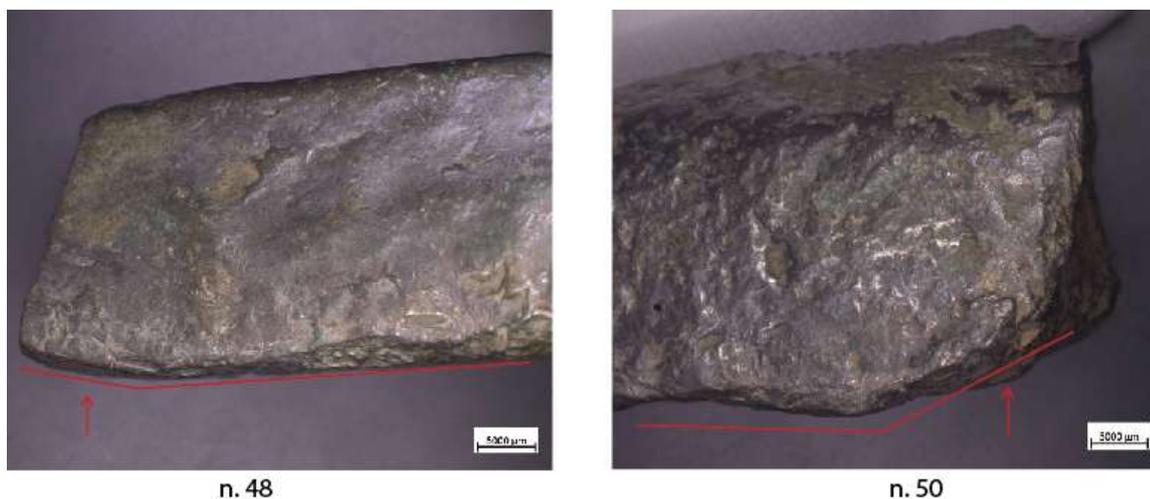
Une majeure partie des lingots en cuivre sont relativement épais (de l'ordre de plusieurs cm). Cependant pour des dimensions équivalentes, la difficulté de fracturer du bronze et du cuivre n'est pas la même. Lorsqu'un objet en bronze est chauffé suffisamment fort, entre 250 °C et 600 °C (Modl 2010), il peut devenir très fragile du fait de la formation d'une phase cristalline fragile et martensitique (la phase bêta). La fragilité des bronzes augmente en fonction de leur teneur en étain. Leur fragmentation semble donc ne pas poser trop de difficultés (Modl 2010). Le cuivre, au contraire, reste ductile et nécessite une action mécanique plus compliquée pour être cassé (Modl 2010).

### **Les bronzes**

Les objets en bronze de notre corpus sont majoritaires. Nous avons en particulier étudié les bipennes et leur profil de rupture. Les lignes de ruptures sont nettes et les surfaces fragmentées indiquent des cassures fragiles, c'est-à-dire des ruptures nettes, sans déformation plastique. Une partie des bipennes ont leur volume légèrement enfoncé, comme si un coup important sur un support avait pu être donné (fig. 18). Les traces de déformation sur la face opposée indiquent un martelage

dans le sens opposé. Pour pouvoir réaliser cette opération de fracturation à chaud, une pince mobile ou fixe (étau) devait sans doute être utilisée pour maintenir les objets.

Les bipennes sont cassés le plus souvent au niveau du trou central, solution mécanique qui semble la plus simple, car c'est l'endroit le moins épais. Nous remarquons par ailleurs que la fragmentation au niveau des extrémités des bipennes est un caractère également assez fréquent.



*Figure 18 Déformation volumique des bipennes n° 48 et 50. Photo G. Meynieux.*

## Les cuivres

À l'opposé des bronzes, le cuivre non allié nécessite de procéder différemment en raison de son caractère très ductile. Les fragments de lingot en cuivre de Saint-Sulpice sont géométriques de forme : soit circulaire (n°68, 69, 70, 71, 72 et 73), soit carré (n°65) ou de forme bipenne (n°47), mais avec une section très large.

Les fragments n°69 et 70 de forme circulaire remontent et constituent un demi-lingot. Ils permettent d'avoir une bonne caractérisation des marques laissées lors de leur fracturation et de leur succession. Des traces d'incisions (entailles) très fines, de 4 à 7 mm, montrent une étape de prédécoupe (fig. 19.a et 19.c.). Ces incisions peuvent être très profondes (5 mm) en comparaison de leur largeur (<1mm). Elles ont dû être réalisées à l'aide d'un outil très fin, peut-être un ciseau, dans le but de marquer la découpe, mais aussi de découper la « peau » de surface compacte et d'amorcer la rupture. L'autre demi-lingot, non présent à Saint-Sulpice, a probablement été fragmentée de cette façon comme le montre les entailles sur le bord des fragments restants (fig. 19, face A et C). Ces incisions prennent l'aspect de lignes parallèles tracées lorsque le lingot a été chauffé afin que la lame pénètre plus facilement. Ce dernier a ensuite été martelé sur sa surface (fig. 19.b), et en particulier le long des bords (fig. 19, lignes vertes). Ce martelage a aplani le lingot et a effacé, déformé une partie des tracés précédents. Les morceaux périphériques manquants ont dû être cassés à ce moment.

Les tranches cassées présentent des structures colonnaires indiquant que le cuivre a recristallisé (cf. photo en annexe n°69 face F ou n°70 faces E et D), les opérations de fragmentation se sont donc déroulées lorsque le cuivre était chauffé. Nous avons aperçu d'autres marques (fig. 19 lignes bleues, fig.19.c). Elles sont moins fines que les précédentes avec un profil en V de 4mm de large en moyenne. Elles se superposent aux marques fines (lignes rouges). Il pourrait s'agir de marques réalisées avant la rupture par un autre outil, hache ou herminette par exemple. Leur nombre (plus d'une vingtaine) nous laisse imaginer qu'elles pourraient également correspondre à des marques laissées par l'arête d'un support, tas ou enclume, au moment où le lingot est martelé pour être portionné. Cette étape de martelage complexifie la lecture des marques évoquées précédemment puisqu'elle les a déformées (fig.19.b). Lorsque les deux quarts du lingot sont réunis, il manque à leur jonction une portion, dont le négatif est en forme de barrette de 4,2 par 0,8 sur 1 cm (fig. 19, rectangle jaune). Il y a donc eu un prélèvement d'un peu de matière à la suite de cette opération. Les deux quarts ont, à 20g près, la même masse (cf. tableau (masse) Annexe A1). La technique de fracturation observée permettait donc de casser un lingot de cuivre en des endroits précis impliquant un marquage fin et linéaire au préalable. Ces traces pourraient être mieux perçues et comprises au moyen de relevés en relief, par exemple à l'aide de la photogrammétrie.

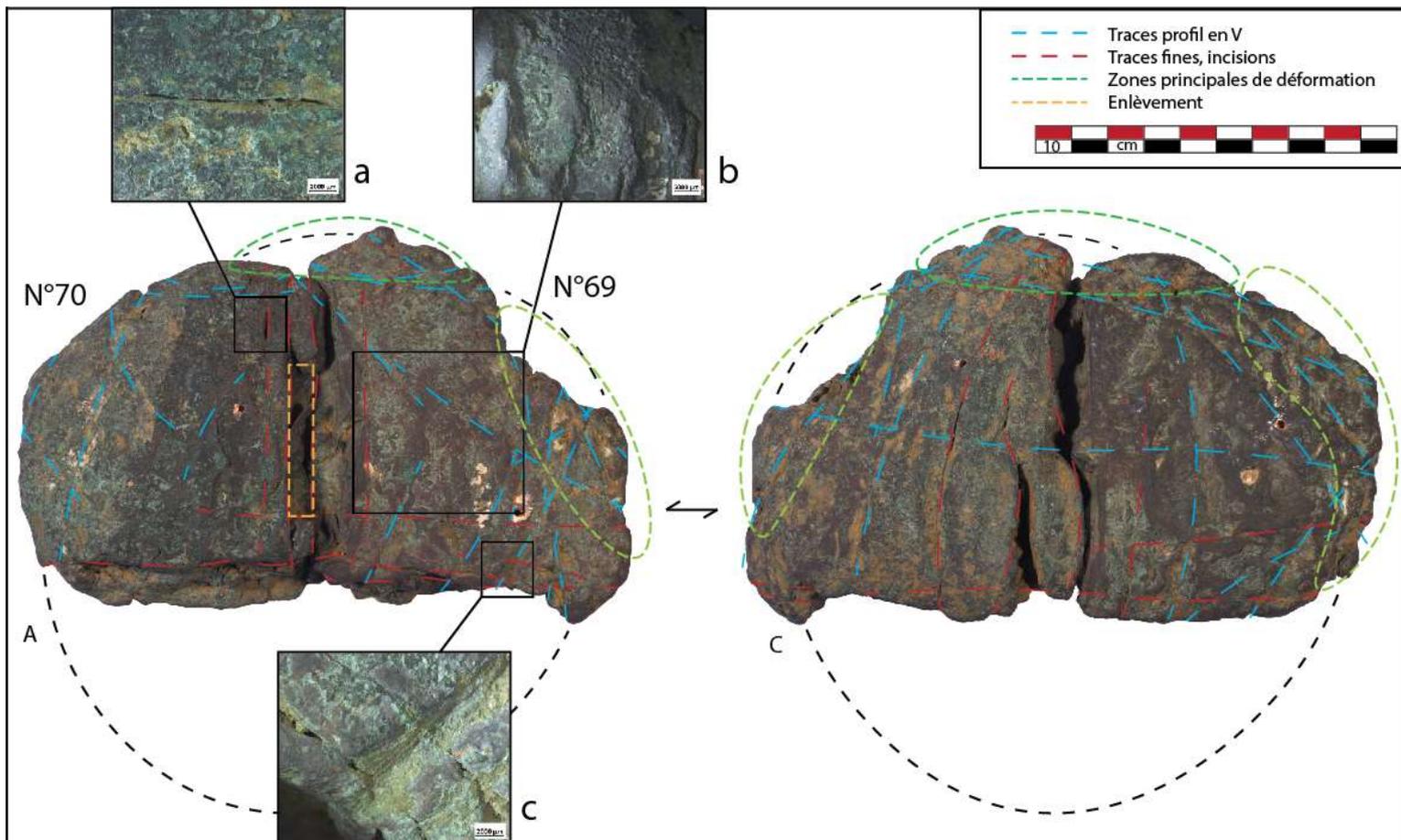
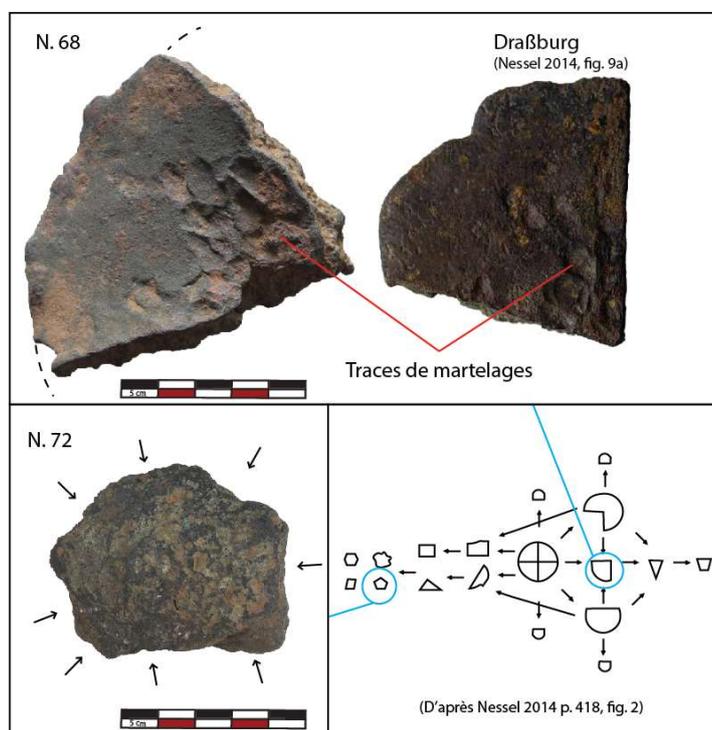


Figure 19 Traces de fragmentation du demi-lingot biconvexe à partir des fragments 69 et 70 (faces A et C)

D. Modl (2010) a expérimenté la coulée d'un lingot plano-convexe qu'il a ensuite fragmenté à partir d'encoches pour amorcer la rupture. Les fragments présentent les mêmes caractéristiques techniques que les biconvexes de Saint-Sulpice. Les entailles de prédécoupe réalisées sont en revanche plus larges, car cette étape a été réalisée avec une herminette à chaud. Il met en évidence qu'il est très compliqué de fragmenter un lingot plano-convexe à froid, sauf s'ils ont une épaisseur très fine. De son côté, B. Nessel (2014) a recensé les géométries des fragments issus de divisions de lingots dans les dépôts d'Europe centrale, avec et sans traces de découpe visibles (fig.20). Elle montre également qu'il existe différentes techniques de partition de ces lingots, en fonction notamment de la précision de la masse de métal à récupérer, deux d'entre elles semblent représentées dans notre corpus (fig.20 lignes bleues).



*Figure 20 Schéma de partition et comparaison avec des morceaux de lingots plano-convexes de Saint-Sulpice*

Pour Saint-Sulpice, nous observons des partitions en demi puis en quart de lingot avec les biconvexes. Le n° 68 représente aussi un quart de lingot plano-convexe (fig.20). Il présente des traces de martelage en son centre qui ont déformé sa section.

Le n°72 témoigne d'une autre stratégie de débitage (fig.20) : des morceaux de cuivre ont été prélevés en périphérie. Il semble que l'objectif de ce mode de fragmentation soit de récupérer de petites quantités de cuivre, sans tracés au préalable.

L'observation des faces fracturées est donc une étape nécessaire qui permet de comprendre les modalités d'utilisation des lingots en s'interrogeant sur le volume de métal prélevé.

L'étude des surfaces et des traces permet de restituer en partie la chaîne opératoire des lingots supposés de Saint-Sulpice, de leur fabrication à leur fragmentation. Ces résultats montrent aussi que ces lingots ici présentés ont été prélevés, confirmant ainsi leur fonction de « stockage/réserve de métal ». Sur la base de ces éléments, nous avons par la suite caractérisé les propriétés du métal de tous les fragments métalliques du corpus, afin de comparer leur composition et leur qualité métallurgique.

### 3. Caractérisation des éléments de métallurgie : composition chimique et propriétés physiques

---

#### 3.1. Composition chimique élémentaire

L'étude de la composition chimique élémentaire des métaux base cuivre a pour objectif principal de déterminer la nature du métal ou de l'alliage de chaque objet. Elle permet également de renseigner la qualité du cuivre et éventuellement les groupes de provenance en lien avec l'extraction du minerai de cuivre. Les analyses de composition par spectrométrie d'émission atomique et exploitées par analyse en composante principale (ACP-AES) ont été réalisées par C. Le Carlier de Veslud sur l'ensemble des objets du dépôt (Milcent *et al.* 2017). Sur certains objets du corpus, dont les biconvexes (n°69 et 70), plusieurs prélèvements ont été effectués afin de s'assurer de l'homogénéité de leur composition et de la reproductibilité de la méthode.

Nous commencerons par décrire les différentes catégories de composition que nous avons identifiées, afin de réaliser ensuite une synthèse des principales conclusions relatives à l'étude spécifique de notre corpus. Par la suite, toutes les données de composition élémentaire seront exprimées en pourcentage massique (%m.).

##### 3.1.1. Principes et résultats

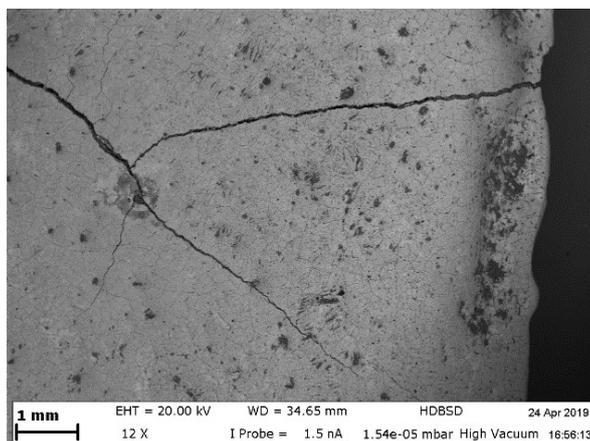
#### Familles base cuivre

Avant de s'intéresser spécifiquement à la composition de notre corpus, il convient de regarder celle du dépôt de Saint-Sulpice dans sa globalité. Les résultats sont donnés au Tableau B3 en annexe.

Ainsi, dans le dépôt, trois familles d'alliages cuivreux, classiques pour la période du Bronze final, sont représentées. Il s'agit de : cuivre non allié, alliage binaire cuivre-étain et alliage ternaire cuivre-étain-plomb (tableau 2 et fig. 22). Il existe de plus quelques cas d'alliages, de composition complexe et moins commune, dont le caractère d'alliage volontaire n'est pas assuré, car leur composition a trait à des éléments pouvant être présents dans le minerai de cuivre et non ajoutés volontairement comme l'arsenic, le nickel et le fer. Leur teneur dépasse parfois largement les 2%, allant jusqu'à plus de 8% en masse. Pour le plomb, pouvant provenir de l'extraction du cuivre, nous avons considéré qu'il devait probablement résulter d'un ajout volontaire quand sa teneur est supérieure à 1,2% en masse (Guilaine *et al.* 2017, p. 135). Pour l'étain, étant présent dans les bronzes à des teneurs supérieures à 4% en masse, il est systématiquement considéré comme élément d'alliage intentionnel.

Par ailleurs, parmi les objets en bronze sans plomb (alliage Cu-Sn), certains présentent une concentration en étain supérieure à 15%. Cette valeur correspond à la limite de solubilité de l'étain

dans le cuivre après recuit (Dour 2004). Au-delà, une phase riche en étain (phase delta  $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$ ), dure et cassante, se forme lors de la solidification du lingot et s'observe même après recuit. En conséquence, les propriétés de l'alliage ne sont plus les mêmes. L'augmentation de la teneur en étain conduisant à la formation de la phase delta ( $\text{Cu}_{41}\text{Sn}_{11}$ ) fragilise l'alliage, mais le durcit. Des fissures sur la surface de l'objet (lingot rectangulaire plat) n°59 qui contient 22% d'étain sont d'ailleurs observées (fig. 21).



*Figure 21 Fissure du fragment n°59, microscope électronique à balayage, grossissement x12*

D'un point de vue métallurgique, les alliages ternaires cuivre-étain-plomb ( $\text{Cu-Sn-Pb}$ ) présentent deux catégories (fig. 22) : ceux possédant plus d'étain que de plomb, et inversement. Dans la première catégorie ( $\text{Sn} > \text{Pb}$ ), les concentrations d'étain varient de 7 à 19% et celles en plomb étant comprise entre 1,2 et 10%. Dans la seconde ( $\text{Pb} > \text{Sn}$ ), la teneur en Pb est très importante, supérieure à 17%, et atteint la valeur de 32% pour des teneurs en d'étain comprises entre 5 et 13% en masse.

Toutes les familles d'alliage base cuivre sont représentées dans notre corpus. Par exemple, les biconvexes sont en cuivre, les bipennes (sauf n° 47) sont en bronze binaire et les barres (n°61 et 62) sont en bronze ternaire. À ceci s'ajoutent des alliages de cuivre « complexes » surement non intentionnels. Le bipenne 47 en est un bon exemple : contenant 81% de cuivre, il ne contient ni plomb ni étain, mais possède ~9% d'arsenic, 6% de nickel et 3% de fer.

### Propreté du métal

Un métal se définit à partir de la nature des éléments d'additions ( $\text{Sn}$ ,  $\text{Pb}$  principalement). Mais un autre paramètre est aussi à prendre en compte pour évaluer ses qualités métallurgiques. Il s'agit de sa propreté. Généralement appliqués pour décrire la teneur en précipités solides dans le matériau métallique, la pureté d'un métal peut être aussi définie par la quantité des éléments considérés comme indésirables (non intentionnels). D'un point de vue métallurgique, ce critère est important. Cette concentration « d'impuretés » (%Imp) a des incidences sur la façon dont le métal peut être exploité. C'est un critère d'analyse pertinent qui permet de déterminer sa qualité : un alliage peu propre est peu souhaitable pour subir une mise en forme par traitement thermomécanique. De fait, la propreté d'un métal a été déterminée ici comme le pourcentage des éléments d'addition non intentionnels. Il a été calculé en additionnant les concentrations massiques de tous les éléments

chimiques considérés comme non alliés volontairement (ici Sn et/ou Pb). Pour le cas des bronzes, les impuretés sont surtout associées au(x) minerai(s) de cuivre, l'élément majeur. Dans cette étude, même s'ils sont parfois présents en fortes quantités, les éléments arsenic (As), fer (Fe), zinc (Zn) et nickel (Ni) ne sont pas ajoutés intentionnellement (ou éventuellement par sélection des minerais). À partir des résultats présentés par la figure 23, nous avons défini le seuil de propreté du métal à 1.2% d'impuretés. Cette valeur est arbitraire, mais correspond à un bon ordre de grandeur. Dans l'industrie, cette valeur est de l'ordre de 0.5% et correspond par exemple à la teneur moyenne d'impuretés avant un affinage électrolytique (blister)<sup>4</sup>.

Différentes classes de métaux (Tab. 2), sériés en fonction de leur taux d'impuretés (%Imp) ont été mises en évidence. Il s'agit de :

- classe « propre » (P), %Imp < 1.2% massique. À noter que le fragment à section biconvexe (n°71) présentant une variation entre 1% et 1.6% en impuretés (Fig. 23) a été considéré comme propre, bien que ces variations indiquent que le métal coulé n'est pas parfaitement homogène.
- classe (I), %Imp > 1,2%, mais aucun élément ne dépasse 2% en masse,
- classe (II) regroupe les métaux possédant un élément chimique de concentration supérieure à 2% en masse,
- et (III) indique qu'il y en a plusieurs.

Pour le dépôt de Saint-Sulpice, toutes ces classes de propreté sont observées (fig.22 et 23). Ils traduisent une grande hétérogénéité de composition et donc d'origine, mais aussi probablement de savoir-faire métallurgique. Les différentes classes de matériaux présents dans le dépôt de Saint-Sulpice sont présentées au Tableau YYY et sur les figures 22 et 23 ci-après.

Il est à remarquer que ceci conduit à nuancer la notion d'alliage en définissant ici 10 classes de matériaux : 3 classes de matériaux – C pour cuivre non allié intentionnellement, B pour bronze (Cu-Sn) et T pour alliage ternaire (Cu-Sn-Pb) – couplées à 4 qualités de propreté. À noter que les alliages de cuivre « complexes » mentionnés précédemment sont ici « rangés » dans la classe des matériaux cuivre à fort taux d'impuretés (fig. 23). Peut-être la définition d'un nouvel alliage de cuivre pour décrire ces matériaux complexes serait à considérer. Nous ne l'avons pas effectuée dans le cadre de ce mémoire.

---

<sup>4</sup> *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries*, 2017, commission européenne, p. 201.

Tableau 2 Classes de métaux

Familles base cuivre	Critères	Classes de propreté
<b>C</b>	Cuivre : Sn <0,5% et Pb <1%	<b>C1</b> = P
		<b>C2</b> = I
		<b>C3</b> = II ou III
<b>B</b>	Bronze Sn < 15% et Pb <1,2%	<b>B1</b> = P
		<b>B2</b> = I
		<b>B3</b> = II
<b>BA</b>	Bronze Sn > 15% (limite solubilité)	<b>BA</b> = P
<b>T</b>	Ternaire (1,20% < Pb <10%)	<b>T1</b> = P
		<b>T2</b> = I
<b>TA</b>	Ternaire (Pb% > Sn%)	<b>TA</b> = P

P = <1,2% m. impuretés  
 I = >1,2% m. impuretés  
 II = un élément > 2% m. (alliage)  
 III = plusieurs éléments >2% m.

La teneur en plomb en fonction de la teneur en étain du dépôt de Saint Sulpice

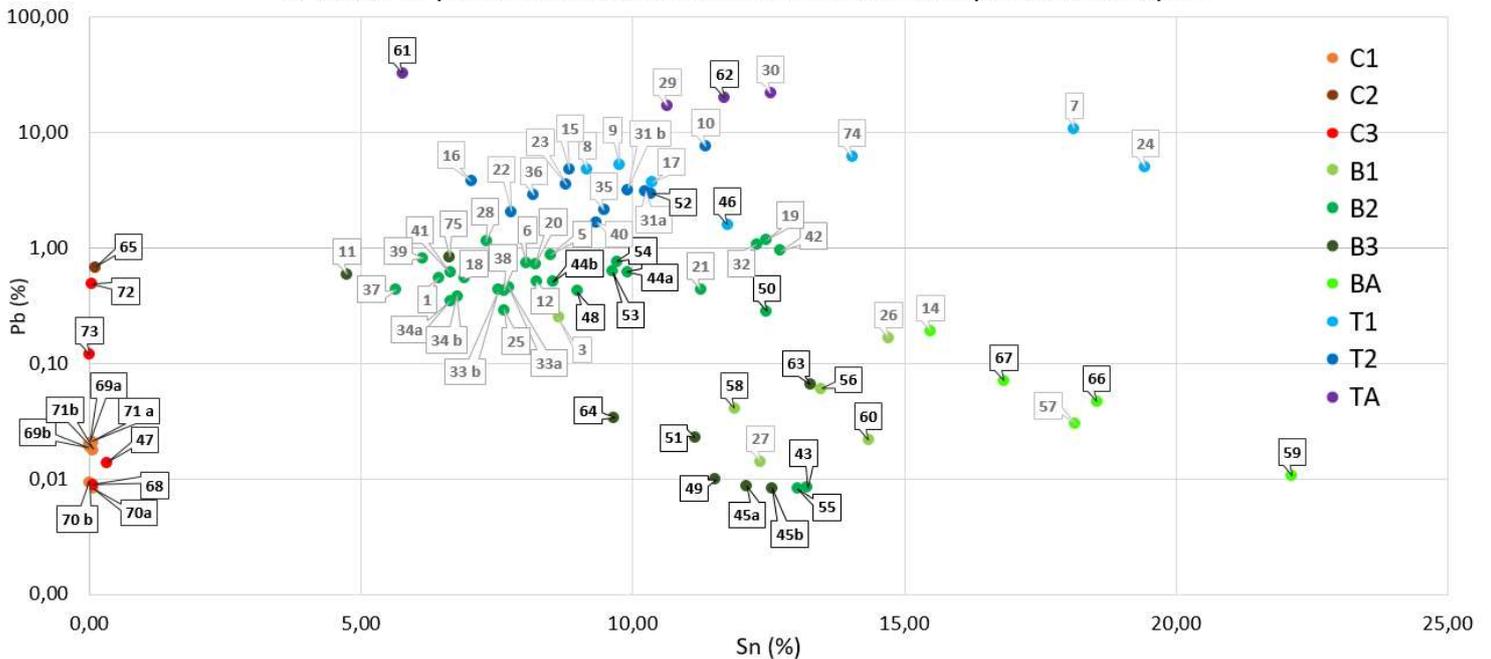


Figure 22 Familles bases cuivre et classes de propreté des objets du dépôt de Saint-Sulpice (en gras les lingots supposés).

Le taux d'impureté en fonction de la teneur en cuivre

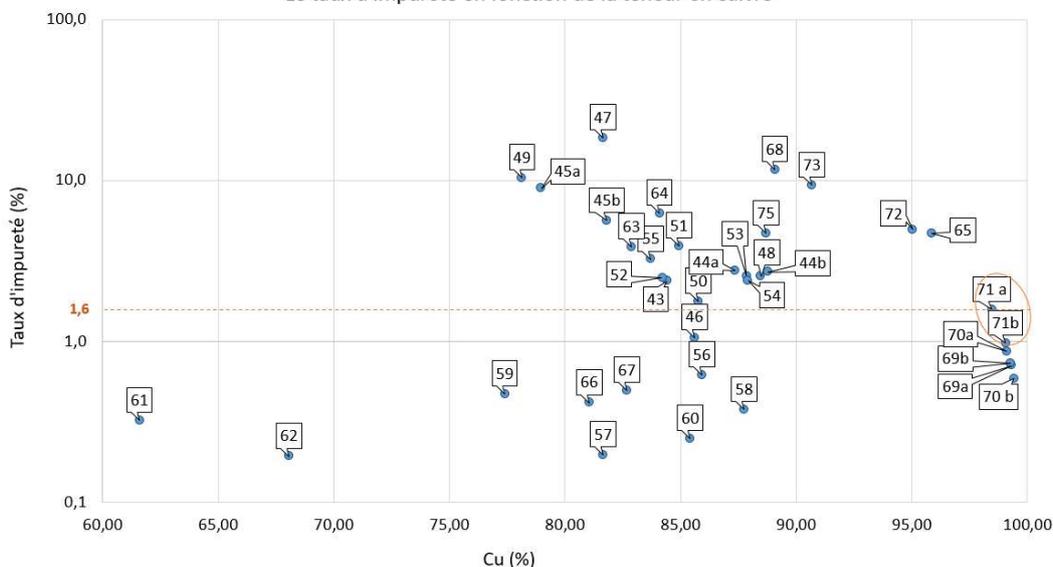


Figure 23 Taux d'impureté en fonction de la teneur en cuivre des lingots supposés

## Groupe de provenances

La composition chimique d'un matériau base cuivre comprend le cuivre (Cu) comme élément majeur et des éléments mineurs ou traces respectivement en faible ou très faible quantité. Du fait que le cuivre est l'élément majoritaire, l'étude de ces derniers permet de comprendre le type de minerai dont le cuivre a été extrait, car à travers leurs associations, des signatures géologiques peuvent être décelées. Cependant la détermination d'un type de minerai et de l'origine géologique n'est pas corrélée généralement à la provenance géographique exacte (Mille, Bourgarit 2000). Il est possible en revanche de réaliser des groupes de provenances relatifs en comparant les teneurs de ces éléments mineurs et traces. Ces données ont été appréhendées pour notre corpus d'objets par la réalisation de diagrammes en étoiles (annexe fig. C2 et C3).

Deux pôles de composition chimique se distinguent clairement parmi les lingots de Saint-Sulpice. Certains ont une teneur très importante en fer, tandis que les autres contiennent principalement de l'arsenic et peu de fer, confortant l'idée d'une provenance multiple de ces artefacts. Ces deux groupes de composition montrent que le cuivre pourrait provenir de minerais très différents, mais issus soit de minerais de type sulfure de fer ou soit de type sulfure d'arsenic. Au regard de la littérature, les minerais les plus fréquemment exploités au cours de l'âge du Bronze sont la chalcopirite ( $\text{CuFeS}_2$ ), et le cuivre gris (falherz), ce dernier associant la tennantite  $(\text{Cu,Fe})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$  et la tétraédrite  $(\text{Cu,Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$  (Bourgarit, Mille 2007). Nous suggérons que les objets de notre corpus proviennent de ces deux types de minerais. Nous avons ensuite mis en évidence des sous-groupes au sein de ces deux catégories. Ils sont présentés dans le tableau 3 ci-dessous et mettent en relation les différents artefacts et leur caractéristique en éléments d'impuretés.

*Tableau 3 Groupes de provenances*

type de minerais	Groupe	Éléments traces	N° des objets
<b>Falherz</b>	A1	As(SbFeZnBi)	71, 73, 56
	A2	AsCoBi(Zn)	59, 61
	A3	SbAs(BiNi)	66, 74
	A4	ZnAsBi(FeNi)	58,62,60
	A5	AsNiFe	47
	A6	SbAg(AsBi)	67
<b>Chalcopirite</b>	F1	FeNi(Zn)	43, 55, 63
	F2	Fe(CoNiAs)	49, 68, 64
	F3	FeZn	48, 53,54,72
	F4	Fe(ZnNiCo)	69,70,50,51,45,46
	F5	FeSbZn	52,65,44

À ce stade de la recherche, il serait intéressant de pouvoir compléter ces données avec les résultats des analyses isotopiques du plomb, afin de vérifier la pertinence des groupes que nous avons proposés et leur interprétation.

### 3.1.2. Éléments de discussion

#### Diversité des types de composition

D'un point de vue général, les objets supposés lingots se retrouvent dans chacune des cinq familles base cuivre (cuivre, bronzes binaires ou ternaires peu ou fortement alliés) et recouvrent les quatre classes de propreté que nous avons définies (fig.22, tableau 2). Chaque nuance ou famille d'alliage est déclinée à la fois par un métal très propre et par un métal incluant de fortes teneurs en éléments indésirables.

Par ailleurs, nous remarquons que les bronzes avec beaucoup d'étain (BA) et les ternaires avec une majorité de plomb (TA) sont systématiquement très propres (%Imp >1.2%m.), alors qu'ils contiennent de fortes teneurs en éléments d'addition. Les lingots de plomb et d'étain qui ont été employés étaient donc très purs, et ont été ajoutés à un cuivre déjà très pur. Ceci indiquant une qualité d'alliage recherchée pour ces matériaux et donc une élaboration raisonnée pour une « exploitation » contrôlée de ces métaux dès cette période.

#### Comparaison avec la morphologie-typologie

Sur la base de tous les éléments de caractérisation précédemment définis, les résultats de l'analyse de la composition avec la morpho-typologie (§ 1.1) des 30 éléments de notre corpus ont été regroupés sur la figure 24. Nous avons résumé chaque critère de composition : familles base cuivre, classes de propreté et groupes de provenance. Les éléments de notre corpus sont disposés selon leur morphologie, les formes géométriques et les formes d'outils déclinés en sous-groupes.

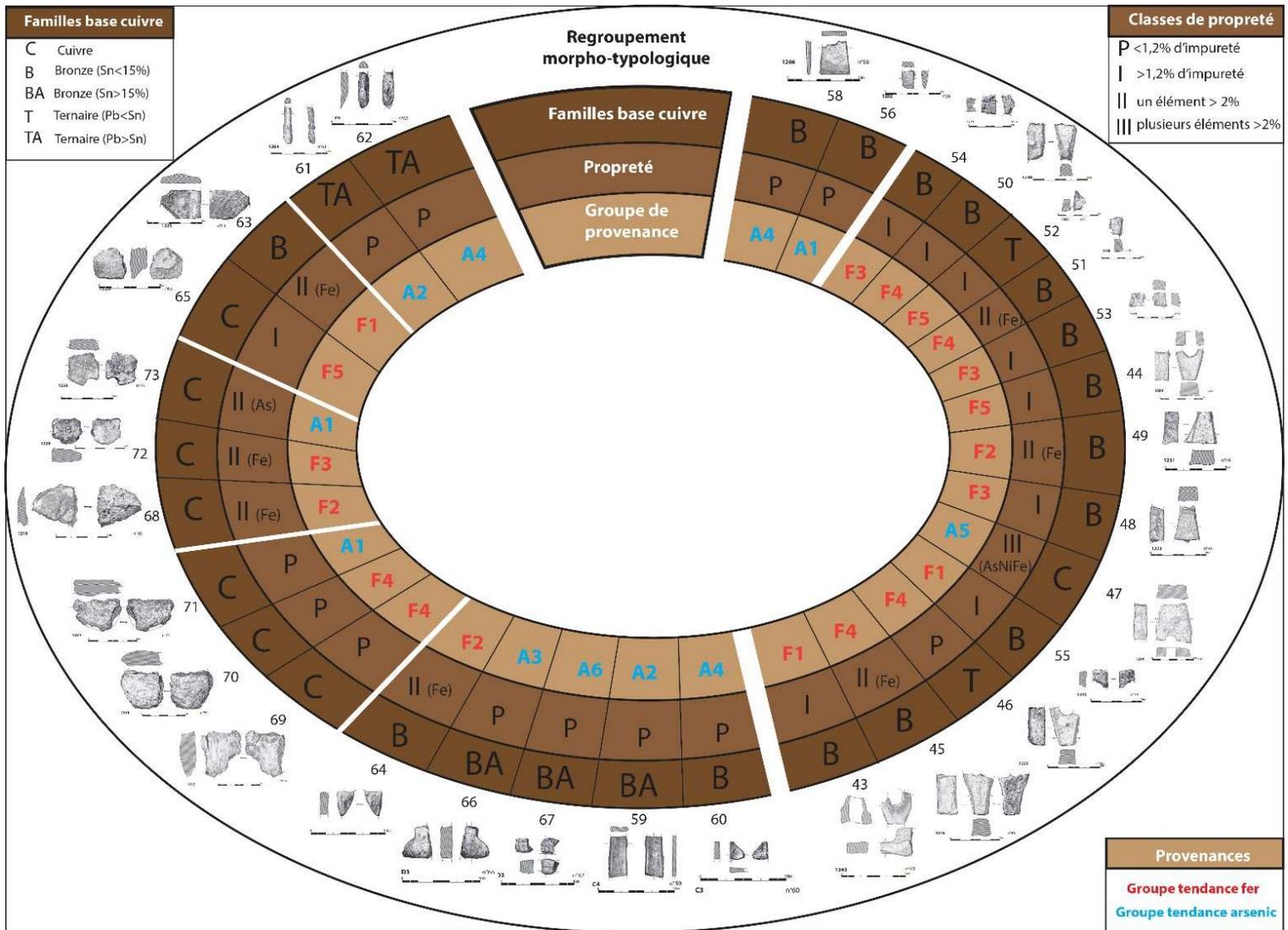


Figure 24 Synthèse des résultats de Composition et morpho-typologie des lingots supposés (dessins P. Biliant, conception G. Meynieux)

### Types d'alliage et classes de propreté

De façon générale, les groupes morpho-technologiques correspondent avec les types d'alliage et les classes de propreté. Les bipennes à l'exception du n°47 sont tous en bronze binaire ou ternaire, mais avec peu de plomb (n°46 et 52). C'est un groupe qui présente des propretés hétérogènes, car toutes les classes que nous avons définies sont représentées. Les haches lingots n°56 et 58 sont par contre des alliages binaires très propres.

Les lingots barres n°61 et 62 sont en alliage ternaire avec plus de plomb que d'étain et sont très propres. Les n°63 et 65 avec des formes plutôt rectangulaires, coulées dans un sol sont respectivement en bronze et en cuivre impropre. Les plano-convexes n°68,72 et 73 sont en cuivre peu propre avec un élément, fer ou arsenic dépassant les 2%. Les biconvexes n°71 et n°69,70 sont des cuivres très propres.

Enfin, les fragments de lingots géométriques issus de moules bivalves sont des bronzes, trois d'entre eux possèdent des taux d'étain élevés (n°59,66,67). Ils sont tous très propres, à l'exception du n°64.

La relation entre la morphologie et les types de minerai (fig.24 chalcopryrite en rouge et falherz en bleu) déclinés chacun en groupe de provenance (indiqué par le numéro) est moins marquée.

### **Type de minerais**

Les objets qui se distinguaient déjà par les critères précédents, famille d'alliage et propreté, diffèrent également par leur spectre d'éléments mineurs et traces. Ainsi, le bipenne n°47 provient d'un minerai plutôt de type falherz alors que tous les autres bippennes de notre corpus proviennent de chalcopryrites. Il en va de même pour le n°64 parmi les fragments géométriques issus de moules bivalves qui provient de chalcopryrite tandis que les autres sont sûrement issus de minerais falherz.

D'autres groupes comme les plano-convexes ou les biconvexes, homogènes jusqu'à présent se diversifient sur le critère de la provenance du minerai. Le plano-convexe n°73 semble de type falherz tandis que les deux autres fragments sont de type chalcopryrite. De même, le biconvexe n°71 est de type falherz tandis que les n°70 et 69 (qui recollent) sont issus de chalcopryrite.

### **Les groupes de provenances :**

Lorsque nous regardons plus précisément les 11 groupes de provenances que nous avons élaboré (6 de type falherz et 5 de type chalcopryrite), nous constatons que nos groupes construits à partir des critères morphologiques et technologiques sont très hétérogènes. À l'exception des fragments de biconvexes n°70 et 69 (qui représentent le même objet), il n'y a que parmi les bippennes (morpho groupe qui contient le plus de fragments) que plusieurs objets ont la même signature. Les bippennes n°43 et 55 sont du groupe F1 (FeNi(Zn)), les bippennes n°48,53 et 54 appartiennent au groupe F3 (FeZn), les bippennes n°45,46 et 50 sont du groupe F4 (Fe(ZnNiCo)), enfin les bippennes n°44 et 52 correspondent au groupe F5 (FeSbZn).

En nous intéressant cette fois-ci aux groupes de provenances sans distinction des catégories morphologiques et des types d'alliages, nous remarquons que plusieurs lingots ont la même signature et la même classe de propreté.

Si nous regardons par exemple les lingots barres en alliage ternaire n° 61 et 62, nous nous apercevons que leur groupe de provenances diffèrent l'un de l'autre (A2 et A4), mais concordent respectivement avec d'autres objets en alliage binaire comme le n°59, ou les n°60 et 58. Ils sont tous très propres et leur unique différence de composition et la teneur importante en plomb des

lingots barres. Sur la base de ces constats, nous pouvons émettre l'hypothèse qu'il peut s'agir d'objets partageant la même source de cuivre auquel de l'étain puis du plomb auraient été ajoutés. De la même façon, nous avons remarqué d'autres possibles relations de provenance entre des lingots géométriques en cuivre et des bipennes en bronze pour les groupes F2 (fig.24, le plano-convexe n°68 avec les bipennes n°49 et le fragment n°64), F4 (fig.24, les biconvexes n°69 et 70 avec le bipenne n°46) et F5 (fig.24, le n°65 avec les bipennes n°44 et 52). Ces possibilités de corrélations que nous observons seraient à examiner plus en détail par une analyse statistique en composante principale sur l'ensemble des objets du dépôt de Saint-Sulpice.

Nous remarquons donc que la morphologie des lingots correspond plutôt aux types d'alliages qu'aux groupes de provenances. À partir de cette observation, nous pouvons envisager que certaines formes devaient correspondre au stockage de certains types d'alliage. L'ajout d'un élément d'addition étain ou plomb impliquerait la coulée du métal dans un autre moule. De manière schématique, le cuivre serait sous la forme de lingot géométrique de forme relativement simple, les bronzes sous la forme de bipenne, les bronzes très propre et parfois très riche en étain sous la forme de lingots rectangulaires et de hache coulés en moule bivalve, et enfin, l'ajout d'une forte quantité de plomb se qualifierait par des formes allongées, en barres.

### Les alliages complexes

Nous avons observé des cas d'alliages complexes rarement mentionnés dans la littérature. Nous avons déjà présenté le bipenne n°47 en cuivre non allié qui possède un taux d'impureté autour de 18% en masse. Il combine ainsi de fortes teneurs en arsenic, nickel et fer. Il s'agit peut-être d'une matte, résultat d'une première fusion d'un minerai comportant encore du soufre et d'autres éléments chalcophiles (Bourgarit, Mille 2007). Nous avons réalisé une cartographie élémentaire au microscope électronique à balayage équipée d'un détecteur EDX. Celle-ci montre la présence marquée de soufre (annexe fig.C4). Le taux d'impureté extrêmement élevé indiquerait que ce bipenne provient peut-être de la réduction d'un minerai polymétallique, comme ça serait le cas des bipennes issus du dépôt de Kanalski Vrh en Slovénie (Trampuz Orel, Heath 2001). Le lingot plano convexe 73 contient également beaucoup d'arsenic (5%). Des cuivres avec beaucoup d'impuretés devaient donc être utilisés. Parmi les bipennes en bronzes, certains possèdent des taux en fer très élevés (jusqu'à 8%, n°45a). Les propriétés de ces types d'alliage nous sont inconnues.

Dans cette partie, la composition des alliages et leur taux d'impureté ont été présentés et discutés. Les résultats montrent une très grande variabilité des natures métallurgiques de ces objets. Il s'agit tout à la fois de cuivre propre ou non, de bronzes binaires ou ternaires, à faibles ou fortes teneurs en éléments d'addition et de propriétés variables. L'étude de la composition en éléments

d'impuretés révèlent que deux grands types de minerais de cuivre ont été exploités, ceux riches en fer et ceux à dominante arsenic. Cependant, là aussi de nombreuses variations des cortèges d'impuretés sont mises en évidence, traduisant une grande différence des minerais exploités et donc peut-être de l'origine des objets eux-mêmes. Ce dépôt de Saint Sulpice semble traduire l'existence d'un véritable stockage de métaux divers, impliquant possiblement l'existence à Saint Sulpice d'un véritable carrefour d'échanges de matériaux élaborés. Des relations de provenance et de fabrications entre certains éléments de notre corpus sont cependant à envisager et à investiguer par des analyses statistiques plus approfondies.

Pour compléter cette caractérisation métallurgique, il est important de considérer également les propriétés physiques de ces fragments métalliques. En effet celles-ci conditionnent directement l'usage potentiel de ces métaux « déposés ». Appliquant des méthodes non-invasives, nous avons ici entrepris de mesurer deux paramètres simples mais caractéristiques d'un point de vue métallurgique : la masse volumique pour déterminer la porosité des matériaux et la dureté des surfaces.

### **3.2. Propriétés mécaniques et physiques : masse volumique et dureté**

Caractériser un alliage c'est chercher à comprendre ses aptitudes. À travers l'étude des masses volumiques converties en taux de porosité et de la dureté, c'est la qualité du matériau qui est interrogé. Certains alliages en relation avec leur composition seront plus adaptés à la coulée qu'à une mise en forme par martelage.

De fait, sur des objets métalliques, il est possible de mesurer plusieurs propriétés physiques et mécaniques. La composition des objets de Saint-Sulpice est parfois très éloignée des standards industriels actuels, qui ne contiennent pas ou peu d'impuretés. Pour cette raison, il existe très peu de références valables permettant par comparaison de déduire les propriétés mécaniques et physiques d'artefacts archéologiques aux compositions chimiques élémentaires complexes (Pernot dir. 2017).

#### **3.2.1. La masse volumique des lingots**

La masse volumique est une grandeur physique rarement utilisée pour étudier des objets en archéologie, à l'exception des scories. Pourtant cette méthode est non invasive et permet de sérier simplement les vestiges étudiés. Ici de plus, le matériel issu du dépôt de Saint-Sulpice possède une couche de corrosion suffisamment fine et homogène pour être négligeable et permettre une mesure pertinente. Plus un métal en fusion est fluide et moins il y a de chance de créer des défauts de porosité. Nous rappelons également que le geste et la maîtrise du métallurgiste sont des facteurs techniques à prendre aussi en considération (Dour 2004). Une grande partie des éléments de notre

corpus sont des bronzes à 10-12% d'étain en moyenne qui présentent une bonne aptitude à la coulée (Kuijpers 2017).

Une étude de Hanson et Pell-Walpole (1951 p. 44) montre que les propriétés mécaniques des bronzes à étain s'affaiblissent nettement au-delà des 5% de porosité. La résistance à la tension et à l'élongation baisse considérablement dès lors qu'un trop grand nombre de défauts apparaissent.

### Principe et protocole

La masse volumique ( $\rho$ ) est mesurée à partir du principe d'Archimède. Elle s'exprime en  $\text{g.cm}^{-3}$ . Elle a été mesurée selon le protocole suivant. Chaque objet est pesé dans l'air, puis dans l'eau. Les mesures des masses dans l'air  $M_{\text{air}}$  et dans l'eau  $M_{\text{eau}}$  ont été effectuées avec une balance et un kit de densité ; l'équipement a été testé à l'aide d'échantillons de densité connue (tableau en annexe). La température de l'eau doit être renseignée pour donner la densité de l'eau ( $\rho_{\text{eau}}$ ) et permettre à la machine de calculer la densité de chaque objet. La formule de calcul appliquée est alors :

$$\rho_{\text{matériau}} = \frac{M_{\text{air}} \times \rho_{\text{eau}}}{(M_{\text{air}} - M_{\text{eau}})}$$

Pour un objet (n°59), plusieurs mesures ont été effectuées à l'aide d'appareillages différents (tableau D4 et D5 en annexe). La présence de bulle d'air à la surface de l'objet peut conduire à des erreurs de mesure. Différents essais ont été effectués pour évaluer cette incertitude. Il a été trouvé que les variations de mesures entre un échantillon pesé avant ou après suppression des bulles d'air (dans l'eau) induisent au maximum une erreur de  $0,01 \text{ g.cm}^{-3}$ .

### Résultats

A partir de la mesure de la masse volumique et de la connaissance de la composition chimique précise des objets, nous pouvons calculer leur taux de porosité. Le taux de porosité indique l'écart entre la valeur théorique de la masse volumique d'un objet définie par sa composition et la valeur mesurée.

$$\tau_{\text{porosité}} = \frac{\rho_{\text{théorique}} - \rho_{\text{mes}}}{\rho_{\text{théorique}}} \times 100$$

La densité théorique ( $\rho_{\text{théorique}}$ ) du cuivre pur est de  $8,9 \text{ g.cm}^{-3}$  et celle des alliages cuivreux à 10% d'étain est de l'ordre de  $8,8 \text{ g.cm}^{-3}$  (tableau D6 en annexe). Une majorité des objets de Saint-Sulpice ont des taux d'impuretés ou de plomb qui, dans certains cas, peuvent être très élevés ; ceci peut faire varier légèrement les valeurs usuelles des densités théoriques. En s'appuyant sur des alliages industriels à notre disposition, ne présentant cependant pas d'impuretés à un niveau aussi élevé, quelques valeurs de références ont pu être établies (tableau D6 en annexe).

Les résultats de ces mesures pour l'ensemble des objets du corpus sont donnés au tableau D7 en annexe. Il apparaît que les valeurs des masses volumiques des lingots du dépôt sont comprises entre 8,62 et 7,4 g.cm<sup>-3</sup>, soit un taux de porosité entre 2 et 15,9%. Parmi les éléments de notre corpus ayant des formes d'outils, seuls deux fragments sont en dessous des 5% de porosité. Il s'agit des bipennes n°45 et 49 (4,5 et 4,3 %). Les autres sont compris en moyenne autour des 8%. Le fragment de tranchant n°58 atteint les 15,8% de porosité. Avec ce taux de porosité élevé, les propriétés mécaniques de ces métaux sont faibles. De fait, ces alliages de fonderie ont des qualités de coulée ne permettant pas leur usage direct par martelage (traitements thermomécaniques).

Ces objets ne semblent donc pas adaptés dans l'ensemble pour une activité mécanique suggérée par leur forme. Les bronzes géométriques plats possèdent trop d'étain pour pouvoir être mis en forme par martelage même si leur taux de porosité est très bas (n° 63 et 66, entre 2 et 4% de porosité).

Les cuivres sont souvent mis en forme par martelage, car moins aisés à couler. Ce procédé de fabrication nécessite qu'il y ait le moins de défauts possible pour éviter la rupture. En revanche, pour un lingot, une porosité élevée peut être un avantage, car elle permet de le casser plus facilement (Modl 2010). Nous avons vu précédemment qu'un lingot de cuivre n'est pas facile à portionner (§ 2.3.2).

Nous avons remarqué que le taux de porosité des objets de notre corpus ne semble pas lié aux éléments d'additions, étain et plomb, ni aux taux d'impureté (fig.25 et annexes D fig. 5, 6 et 7). Les porosités les plus basses sont celles d'objets en bronze (bipennes alliés), mais certains cuivres propres ou impurs ont des valeurs comparables.

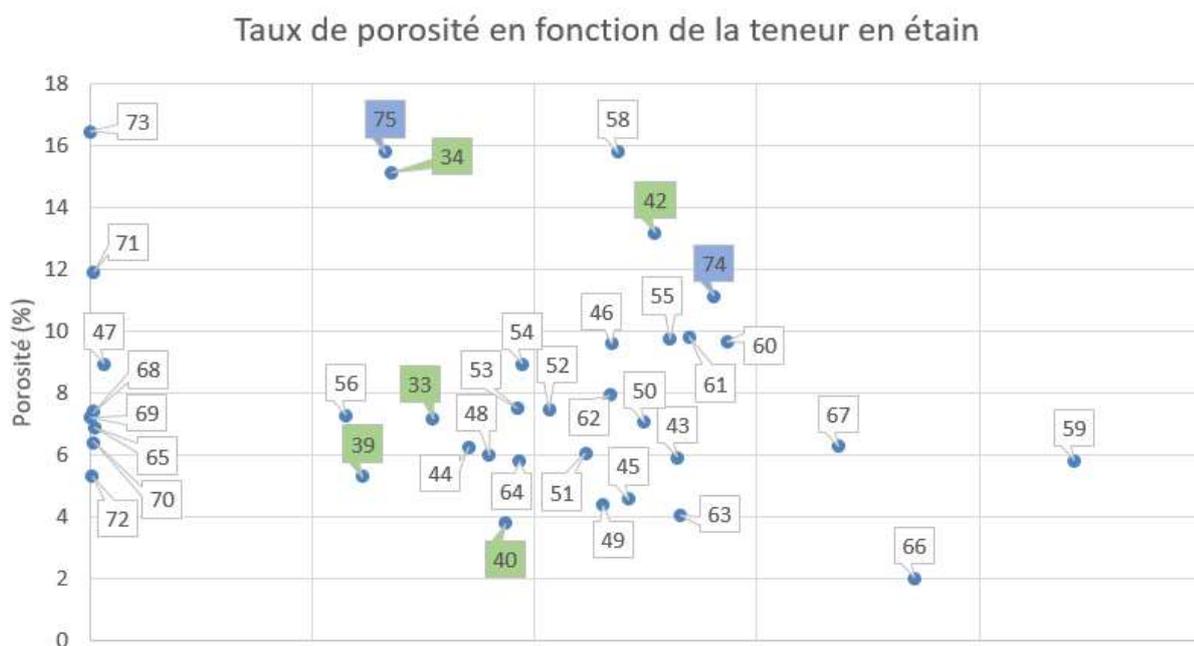


Figure 25 La porosité en fonction de la teneur en étain des lingots supposés (blanc), de résidus de coulée (bleu) et d'objets finis: haches à aileron et bélière (vert)

Il semble donc que ce taux dépend plutôt des conditions de coulée et du savoir-faire métallurgique propre aux fondeurs que de la composition de l'alliage en éléments d'addition ou d'impuretés (cf. annexe D, « causes de la porosité »). Des fragments de haches à aileron mesurés à titre de comparaison ont un taux de porosité beaucoup plus élevé que la majorité des lingots supposés, notamment la hache n° 34. Le fragment de tranchant n° 58 est aussi extrêmement poreux. Ceci indique une qualité de coulée et donc de fabrication peu maîtrisée.

Cette méthode de mesure de la masse volumique est pertinente sur des objets archéologiques peu corrodés, car elle est peu coûteuse, reproductible et non invasive. La masse volumique fournit des informations sur la qualité de la coulée, mais aussi sur les propriétés mécaniques. D'autres techniques pour mesurer la densité des objets seraient à essayer comme la photogrammétrie voire la tomographie de rayons X (ou par neutrons pour les objets plus épais) qui permettrait en plus de localiser précisément les défauts de coulée.

### 3.2.2. Dureté

#### Principe

La dureté d'un métal est une propriété mécanique qui se mesure ponctuellement (localisation précise). Elle s'obtient en testant la résistance de la surface du matériau à la pénétration d'un corps plus dur. Il existe plusieurs façons de réaliser ces essais, en fonction de la nature du pénétrateur, de la charge appliquée et de la taille des empreintes (macro ou microdureté). En archéométrie, ce sont généralement les tests Vickers à forte charge en microdureté qui sont utilisés afin de minimiser la visibilité des empreintes. L'indenteur est en diamant de forme pyramidale à base carrée.

Pour les vestiges archéologiques, mesurer des duretés est peu invasif, par comparaison aux tests mesurant les capacités d'élongation ou la résistance à la rupture. Les tests de dureté appliqués à du mobilier métallique archéologique ont de fait plusieurs intérêts :

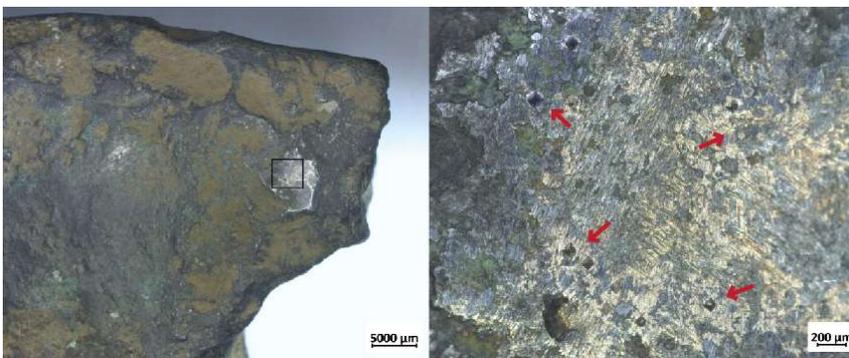
- la dureté est en relation avec la composition du métal. Elle augmente pour des teneurs croissantes en éléments d'addition dans le cuivre. Les mesures de dureté peuvent donc renseigner sur la composition d'un alliage et différencier des cuivres plus ou moins alliés. L'ajout d'étain et la présence d'arsenic durcissent l'alliage. En trop forte quantité, l'alliage devient cassant.

- la dureté varie aussi en fonction de l'état métallurgique d'un objet. Plus il est déformé par martelage, et plus sa dureté va croître. D'un endroit à un autre sur un même objet, elle peut différer. La comparaison en relatif des valeurs obtenues peut mettre en évidence des états métallurgiques différents (brut de coulée, recuit ou écroui).

## Application au corpus

Ces mesures sont rarement appliquées directement sur des objets archéologiques, dans le cas de Saint-Sulpice, l'application des mesures de dureté a été tout d'abord de valider la méthodologie et la faisabilité. Elle a eu pour objectif premier de mieux cerner l'influence de la composition sur la dureté et de mettre en évidence des zones de déformation par martelage, écrouies. Nous voulions également tester les surfaces des extrémités des deux bipennes (n°45 et 46) qui présentaient des traces d'utilisation afin d'évaluer relativement l'importance de la déformation. Ces mesures avaient pour objectif de comprendre si les déformations étaient liées à un usage répété ou à des coups occasionnels. Pour des raisons en lien avec l'appareillage, nous n'avons pas pu réaliser ces tests jusqu'à présent. En effet, le fonctionnement des appareillages ne permet pas de réaliser ces tests sur des objets avec des reliefs trop importants. Le choix des objets et de la localisation précise des zones à tester est donc une étape cruciale. En plus de sélectionner des endroits stratégiques selon les problématiques d'étude, il faut aussi que les surfaces soient planes pour que la machine puisse exercer sa charge correctement et que l'empreinte soit lisible.

Des essais de dureté ont pu être effectués sur certains éléments de notre corpus. Une préparation de la surface par micropolissage était nécessaire afin de retirer la couche de corrosion qui fausserait les valeurs de dureté. Cette méthode est donc légèrement invasive (fig.26), mais les empreintes mesurées sont très faibles : de l'ordre de la centaine de  $\mu\text{m}$  de large et bien inférieure en profondeur.



*Figure 26 Empreintes de micro dureté Vickers sur le bipenne n°47*

Les résultats sont reportés en annexe (tableau E8). Nous ne les détaillerons pas, car ceux-ci sont encore trop peu nombreux pour être commentés.

## 4. Discussion

---

### 4.1. La fonction de lingot ?

Nous avons proposé une définition théorique du lingot comme étant un objet produit afin de stocker du métal, à courte durée pour élaborer un alliage ou pour une durée plus longue avec notamment la mise en circulation du métal. Cette définition repose donc sur l'intentionnalité de sa fabrication. L'artisan est conscient que l'objet-lingot est destiné à être recoulé. En revanche, appliquée à l'archéologie, il est difficile de prouver entièrement la volonté du métallurgiste de créer un objet intermédiaire dans une chaîne de production et de circulation. Les lingots peuvent être confondus avec des résidus de coulée dans le cas de formes simples coulées au sol, ou avec des objets utilitaires s'ils en ont la forme.

Pour le dépôt de Saint-Sulpice, les supposés lingots se divisent en deux catégories. Ceux de formes relativement simples coulés dans un sol ou dans un moule bivalve (les lingots géométriques) et ceux qui prennent une forme d'outil (bipennes et haches). Parmi les géométriques, certains laissent peu de doutes sur leur fonction de stockage du métal, à l'exemple des lingots circulaires à section biconvexes ou plano-convexes. Les lingots circulaires plano-convexes sont largement répandus en Europe au Bronze final (Czajlik 2006). Ils sont issus de la métallurgie d'extraction du cuivre (lingots primaires). Ils sont de plus portionnés selon des techniques permettant de réaliser des portions précises, de masses comparables, comme le montrent les fragments de biconvexes n°69 et 70.

D'autres, notamment les deux fragments en forme de barre, qui sont des bronzes à plomb (n°61 et 62), pourraient éventuellement être des résidus de coulée. Ils ont de petites dimensions et leur forme très simple indique qu'il n'est pas nécessaire d'anticiper leur fabrication, si ce n'est de tracer un sillon dans le sol. Cela peut être une technique pour récupérer le surplus de métal. D'un autre côté, leur composition en alliage cuivre-étain fortement allié en plomb et leur forme allongée qui pourrait être facile à fragmenter permettent d'envisager qu'ils aient tout aussi bien pu servir dans la préparation d'alliage. Leur fabrication aurait donc pu être planifiée.

Les formes plates issues de moules bivalves (n°64, 66 et 67) auraient pu être des ébauches pour une mise en forme par déformation thermodynamique. Cependant, l'étude de leur composition et la mesure du taux de porosité ont montré qu'ils contenaient soit trop d'étain (ce qui rend l'alliage cassant et très dur), soit un nombre trop important de défauts de porosité. Ces objets devaient donc être recoulés pour être utilisés.

L'étude des formes d'outils de notre corpus a montré qu'ils ne pouvaient pas, ou de façon occasionnelle, être utilisés en tant qu'outils. Les haches ont des taux de porosité très élevés, ce qui

fait chuter leurs propriétés mécaniques. Elles ne portent ni traces d'utilisation ni traces de préparation du tranchant (contrairement aux autres haches du dépôt). À nouveau, l'interprétation lingot peut aussi être nuancée, notamment par l'idée qu'il puisse s'agir de raté de coulée. D'autres objets du dépôt dont des haches à ailerons pensées comme fonctionnelles ont aussi montré des taux de porosité élevés.

Les bipennes ont une grande variabilité de forme et sont en bronze. Deux d'entre eux ont une extrémité entièrement conservée sur laquelle des traces d'utilisation ont pu être observées. Ces traces caractérisent une utilisation plutôt opportuniste, car il s'agit de coups peu nombreux qui ne visent pas à la pérennité de l'objet-outil en créant par exemple des encoches. Ces traces existent sur quelques rares fragments en Italie (Borgna 1992, p.29, n°1 Redipuglia). Cette catégorie de lingot comprend un cas particulier, un bipenne (n°47) plus large que les autres, il est en cuivre avec des taux très élevés d'arsenic de nickel et de fer. Il a été martelé sur sa surface supérieure et inférieure et pourrait éventuellement avoir servi de tas.

#### **4.2. Un corpus varié aux provenances multiples ?**

Notre corpus de lingots se caractérise par des morphologies très différentes. Formes et surfaces témoignent de procédés de moulage variés : creusement, moule monovalve et bivalve. L'implication dans la préparation du moule avant la coulée n'est donc pas là même en fonction de chaque type. La forme d'un lingot peut être plus réfléchie, et s'adapter notamment aux besoins de circulation ou de stockage propre à l'économie du métal (Nikis, Livingstone Smith 2017). Elle peut aussi refléter des logiques culturelles, symboliques et sociales. Les lingots en forme d'outils sont fréquents tout au long de l'âge du Bronze (Czajlik 2006) et se retrouvent à Saint-Sulpice avec les lingots bipennes. Ces formes d'outils devaient être importantes pour transporter et échanger le métal. D'autres formes planes rectangulaires comme celles des lingots issus de bivalves épais (n° 64, 66 et 67) sont peu connues, ce qui peut être mis en relation avec le manque de recherche et la fracturation des lingots qui complexifient la reconnaissance des formes.

Notre approche de la composition du dépôt et de notre corpus de lingots a montré également une grande variété de catégories d'alliages, nuancées par plusieurs classes de propreté. Cette diversité morpho-technologique ainsi que de composition semblent indiquer des provenances multiples pour ces objets. Nous avons également pu constituer un minimum de 11 groupes de provenances pour les 30 fragments de notre corpus. La typologie des objets du dépôt de factures multiples (atlantique, ibérique, alpine, italique) confortait déjà cette idée de provenances plurielles (Milcent, Tramon 2015).

La position géographique du dépôt à Saint-Sulpice dans le Quercy pourrait expliquer cette diversité d'objet en étant au carrefour de plusieurs voies de circulation du métal à partir de régions métallifères connues comme la péninsule Ibériques ou les Alpes, au cours du Bronze final.

Pour la majorité des lingots de notre corpus, nous ne pouvons pas actuellement retracer leur provenance. En revanche, nous savons que les lingots bipennes ont une aire de répartition majoritairement située autour de l'arc alpin (Borgna 1992 ; Leonardi *et al.* 2015 ; § 2.2.3, fig.9). Les lingots bipennes analysés en Europe sont en alliage cuivre-étain, ou cuivre-plomb dans le cas des dépôts slovènes. Comme il s'agit de lingots d'alliages, cela signifie que leur fabrication s'est probablement réalisée en deux temps : réduction du minerai de cuivre, puis ajout de l'élément d'addition. Ces deux opérations peuvent ne pas avoir eu lieu au même endroit.

À Saint-Sulpice, comme dans la grande majorité des sites, il n'a pas été retrouvé de lingots d'étain, ingrédient clé pour l'obtention des bronzes. Il faut donc admettre que la présence de lingot d'alliage dit secondaire est un élément clé de l'économie au Bronze final. Nous pourrions penser que la circulation de lingots d'alliages serait en effet stratégiquement et économiquement importante pour la maîtrise des ressources. Elle pourrait répondre aussi à des besoins spécifiques de recettes d'alliage déjà élaborées, permettant, par exemple, de diviser les étapes de production.

Nous remarquons que les formes de bipennes renvoient à une idée générale d'outils de percussion, mais ne semblent pas suivre de normes précises et proviennent majoritairement, comme à Saint-Sulpice de moules toujours différents (§ 2.2.3, fig.10). Il est donc difficile de les rattacher à une aire géographique précise. Il peut s'agir comme l'envisage E. Borgna de cercles de production multiples (Borgna 1992, p.53). De plus, nous avons dans notre corpus un fragment de bipenne à manchon (n°43). Cette caractéristique est rencontrée jusqu'à présent uniquement parmi les outils fonctionnels de Sardaigne ou de Chypre (Lo Schiavo *et al.* 1985). Des comparaisons à partir des analyses isotopiques avec d'autres lingots bipennes connus permettraient peut-être d'aller plus en profondeur dans la compréhension de la circulation de ces objets.

### **4.3. Diversité de lingots : palette de métallurgiste ?**

Dans cette diversité de formes et de compositions qui caractérise notre corpus, nous percevons cependant des éléments d'homogénéités. Nous avons par exemple observé des schémas et des méthodes de fragmentation des lingots « systématique » pour les bronzes (rupture nette et déformation du volume) et pour les cuivres (prédécoupe et martelage).

Deux quarts de lingot circulaire à section biconvexe remontent en formant une moitié de lingot. Cela peut indiquer que la fracturation volontaire, par prédécoupe à chaud et suivit d'une phase de martelage, aurait pu avoir lieu soit peu de temps avant la constitution du dépôt, soit lors de période de récupération de métal à partir du dépôt déjà constitué. Le dépôt se trouvait dans un petit

creux karstique (Milcent, Tramon 2015), ce qui permet éventuellement de récupérer ou déposer des objets aisément.

Nous avons également remarqué que d'une façon générale, les catégories morphologiques correspondent plutôt avec les différentes familles d'alliages qu'avec les groupes de provenances, par exemple : les formes circulaires pour du cuivre, les formes d'outils bipennes pour du bronze et les barres pour des alliages cuivre-étain-plomb. Les ressemblances des signatures géologiques, entre certains lingots, d'alliages différents, nous permettent d'émettre l'hypothèse que l'ajout d'un élément d'alliage comme l'étain ou le plomb se marque également par un changement de forme du lingot. Des analyses statistiques plus approfondies permettraient de repérer plus en détail les éventuelles corrélations entre lingots de cuivre, lingot d'alliage cuivre-étain, ou cuivre-étain-plomb avec le reste des éléments du dépôt de Saint-Sulpice.

Ainsi, en examinant un corpus de trente fragments, nous avons remarqué leur diversité, mais aussi leurs liens. Pour un métallurgiste, cette variété de lingots amassés représente toute une gamme de métal à refondre avec des qualités et des propriétés différentes. Le choix de la matière première est la première étape vers la production d'un objet. Il peut se faire en fonction de différents paramètres, notamment l'objectif et la technique de production (par coulée ou par mise en forme), le savoir-faire du métallurgiste, le contexte économique et culturel (Kuijpers 2008). Ces variations de composition et de qualité que nous observons à l'aide des analyses de composition devaient être perceptibles au moyen par exemple de la couleur des alliages, de la sonorité du métal lors d'un martelage (Bourgarit 2003 ; Kuijpers 2017).

#### **4.4. Limites de l'étude et perspectives**

À partir des objets supposés lingots du dépôt de Saint-Sulpice, nous avons proposé une définition de la fonction de lingot en archéologie. Nous avons également mis en place une méthode d'étude de ces objets. Elle a été réalisée suivant deux axes majeurs : comprendre leur chaîne opératoire par l'observation des formes et des surfaces ; caractériser le métal par l'étude des compositions et des propriétés physiques (masse volumique et dureté). À l'issue de ce travail, nos résultats fournissent des pistes de recherches qui nécessitent d'être approfondies. La fabrication et la fracturation des lingots biconvexes sont par exemple à investiguer davantage et à expérimenter. Les essais de dureté nécessitent également d'être multipliés pour mieux connaître les propriétés des alliages anciens. La composition de notre corpus de lingot, mais aussi des autres objets du dépôt mériterait d'être revue par une analyse en composante principale.

L'interprétation des résultats obtenus pour les lingots de Saint-Sulpice est limitée par le manque de connaissance et d'études poussées sur les lingots dans le sud de la France. Il n'est pas encore possible de situer notre corpus dans une vision plus élargie. Les éléments de comparaison

existent surtout pour les formes de lingots spécifiques et déjà inventoriés comme les lingots bipennes.

## Conclusion

---

À partir d'approches archéométriques et technologiques, nous avons eu pour objectif de caractériser les objets supposés lingots du dépôt de Saint-Sulpice.

Nous avons appliqué des méthodes ayant pour but de connaître certaines de leurs propriétés physiques et mécaniques. Elles sont encore peu employées en archéologie et permettent d'appréhender un lingot par l'étude de son matériau, le métal.

Nous avons montré que ce dépôt livre un éventail de lingots avérés et de lingots potentiels peu commun. Cela se traduit par des formes, des compositions et des qualités d'alliages cuivreux variées.

Notre démarche nous a permis de nous interroger sur la notion de lingot, que nous mettons en relation avec la circulation du métal, mais aussi avec la logistique d'une production d'atelier, notamment dans la préparation d'alliage.

Le dépôt de Saint-Sulpice témoigne qu'au Bronze final, le Quercy n'était pas en marge des voies de circulation du métal. L'analyse de la composition démontre, à l'appui de la morphotypologie des objets, les provenances multiples des lingots.

L'étude des lingots en archéologie est donc complexe en raison principalement d'un problème de définition et d'identification. Elle est cependant nécessaire pour appréhender la circulation du métal, les choix d'approvisionnements et les pratiques et techniques de production d'objets métalliques.

## Bibliographie

---

- Artioli et al. 2014** : ARTIOLI (G.), ANGELINI (I.), NIMIS (P.), ADDIS (A.), M VILLA (I.) - Prehistoric copper metallurgy in the Italian Eastern Alps : Recent results. *In: Historical Metallurgy* 47(1), 2014, p. 51–59.
- Bachemann et al. 2002/2003** : BACHMANN (H. G.), JOCKENHOVEL (A.), SPICHAL (U.), WOLF (G.) - Zur bronzezeitlichen Metallversorgung im mittleren Westdeutschland: Von der Lagerstätte zum Endprodukt. *Berichte der Kommission für Archäologische Landesforschung in Hessen* 7. Rahden-Westfalen 2004, p. 67-120.
- Barbieri et al. 2015** : BARBIERI (M.), CAVAZZUTI (C.), PELLEGRINI (L.), SCACCHETTI (F.). - Experiencing visible and invisible metal casting techniques in the Bronze Age Italy. In: R. Kelm, (ed.), *Archaeology and Crafts, Experiences and experiments on traditional skills and crafts in Archaeological Open-Air Museums in Europe*. Husum : AÖZA. 2015, p. 94-102.
- Begemann et al. 2001** : BEGEMANN (F.), SCMITT-STRECKER (S.), PERNICKA (E.), LO SCHIAVO (F.). - Chemical composition and lead isotopy of copper and bronze from Nuragic Sardinia. *European Journal of Archaeology*, 4(1), 2001, p. 43-85.
- Bietti Sestieri 2008**: BIETTI SESTIERI (A. M.) - L'Età del Bronzo finale nella penisola italiana. *In : Padusa*, XLIV, 2008, p. 7-54
- Borgna 1992**: BORGNA (E.). - *Il ripostiglio di Madriolo presso Cividale e i pani a piccone del Friuli-Venezia Giulia*, ed. Quasar, Roma, 147 p.
- Boulud et al. 2019** : BOULUD-GAZO (S.), BORDAS (F.), VIGNEAU (T.). – « Le site du Grand Brécharde à Soullans : apport des opérations archéologiques sur le lieu de découverte d'un nouveau dépôt métallique du Bronze final atlantique 2 », *Journée d'actualité de l'APRAB du 2 mars 2019* [non publié]
- Bourgarit 2003** : BOURGARIT (D.). - La couleur des alliages anciens à base de cuivre, *Ecole thématique interdisciplinaire sur la couleur des matériaux : le métal*, 2003, p. 1-11.
- Bourgarit, Mille 2007** : BOURGARIT (D.), MILLE (B.). - Les premiers objets métalliques ont-ils été fabriqués par des métallurgistes ?, *l'actualité chimique* - octobre-novembre 2007, n.312-313, p.54-60.
- Burger 2008** : BURGER (E.) - *Métallurgie extractive protohistorique du cuivre : Etude thermodynamique et cinétique des réactions chimiques de transformation de minerais de cuivre sulfurés en métal et caractérisation des procédés*. *Matériaux*. [Thèse] Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2008.
- Czajlik 1996** : CZAJLIK (Z.) – Ein spätbronzezeitliches Halbfertigprodukt : Der Gusskuchen eine Untersuchung anhand von Funden aus Westungarn. *Archaeologia Austriaca*, 1996, p. 165-180.

- Czajlik 2006** : CZAJLIK (Z.) - La distribution du cuivre des origines à la fin de l'âge du Bronze en France. Essai de comparaison des demi-produits provenant de France orientale et de l'Europe centrale. *ActaArchHung* 57, 2006, p. 47-65.
- Dour 2004** : DOUR (G.). - *Fonderie alliages, procédés, propriété d'usage, défauts : aide-mémoire*. Paris, 2004. 349 p.
- Eckel 1992** : ECKEL (F.). - *Studien zur Form- und Materialtypologie von Spangenbarren und Ösenringbarren*. Bonn, 1992
- Gabillot, Gomez de Soto 2004** : GABILLOT (M.), GOMEZ DE SOTO (J.) - Trésors et cachettes de l'Âge du Bronze en France : cent ans de recherches et d'évolution des méthodes d'analyse, Congrès de centenaire : *Un siècle de construction du discours scientifique en Préhistoire*, 2004, p. 55-69
- Gomez Ramos 1993** : GOMEZ RAMOS (P.). - Tipología de lingotes de metal y su hallazgo en los depósitos del Bronce final de la Península Ibérica, *Cuadernos de Prehistoria y Arqueología*, 20, 1993, p. 73-105.
- Guilaine et al. 2017** : GUILAINE (J.), CAROZZA (L.), GARCIA (D.), GASCO (J.), JANIN (T.), MILLE (B.). – Launac et le Launacien : Dépôts de bronzes protohistoriques du sud de la Gaule, 2017, 381p.
- Hanson, Pell-Walpole 1951** : HANSON (D.), PELL-WALPOLE (W. T.). – *Chill-cast tin bronzes*, Londres, 1951, 368 p.
- Jones 2007** : JONES (M.R.). - *Oxide ingots, copper production, and the Mediterranean trade in copper and other metals in the Bronze Age*, 2007 (mémoire de master). 435 p.
- Jung et al. 2011**: JUNG (R.), MEHOFFER (M.), PERNICKA (E.) - Metal exchange in Italy from the middle to the final Bronze Age, *In: Metallurgy: Understanding How, Learning Why*, 2011, p. 231-248.
- Knapp 2000** : KNAPP (A. B.). - Archaeology, science-based archaeology and the Mediterranean Bronze Age metals trade. *European journal of archaeology* 3 (1), 2000, p. 31-56.
- Krause, Pernicka 1998** : KRAUSE (R.), PERNICKA (E.). - The function of ingot torques and their relation with early bronze age copper trade In : C. Mordant, M. Pernot, V.Rychner, *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*, 1998, Paris, p. 219-226.
- Kuijpers 2008** : KUIJPERS (M. H. G.) - *Bronze Age Metalworking in the Netherlands (c. 2000-800 BC) : A Research Into the Preservation of Metallurgy Related Artefacts and the Social Position of the Smith*, 2008, 171 p.
- Kuijpers 2013** : KUIJPERS (M. H. G.). - The sound of fire, taste of copper, feel of bronze, and colours of the cast: sensory aspects of metalworking technology *Embodied Knowledge: Historical*

Perspectives on Belief and Technology. Edited by Marie Louise Stig Sorensen and Katharina Rebay-Salisbury, 2013

**Kuijpers 2017** : KUIJPERS (M. H. G.). – A sensory update to the chaîne opératoire in order to study skill: Perceptive categories for copper-compositions in archaeometallurgy, *Journal of Archaeological Method and Theory* 25 (3), 2017, p. 863-91.

**Le Carlier de Veslud et al. 2014** : LE CARLIER DE VESLUD (C.), EDME (L.), FILY (M.). - Lingots et déchets de fonderie dans les dépôts de l'horizon de l'épée à pointe en langue de carpe (Bronze final IIIb) ; proposition de typologie. *Bulletin de la Société préhistorique française*, 111, n°3, 2014. p. 509-522.

**Lenerz-De Wilde 2002** : LENERZ DE WILDE (M.). - Bronzezeitliche Zahlungsmittel, *Mitteilungen der Anthropologischen Gesellschaft in Wien* 132, 2002, p. 1-23.

**Leonardi et al. 2015** : LEONARDI (G.), TASCA (G.), VICENZUTTO (D.) - Pani a piccone, palette a cannone e asce tipo Ponte S. Giovanni: quale ruolo nelle direttrici della metallurgia del Bronzo finale? In: *Preistoria e protostoria del Veneto, atti dell'Istituto italiano di preistoria e protostoria*, p. 409- 418.

**Lo Schiavo et al. 1985** : LO SCHIAVO (F.), MACNAMARA (E.), VAGNETTI (L.) – Late cyprriot imports to Italy and their influence on local bronzework, In: *Papers of the British School at Rome*, Volume LIII, 1985, p. 1-71.

**Martorano, Capocchi 2000** : MARTORANO (M. A.), CAPOCCHI (J. D. T.). - Dendrite structure control in directionally solidified bronze castings, *International Journal of Cast Metals Research*, p. 49-57.

**Milcent, Tramon 2015** : MILCENT (P. Y.), TRAMON (A.). – *Le dépôt métallique du Bronze final 2 récent (1050 – 1000 av. J. -C.) de la Bouygue à Saint Sulpice*. Rapport d'opération et d'aide à la préparation de publication, UT2J, UMR TRACES, Septembre 2015, 181 p.

**Milcent et al. 2017** : MILCENT (P. Y.), LE CARLIER DE VESLUD (C.), MADER (S.), BORDAS (F.). - *Le dépôt métallique du Bronze final 2 de St-Sulpice (Lot) « La Bouygue » dans son contexte archéologique*. Rapport d'opération et d'aide à la préparation de publication, UT2J, UMR TRACES décembre 2017, 57 p.

**Milcent 2017** : MILCENT (P. Y.). - Valeurs d'usage et d'échange, la dimension prémonétaire des dépôts en Gaule atlantique du XIIIe au Ve s. av. J.-C..In: *Bulletin de la Société préhistorique française*, tome 114, numéro 4, octobre-décembre 2017, p. 711-737.

**Mille, Bourgarit 2000** : MILLE (B.), BOURGARIT (D.). - L'analyse des alliages anciens à base de cuivre : état des connaissances et développement d'un protocole d'analyse par ICP-AES, *Revue d'Archéométrie*, 24, 2000. p. 13-26.

- Modl 2010** : MODL (D.). - Zur Herstellung und Zerkleinerung von plankonvexen Gusskuchen in der spätbronzezeitlichen Steiermark, Österreich, *In : Experimentelle archäologie in Europa, Bilanz 2010*, p. 127-151.
- Montero-Ruiz et al. 2011** : MONTERO-RUIZ (I.), ROVIRA HORTALA (M. C.), RENZI (M.), MURILLO-BARROSO (M.), HUNT (M.), GENER (M.), CASTANYE (P.). – Lingotes planoconvexos de cobre en la primera mitad del I milenio ac en la Península Ibérica, *Boletín de Asociación española de amigos de la Arqueología*, 46, p. 99-119.
- Mozsolics 1984** : MOZSOLICS (A.). - Ein Beitrag zum Metallhandwerk der ungarischen Bronzezeit. *BRGK 65*, 1984. p. 20–72, Taf. 1–24.
- Nessel 2014** : NESSEL (B.). – Bronze age portioning of raw metal, concepts, patterns and meaning of casting cakes. *In: Apulum 51*. Alba Iulia. p. 401–425.
- Nikis, Livingstone Smith 2017** : NIKIS (N.), LIVINGSTONE SMITH (A.) - Copper, Trade and Politics: Exchange Networks in Southern Central Africa in the 2nd Millennium CE, *In : Journal of Southern African Studies*, 2017 p. 895-911.
- Pare 1999** : PARE (C.) – Weights and weighing in Bronze age central Europe, *In: Eliten in der Bronzezeit: Ergebnisse zweier Kolloquien in Mainz und Athen*. Monographien / Römisch-Germanisches Zentralmuseum, Forschungsinstitut für Vor- und Frühgeschichte, 43. 1999, p. 421-513, table 23-29.
- Pare 2000** : PARE (C.). –Bronze and the Bronze age, *In: Metals Make the World Go Round: The Supply and Circulation of Metals in Bronze Age Europe; Proceedings of a Conference Held at the University of Birmingham in June 1997*. Oxford: Oxbow Books, 2000, p. 1-38.
- Pernicka 1999** : PERNICKA (E.). - Trace element fingerprinting of ancient copper: a guide to technology or provenance, *In Young, S.M.M., Pollard, A.M., Budd, P. & Ixer, R.A. (ed.) Metals in antiquity* (British Archaeological Reports international series 792), 1999, p. 163–171.
- Pernot 1998** : PERNOT (M.). - L'organisation de l'atelier du bronzier, *In : C. Mordant, M. Pernot, V.Rychner, 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*, 1998, Paris, p. 219-226.
- Pernot dir. 2017** : PERNOT (M.) dir. - *Quatre mille ans d'histoire du cuivre - Fragments d'une suite de rebonds*, THEA, Ausonius Editions, Presses Universitaire de Bordeaux, Bordeaux, 2017, 360 p.
- Peroni 1961** : PERONI (R.) - *Ripostigli della età dei metalli. 2 - Ripostigli del Grossetano*. *In : Inventaria Archaeologica*, Istituto italiano di Preistoria e Protostoria, Sansono.

- Peroni 2004** : PERONI (R.). - Sistemi ponderali nella circolazione dei metalli in Europa tra lo scorcio del II e l'inizio del I millennio A.C., *In : Metodi e approcci archeologici : l'industria e il commercio nell'Italia antica*, ed. De Sena (E.C), Dessales (H.), 2004 p. 63-77.
- Radivojević et al. 2018** : RADIVOJEVIĆ (M.), ROBERTS (B. W.), PERNICKA (E.), STOS-GALE (Z.), MARTINON-TORRES (M.), REHREN (T.), BRAY (P.), BRANDHERM (D.), LING (J.), MEI (J.), VANDKILDE (H.), KRISTIENSEN (K.), SHENNAN (S. J.), BROODBANK (C.). - The Provenance, Use, and Circulation of Metals in the European Bronze Age: The State of Debate. *In: Journal of Archaeological Research* [En ligne] 02 juillet 2018 <https://doi.org/10.1007/s10814-018-9123-9>
- Renzi 2010** : RENZI (M.). - La producción de «lingotes-hacha» en el Levante peninsular: nueva valoración a partir de los materiales de La Fonteta (Guardamar del Segura, Alicante), *Revista de Arqueologia de Ponent*. 20, p. 127-143.
- Robbiola 1990** : ROBBIOLA (L.). – *Caractérisation de l'altération de bronzes archéologiques enfouis à partir d'un corpus d'objets de l'âge du Bronze. Mécanismes de corrosion*, thèse, Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 1990, 226 p.
- Rovira et al. 2009** : ROVIRA (S.), MONTERO-RUIZ (I.), RENZI (M.). – Experimental Co-smelting to copper-tin alloys, *In : Metals and Societies Studies in honour of Barbara S. Ottaway*, Kienlin (T. L.) et Roberts (B.) (eds.). 2009, p. 407-414.
- Scott 1991** : SCOTT (D. A.). – *Metallography and microstructure of ancient and historic metals*, 1991, 155 p.
- Terenzani 2006/2007** : TEREZIANI (E.). - *I pani a piccone nel contesto europeo*, Tesi di Laurea specialistica, Università di Padova, dirigida par Leonardi, 2007.
- Terzan 1996** : TERZAN (B.), ed. - *Depotjske in posamezne kovinske najdbe Bakrene in Bronaste dobe na Slovenskem II = Hoards and individual metal finds from the Eneolithic and Bronze Ages in Slovenia II*. Ljubljana : Narodni Muzej, 1996.
- Trampuz Orel, Heath 2001** : TRAMPUZ OREL (N.), HEATH (D.J.). - The Kanalski Vrh hoard - a case study of the metallurgical knowledge and metals at the beginning of the 1st millennium BC, *Arheološki Vestnik* 52, 2001, p. 143-171.
- Vandkilde 2005** : VANDKILDE (H.). - A Biographical Perspective on Ösenringe from the Early Bronze Age, *In* Kienlin (T.) (ed.), *Die Dinge als Zeichen: Kulturelles Wissen und materieller Kultur. Internationale Fachtagung an der Johan Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt am Main 3.-5. April 2003: Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie*. vol. 125, Habelt, Bonn, 2005, p. 263-281.

**Wang et al. 2018** : WANG (Q.), STREKOPYTOV (S.), ROBERTS (B. W.) - Copper ingots from a probable Bronze Age shipwreck off the coast of Salcombe, Devon: composition and microstructure  
*Journal of Archaeological Science* 97(9): p. 102-117.

## Annexes

---

### Liste des annexes

---

<b>A. Présentation du corpus</b> .....	56
A.1. Description.....	56
A.2. Planches photos.....	58
<b>B. Microscopie : observation des surfaces</b> .....	74
<b>C. Composition chimique élémentaire</b> .....	75
<b>D. Masse volumique et porosité</b> .....	79
<b>E. Dureté</b> .....	83
<b>F. Synthèse des résultats</b> .....	84
Figure B1 Structures dendritiques, surface du n°60, image MEB L. Robbiola et G.Meynieux.....	74
Figure C2 Groupes fer .....	77
Figure C3 Groupes arsenic .....	78
Figure C4 cartographie élémentaire MEB/EDX, surface du n°47, pour le soufre, l’oxygène, le fer et le nickel .....	79
Figure D5 Le taux de porosité en fonction de la teneur en étain.....	82
Figure D6 La porosité en fonction de la teneur en plomb .....	82
Figure D7 Le taux de porosité en fonction du taux d'impureté .....	83
Figure F8 Synthèse des résultats de composition, de morpho-typologie, de porosité et de dureté des lingots supposés (dessins P. Biliant, conception G. Meynieux).....	84
Tableau A1 Description des lingots supposés de Saint-Sulpice.....	57
Tableau A2 Description des éléments de comparaison .....	58
Tableau C3 Résultat analyses chimiques élémentaires (ACP-AES) du dépôt de Saint-Sulpice (éléments du corpus en orange), valeurs en % massique .....	75
Tableau D4 Mesures d'étalonnage de la balance Sartorius Quintix 2102i-1s et du kit de densité YDK04 ..	79
Tableau D5 Vérification des mesures sur plusieurs équipements .....	79
Tableau D6 Tableau des références d'alliages industriels (d'après www.matweb.com) .....	80
Tableau D7 Résultats des mesures de la masse volumique, calculs du taux de porosité et choix de la valeur théorique.....	80
Tableau E8 Valeurs HV mesurées sur les objets du dépôt de Saint Sulpice, et sur des valeurs standards (charge P=1 kgf). Valeur moyenne et écart type (L. Robbiola). .....	83
Tableau F9 Synthèse des données et des résultats des 30 lingots supposés .....	85

### **A. Présentation du corpus**

#### **A.1. Description**

Tableau A1 Description des lingots supposés de Saint-Sulpice

N°	N° SRA	Description	Masse (g)	Longueur (cm)	Largeur (cm)	Epaisseur (cm)
43	1245	Fragment de bipenne avec manchon, 2 faces cassées	255,3	4,9	4,7	1,8
44	1220	Fragment de bipenne, 2 faces cassées, barbelure autour du trou	708,8	7,1	6,5	3,5
45	1216	Fragment de bipenne, 1 faces cassées, une extrémité conservée (panne)	926	8,0	6,2	4
46	1221	Fragment de bipenne, 1 faces cassées, une extrémité conservée (panne)	556,3	7,5	5,5	3,3
47	1214	Fragment de bipenne large, 2 faces cassées	1427,6	9,7	8,5	3,2
48	1222	Fragment de bipenne, 2 faces cassées	394,5	6,1	4,5	2,6
49	1231	Fragment de bipenne, 2 faces cassées	320,4	5,8	4,8	2,5
50	1230	Fragment de bipenne, 2 faces cassées	336,7	6,7	3,9	3,1
51	1226	Fragment central de bipenne, 3 faces cassées	253,7	4,4	2,9	3,3
52	1232	Fragment central de bipenne, 2 faces cassées	159,5	4,5	3	3,1
53	1228	Fragment central de bipenne, 3 faces cassées	199,9	3,7	4,1	2,7
54	1227	Fragment central de bipenne, 3 faces cassées	164,3	4,8	3,5	3,1
55	1272	Fragment d'extrémité (panne) de bipenne, 3 faces cassées	56,15	3,2	2,9	1,5
56	1282	Fragment d'une moitié de tranchant non préparé épais	40,38	3,2	2,4	1,2
58	1266	Fragment de tranchant non préparé fin	63,95	5,1	4,2	0,7
59	C4	Fragment rectangulaire légèrement biconcave fin	46,4	5,3	2,5	0,6
60	C3	Fragment plat fin avec un bord droit	10,1	2,1	1,8	0,6
61	1264	Fragment d'une extrémité en forme de barre à section plane-convexe	44,23	6,4	1,6	0,1
62	D1	Fragment d'une extrémité en forme de barre à section plane-convexe	60,2	5,9	1,8	1,1
63	1225	Fragment plat, deux bords droits parallèles, 2 faces cassés	343,4	5,4	7,5	1,7
64	1283	Fragment plat, un angle droit parallèles, 2 faces cassés	42,28	3,2	2,3	1,1
65	1224	Fragment sub-carré épais	261,1	5,3	5,0	2,6
66	D3	Fragment plat parallépipédique	124,8	4,5	3,7	1,4
67	D2	Fragment plat parallépipédique	38,1	1,9	2,4	2,4
68	1218	Fragment d'un quart de lingot circulaire à section plane-convexe	381,9	8,3	8,2	8,2
69	1212	Fragment d'un quart de lingot à section biconvexe	1371,9	9,6	1,9	1,9
70	1213	Fragment d'un quart de lingot à section biconvexe	1391,9	8,9	6,7	4,2
71	1217	Fragment d'un quart de lingot à section biconvexe	824,6	9,9	5,0	6,7

72	1229	Fragment d'un lingot à section plane-convexe	411,6	5,9	5,8	5,0
73	1223	Fragment d'un lingot à section plane-convexe	306,2	6,4	2,0	5,8

*Tableau A2 Description des éléments de comparaison*

N°	N° SRA	Description	Masse (g)	Longueur (cm)	Largeur (cm)	Epaisseur (cm)
33	1240	fragment proximal de lame de hache à ailerons	182	7,3	3,9	0,8
34	1234	fragment proximal de lame de hache à ailerons	196,1	7,9	4,8	0,6
39	1260	fragment distal de lame de hache	120,4	4,9	4,6	1,4
40	1265	fragment distal de lame de hache	104,9	4,1	4,5	1,2
42	C2	Fragment de bélière	14,9	1,7	3,0	0,8
74	1274	masselotte	17	2,2	2,0	1,1
75	1280	masselotte	25,36	4,1	1,6	1,4
77	1270	rebut de coulée	42,9	4,3	3,2	0,9

## A.2. Planches photos



N° 44



N° 45



N°46



N°47



N°48



N°49



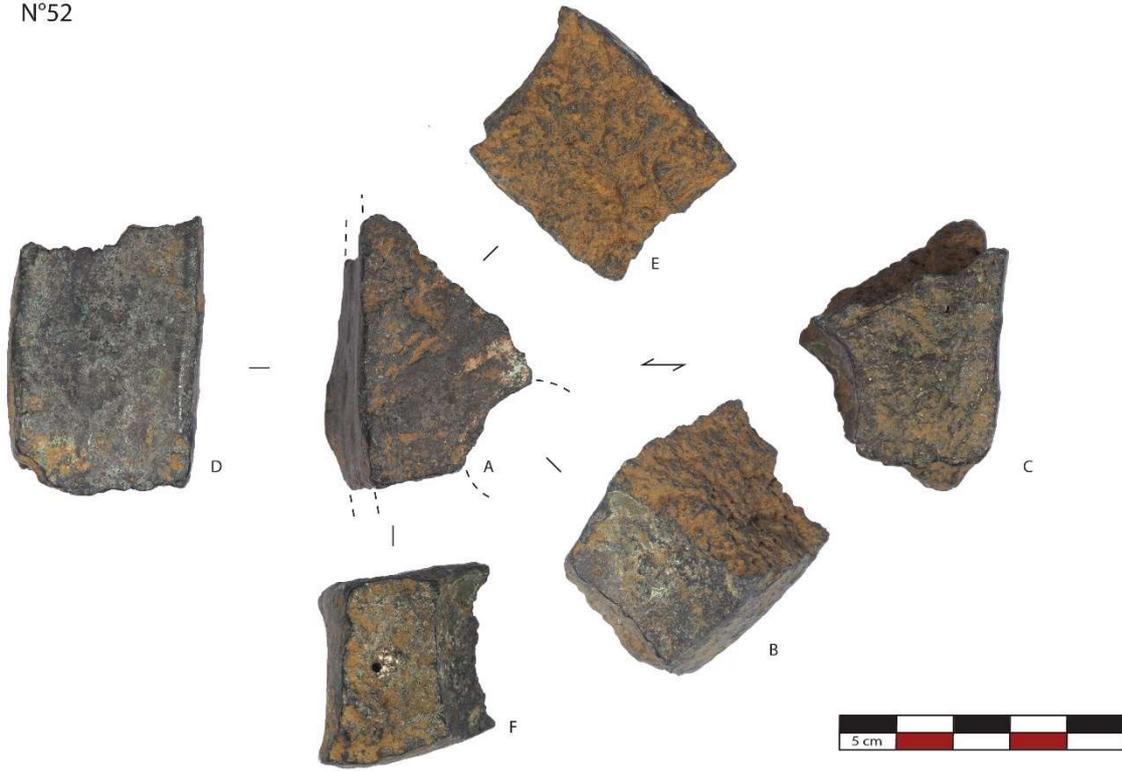
N°50



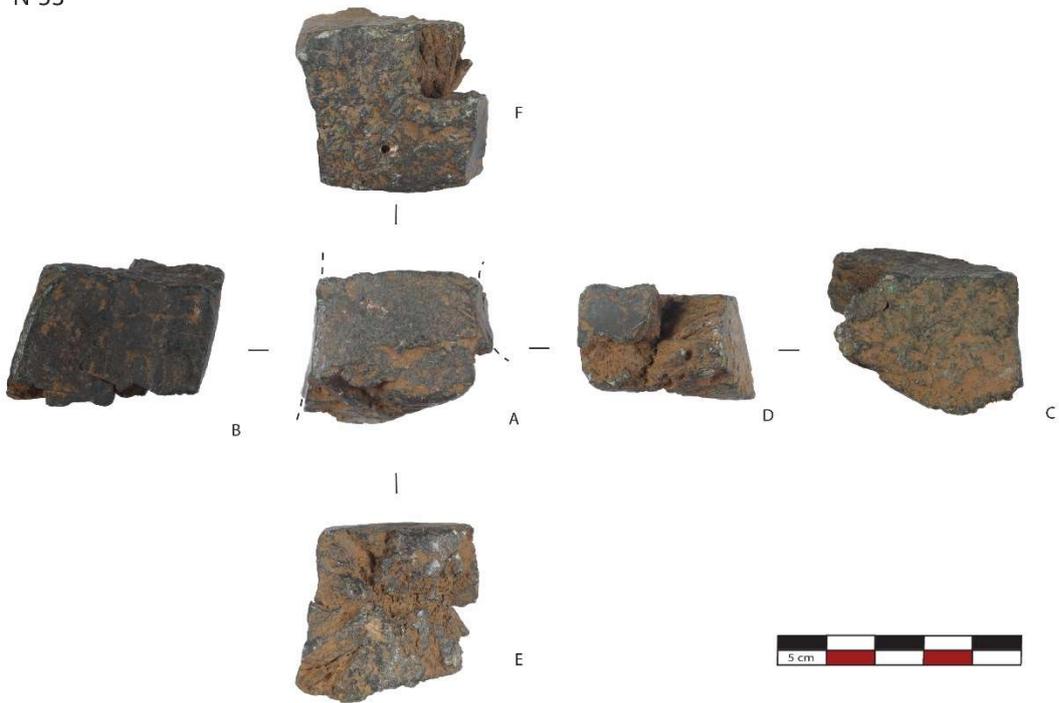
N°51



N°52



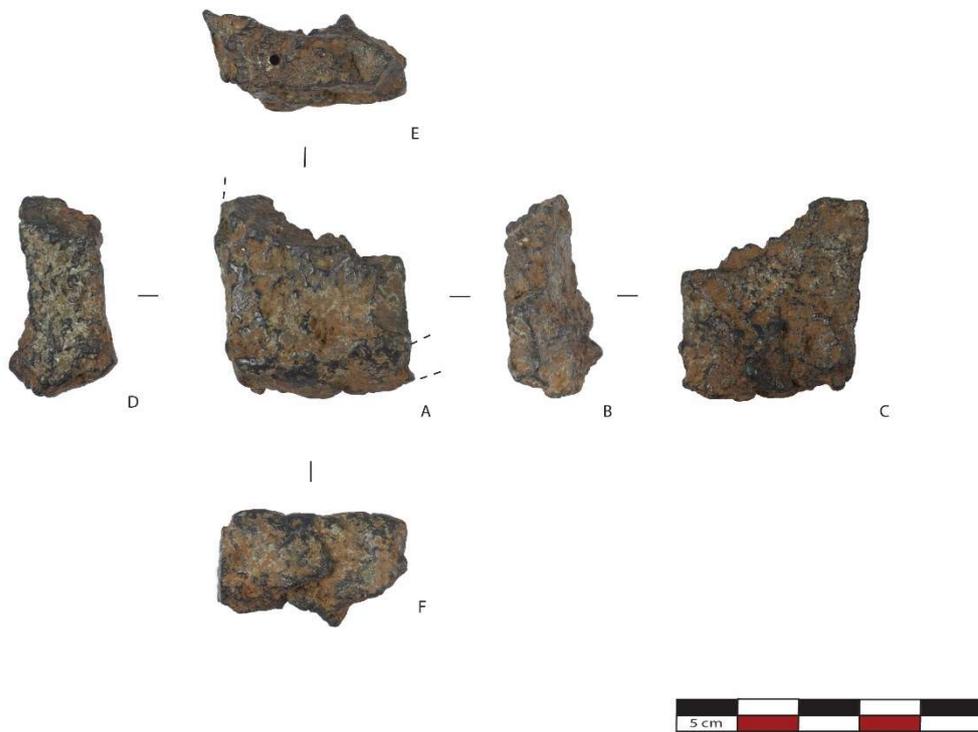
N°53



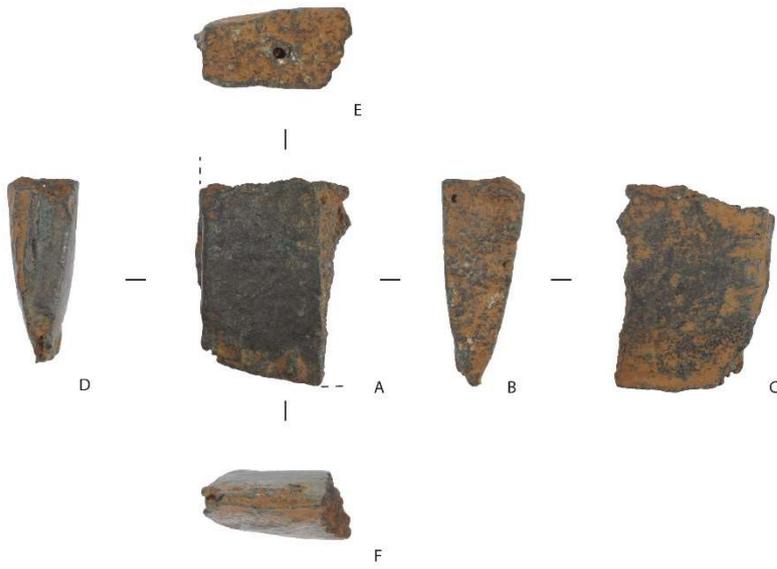
N°54



N°55



N°56



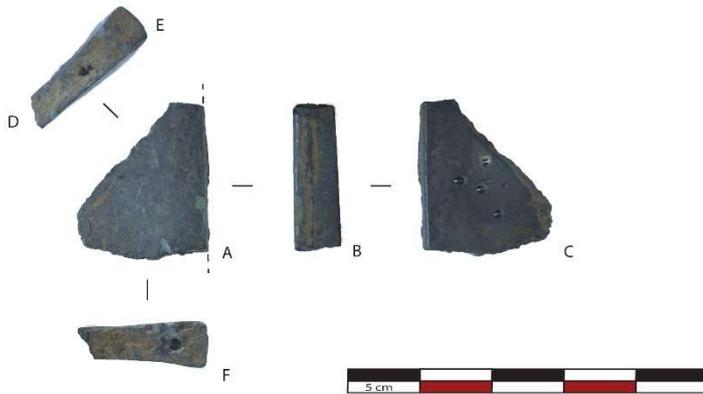
N°58



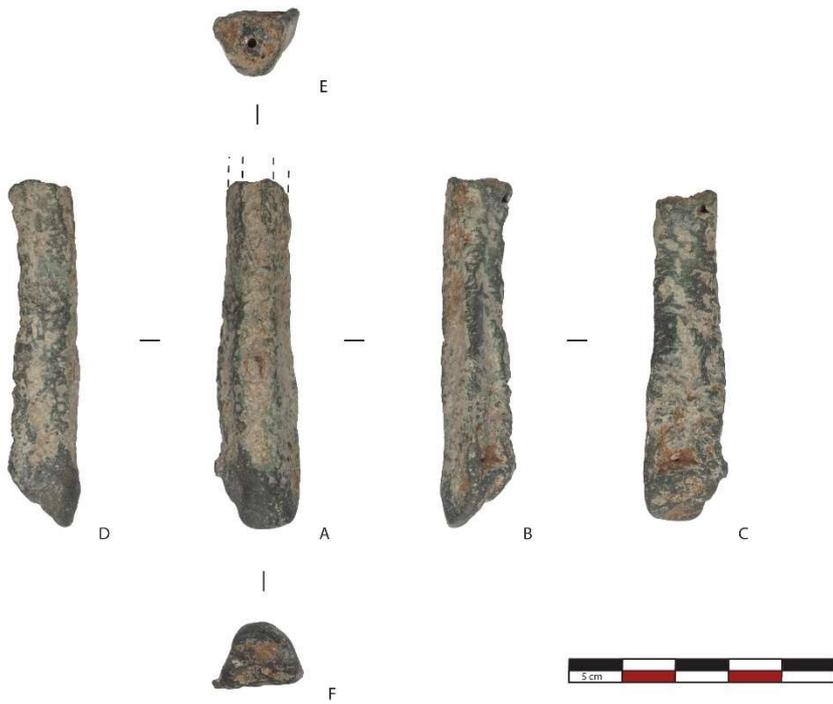
N°59



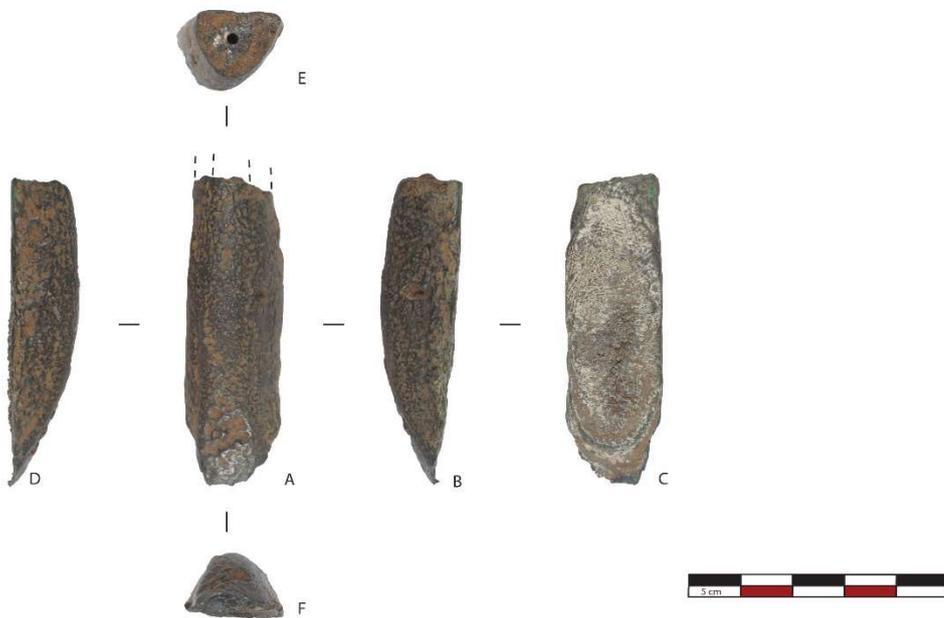
N°60



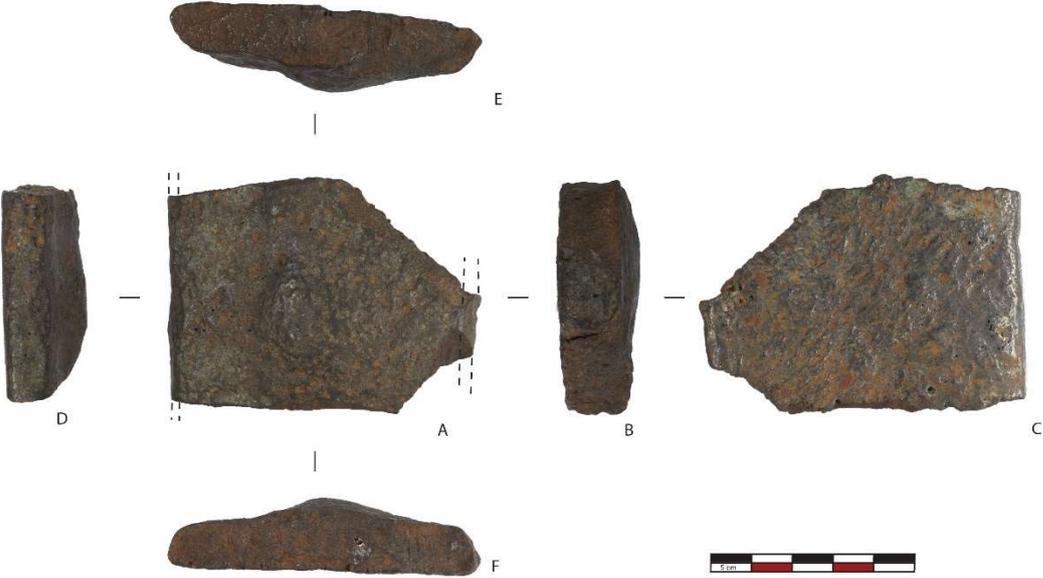
N°61



N°62



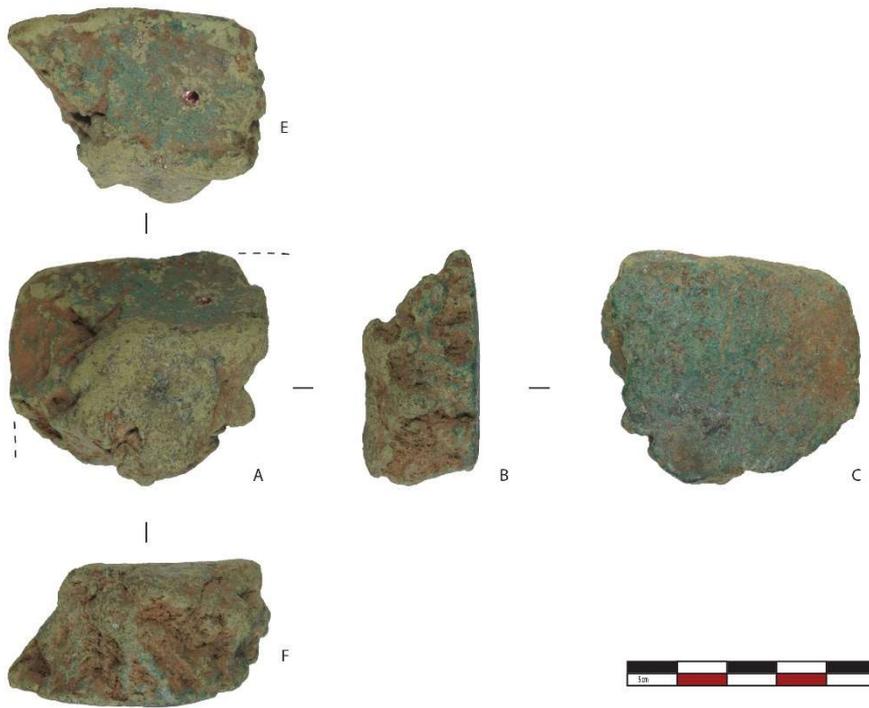
N° 63



N° 64



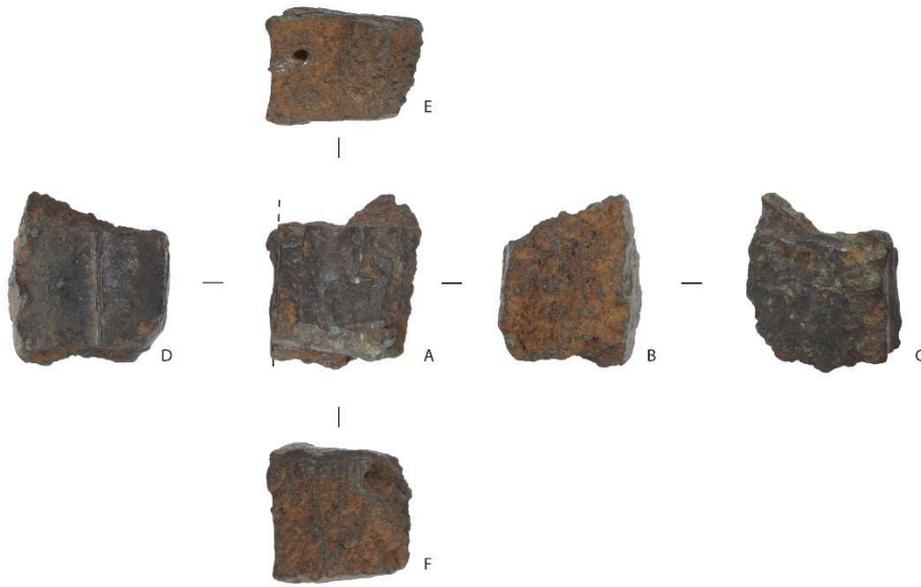
N° 65



N°66



N°67



5 cm

N°68



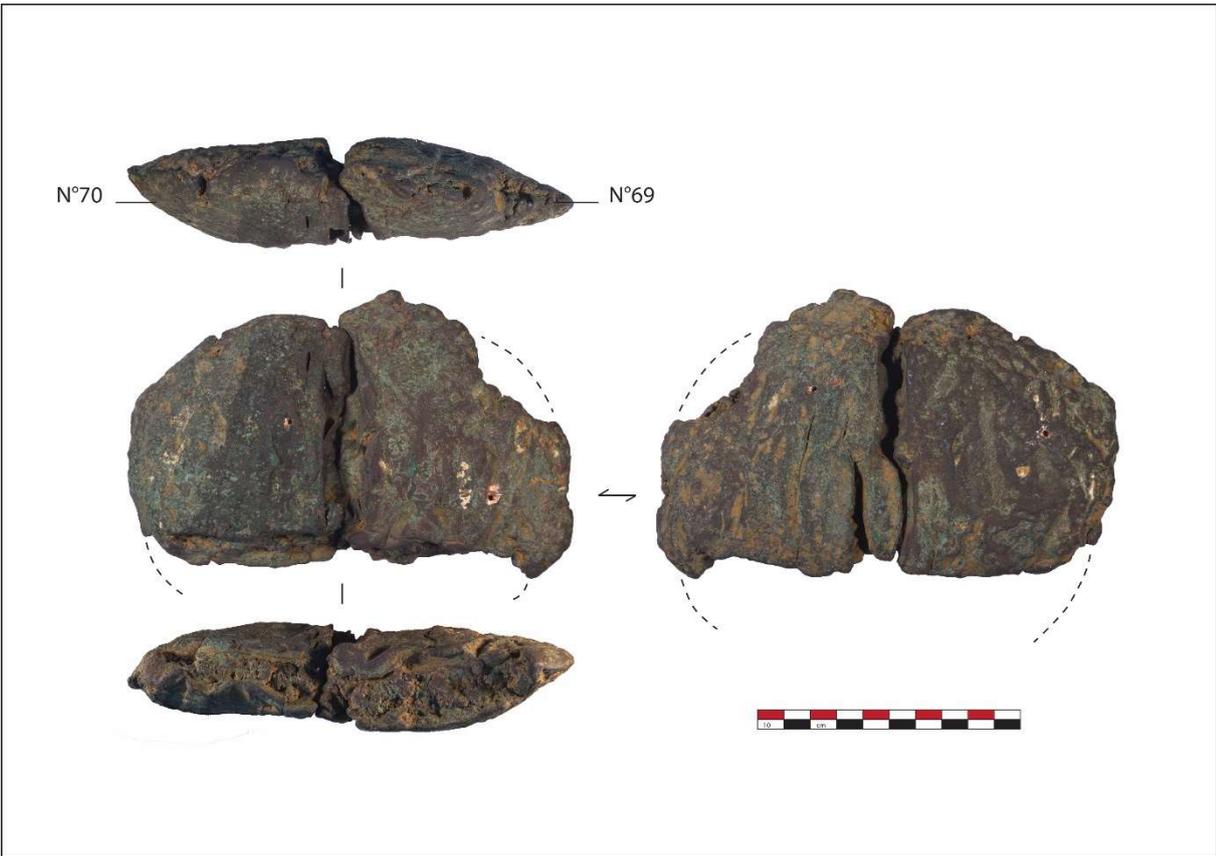
5 cm

N° 69



N°70

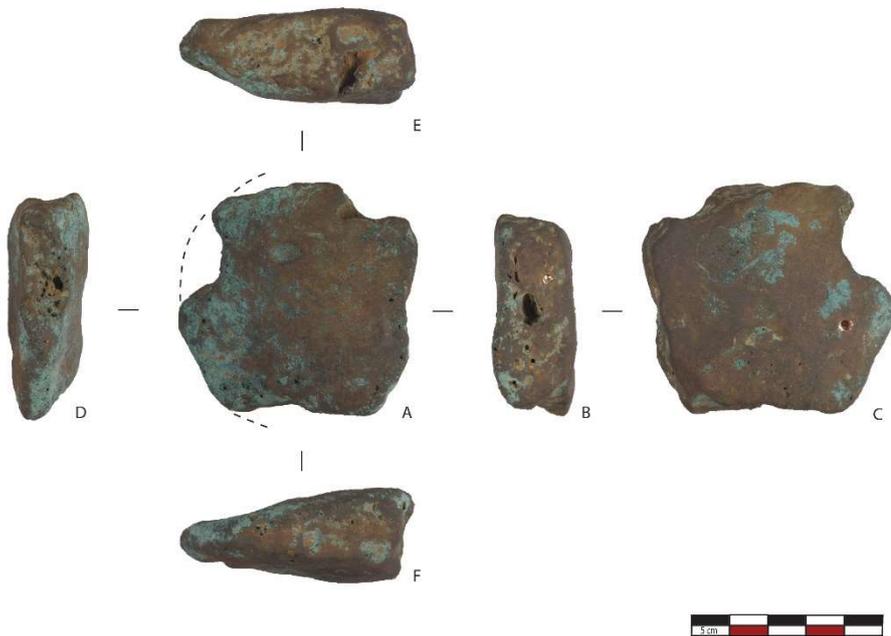




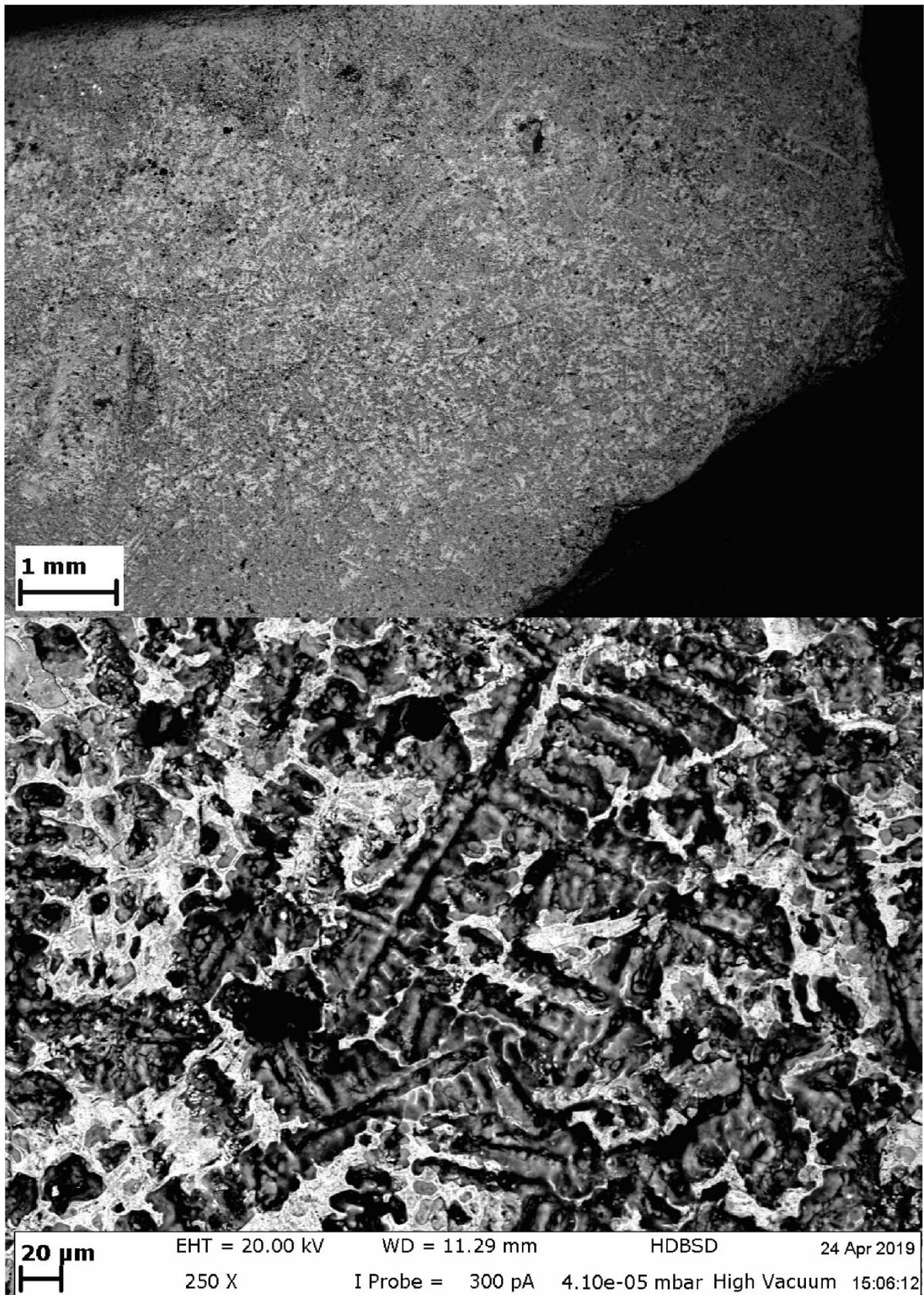
N° 72



N° 73



## B. Microscopie : observation des surfaces



*Figure B127 Structures dendritiques, surface du n°60, image MEB L. Robbiola et G.Meynieux*

## C. Composition chimique élémentaire

Tableau C4 Résultat analyses chimiques élémentaires (ACP-AES) du dépôt de Saint-Sulpice (éléments du corpus en orange), valeurs en % massique

Catégorie	N°	Cu	Pb	Sn	Ag	As	Bi	Co	Fe	Ni	Sb	Zn
Bracelet	1	90,36	0,55	6,42	0,34	0,36	0,05	0,08	0,88	0,18	0,73	0,04
Bracelet	3	90,52	0,25	8,64	0,09	0,11	0,04	0,05	0,06	0,08	0,13	0,04
épée	5	88,97	0,86	8,50	0,34	0,38	0,05	0,02	0,01	0,13	0,69	0,05
épée	6	89,76	0,75	8,03	0,24	0,33	0,05	0,02	0,02	0,13	0,64	0,04
épée	7	70,27	10,70	18,13	0,12	0,34	0,05	0,12	0,02	0,02	0,19	0,03
épée	8	84,98	4,83	9,17	0,12	0,25	0,06	0,01	0,02	0,10	0,44	0,03
épée	9	83,73	5,31	9,76	0,27	0,26	0,06	0,01	0,01	0,10	0,46	0,03
épée	10	79,02	7,70	11,34	0,08	1,03	0,10	0,11	0,01	0,10	0,47	0,04
épée	11	87,59	0,59	4,74	0,12	0,96	0,07	0,50	0,81	4,07	0,46	0,10
épée	12	88,67	0,52	8,23	0,37	1,12	0,08	0,11	0,02	0,10	0,73	0,05
bouterolle	14	83,86	0,19	15,48	0,05	0,21	0,03	0,00	0,01	0,05	0,09	0,04
bouterolle	15	83,09	4,83	8,84	0,61	0,67	0,08	0,01	0,02	0,15	1,67	0,03
lance	16	87,03	3,83	7,03	0,17	0,73	0,05	0,03	0,02	0,37	0,73	0,03
lance	17	84,91	3,72	10,36	0,23	0,19	0,05	0,03	0,02	0,08	0,37	0,04
vaisselle	18	91,33	0,55	6,90	0,11	0,20	0,09	0,03	0,06	0,27	0,37	0,10
vaisselle	19	83,79	1,18	12,46	0,24	1,03	0,05	0,01	0,02	0,20	1,01	0,03
faucille	20	89,29	0,73	8,21	0,20	0,42	0,08	0,02	0,04	0,24	0,69	0,09
herminette à douille	21	85,68	0,44	11,25	0,13	0,28	0,07	0,24	0,67	0,75	0,42	0,08
hache/herminette	22	87,80	2,03	7,77	0,18	0,88	0,35	0,11	0,04	0,29	0,50	0,05
hache à talon	23	85,84	3,59	8,77	0,21	0,40	0,09	0,01	0,03	0,30	0,66	0,08
hache à talon	24	74,30	5,08	19,43	0,14	0,31	0,08	0,01	0,01	0,09	0,47	0,07
hache à talon	25	88,64	0,29	7,64	0,61	1,23	0,12	0,00	0,01	0,05	1,34	0,08
hache à talon	26	84,72	0,17	14,71	0,01	0,11	0,06	0,12	0,01	0,02	0,04	0,05
hache à talon	27	86,47	0,01	12,35	0,07	0,28	0,14	0,00	0,02	0,02	0,55	0,08
hache à talon	28	87,97	1,15	7,30	0,46	1,53	0,08	0,11	0,17	0,31	0,85	0,05
hache à talon	29	71,94	17,12	10,64	0,01	0,04	0,05	0,11	0,01	0,02	0,03	0,04
hache à talon	30	64,97	22,25	12,54	0,01	0,04	0,06	0,00	0,01	0,01	0,10	0,02
hache à aileron	31 b	83,69	3,20	9,91	0,39	1,38	0,08	0,12	0,16	0,35	0,68	0,05
hache à aileron	31a	84,38	3,07	10,23	0,17	0,43	0,08	0,10	0,24	0,61	0,58	0,08
hache à aileron	32	84,43	1,07	12,28	0,27	1,07	0,07	0,11	0,02	0,13	0,49	0,05
hache à aileron	33 b	89,96	0,44	7,52	0,11	0,85	0,07	0,11	0,08	0,37	0,46	0,05
hache à aileron	33a	90,00	0,45	7,71	0,12	0,29	0,08	0,09	0,07	0,68	0,42	0,09
hache à aileron	34 b	90,59	0,38	6,77	0,16	0,88	0,07	0,12	0,02	0,33	0,62	0,05
hache à aileron	34a	91,41	0,34	6,64	0,39	0,25	0,05	0,04	0,02	0,25	0,57	0,04
hache à aileron	35	86,20	2,17	9,47	0,16	0,67	0,05	0,04	0,09	0,26	0,87	0,03
hache à aileron	36	87,28	2,92	8,17	0,14	0,25	0,08	0,12	0,24	0,33	0,37	0,09
hache à aileron	37	91,92	0,44	5,64	0,44	0,37	0,05	0,03	0,16	0,18	0,72	0,05
hache à aileron	38	90,54	0,43	7,63	0,30	0,28	0,05	0,01	0,01	0,13	0,58	0,04
hache à aileron	39	89,79	0,82	6,14	0,31	1,23	0,06	0,04	0,14	0,26	1,17	0,03
hache à aileron	40	86,81	1,68	9,33	0,17	0,35	0,08	0,11	0,38	0,33	0,53	0,22
hache à aileron	41	91,16	0,62	6,65	0,21	0,25	0,05	0,07	0,16	0,24	0,51	0,09
bélière	42	85,39	0,95	12,71	0,09	0,34	0,05	0,00	0,04	0,06	0,34	0,03
Bipenne	43	84,41	0,01	13,22	0,00	0,04	0,05	0,11	1,09	1,01	0,01	0,05
Bipenne	44a	87,35	0,62	9,90	0,06	0,11	0,10	0,05	1,15	0,03	0,28	0,35
Bipenne	44b	88,77	0,51	8,53	0,06	0,09	0,09	0,05	1,27	0,03	0,24	0,35
Bipenne	45a	78,96	0,01	12,10	0,01	0,01	0,05	0,30	7,94	0,55	0,00	0,07
Bipenne	45b	81,81	0,01	12,57	0,01	0,01	0,05	0,19	4,77	0,49	0,00	0,07
Bipenne	46	85,60	1,60	11,74	0,13	0,12	0,07	0,12	0,31	0,02	0,05	0,22

Bipenne	47	81,63	0,01	0,32	0,00	8,68	0,05	0,11	2,90	6,20	0,03	0,06
Bipenne	48	88,48	0,42	8,98	0,04	0,05	0,06	0,03	1,64	0,04	0,05	0,21
Bipenne	49	78,14	0,01	11,52	0,01	0,35	0,05	1,47	6,95	1,41	0,02	0,08
Bipenne	50	85,77	0,28	12,47	0,01	0,01	0,04	0,06	1,24	0,07	0,00	0,05
Bipenne	51	84,93	0,02	11,15	0,01	0,01	0,04	0,12	3,27	0,38	0,00	0,08
Bipenne	52	84,21	2,96	10,34	0,32	0,07	0,06	0,02	0,95	0,03	0,41	0,64
Bipenne	53	87,84	0,63	9,63	0,13	0,01	0,07	0,13	1,24	0,01	0,03	0,28
Bipenne	54	87,91	0,77	9,71	0,07	0,02	0,06	0,12	1,04	0,01	0,03	0,26
Bipenne	55	83,72	0,01	13,05	0,01	0,01	0,05	0,19	1,49	1,40	0,00	0,07
hache lingot	56	85,92	0,06	13,47	0,01	0,25	0,10	0,00	0,05	0,01	0,10	0,03
hache	57	81,65	0,03	18,15	0,00	0,04	0,04	0,00	0,01	0,01	0,02	0,04
hache lingot	58	87,75	0,04	11,87	0,01	0,11	0,06	0,00	0,01	0,05	0,00	0,08
hache lingot fin	59	77,39	0,01	22,14	0,00	0,22	0,05	0,11	0,01	0,01	0,01	0,04
hache lingot	60	85,42	0,02	14,34	0,02	0,04	0,05	0,00	0,03	0,01	0,01	0,07
lingot barre	61	61,59	32,33	5,76	0,01	0,10	0,04	0,12	0,01	0,01	0,01	0,03
lingot barre	62	68,06	20,06	11,69	0,01	0,05	0,04	0,00	0,01	0,01	0,01	0,06
lingot plat à bord droit	63	82,87	0,07	13,27	0,01	0,06	0,05	0,11	2,41	1,08	0,00	0,06
lingot plat	64	84,09	0,03	9,66	0,01	0,14	0,04	0,73	4,75	0,50	0,01	0,04
lingot sub-carré	65	95,87	0,68	0,10	0,07	0,10	0,09	0,04	1,59	0,05	1,04	0,36
lingot plat	66	81,05	0,05	18,54	0,01	0,10	0,04	0,00	0,02	0,06	0,11	0,03
lingot plat	67	82,68	0,07	16,83	0,09	0,06	0,08	0,00	0,02	0,03	0,11	0,04
Plano-convexe	68	89,07	0,01	0,07	0,02	0,49	0,06	1,04	8,57	0,59	0,00	0,08
Biconvexe	69a	99,32	0,02	0,01	0,01	0,04	0,04	0,05	0,42	0,05	0,00	0,04
Biconvexe	69b	99,26	0,02	0,00	0,01	0,04	0,04	0,05	0,48	0,05	0,00	0,04
Biconvexe	70 b	99,41	0,01	0,00	0,01	0,02	0,06	0,12	0,26	0,04	0,01	0,06
Biconvexe	70a	99,11	0,01	0,07	0,02	0,04	0,06	0,07	0,47	0,05	0,00	0,09
Biconvexe	71 a	98,46	0,02	0,07	0,02	0,94	0,06	0,12	0,09	0,01	0,16	0,06
Biconvexe	71b	99,05	0,02	0,07	0,02	0,35	0,07	0,00	0,16	0,01	0,16	0,09
Plano-convexe	72	95,05	0,49	0,05	0,10	0,04	0,06	0,12	3,51	0,00	0,17	0,41
Plano-convexe	73	90,68	0,12	0,00	1,39	5,69	0,10	0,11	0,01	0,62	1,24	0,05
masselotte	74	78,94	6,20	14,04	0,02	0,21	0,05	0,01	0,01	0,09	0,40	0,04
masselotte	75	88,69	0,83	6,63	0,31	0,52	0,04	0,19	0,04	2,37	0,34	0,05

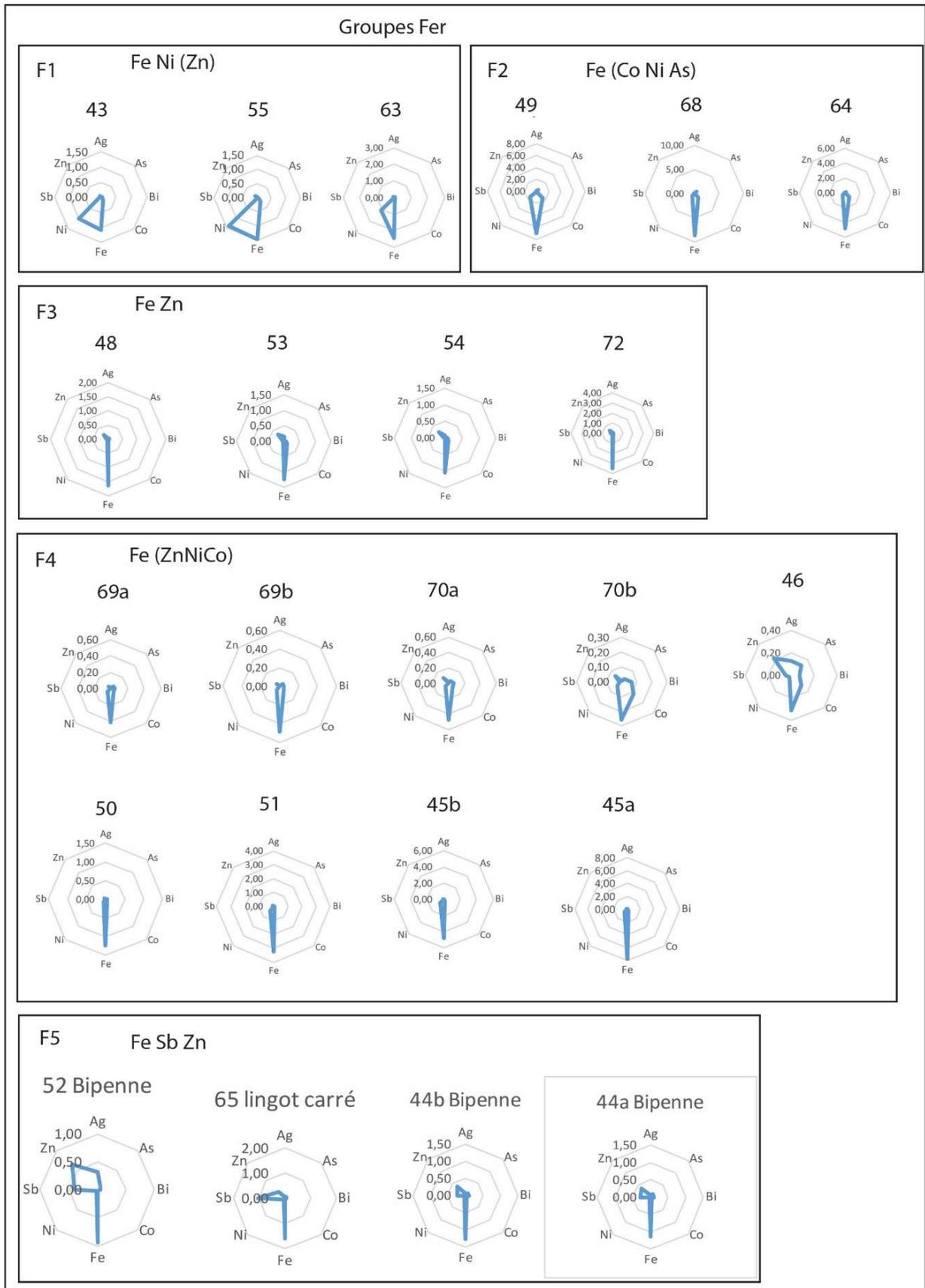


Figure C2 Groupes fer

## Groupes arsenics

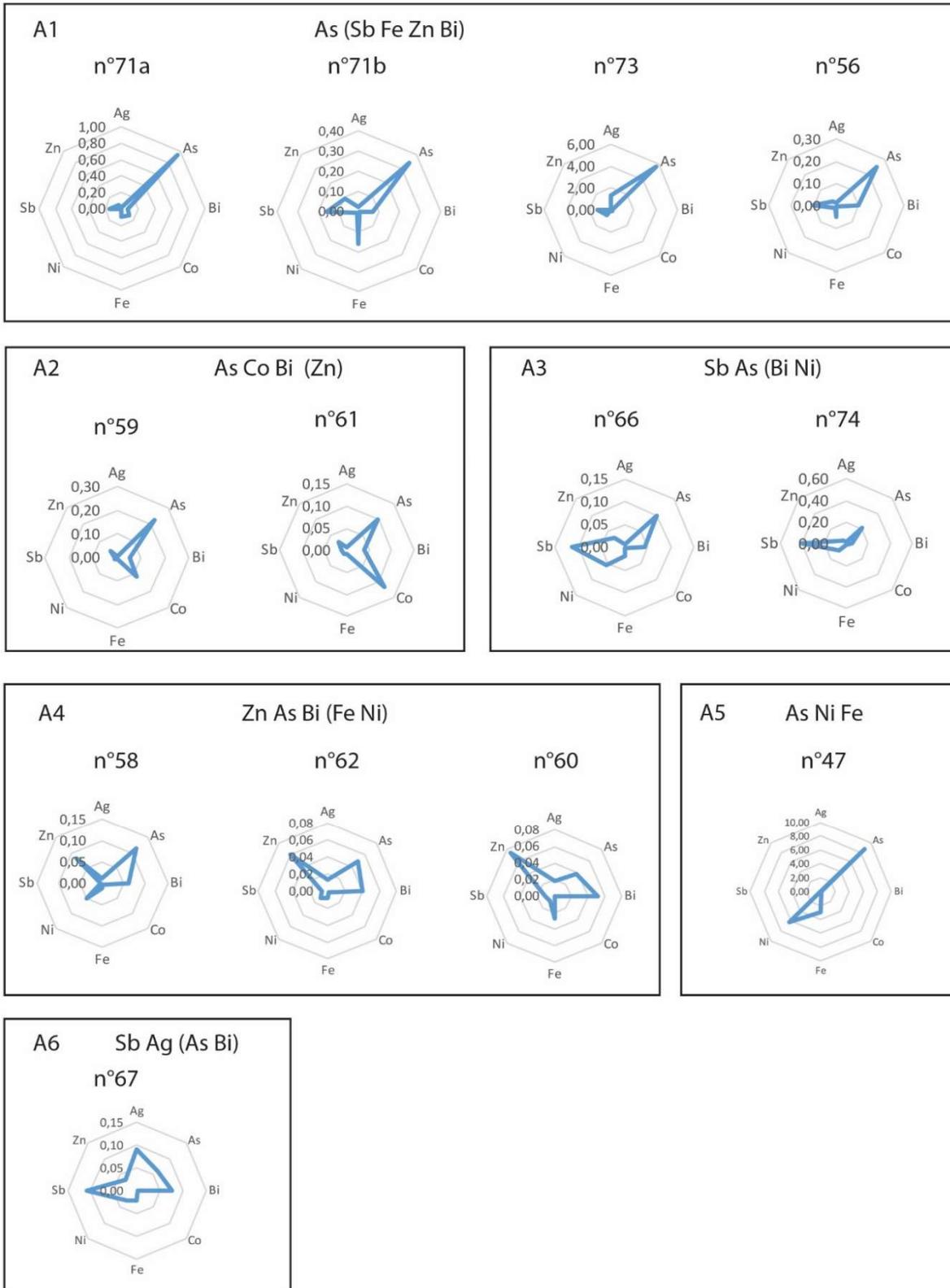


Figure C3 Groupes arsenic

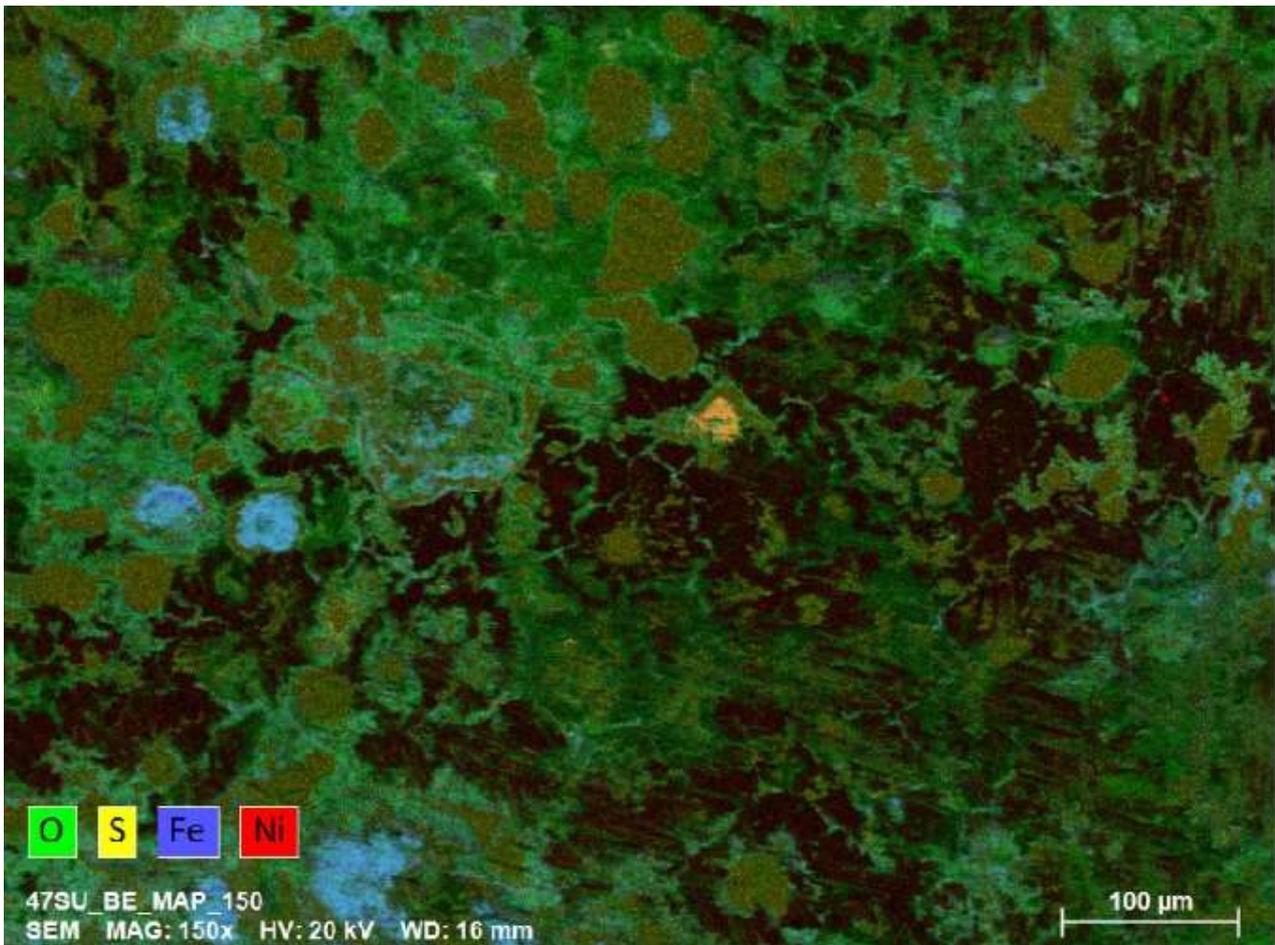


Figure C4 cartographie élémentaire MEB/EDX, surface du n°47, pour le soufre, l'oxygène, le fer et le nickel

#### D. Masse volumique et porosité

Tableau D5 Mesures d'étalonnage de la balance Sartorius Quintix 2102i-1s et du kit de densité YDK04

Nom	Masse air (g)	Masse eau (g)	Densité mesurée (g/cm <sup>3</sup> )	Densité théorique (g/cm <sup>3</sup> )
Echantillon I (%m.) CuSn3Zn9Pb1	79,49	70,50	8,82	8.80
Coub Cu9	851,31	754,02	8,73	8.79 (+-0.02)
Coub 2	964,73	854,91	8,77	
Argent	50,27	45,50	10,50	
Tube en cuivre	35,87	31,84	8,88	8.93

Tableau D6 Vérification des mesures sur plusieurs équipements

Nom	Masse air (g)	Masse eau (g)	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	équipement
N°59	46,27	40,70	8,29	Balance Sartorius Quintix 2102i-1s + kit densité YDK04
N°59	46,2715	40,710	8.293	Balance Mettler Toledo ML304T et kit densité DNY43

N°59	46.269	40.692	8.280	Balance Sartorius Secura 1103i-1S + kit densité YDK04
------	--------	--------	-------	---

Tableau D7 Tableau des références d'alliages industriels (d'après www.matweb.com)

Nom de l'alliage	Composition (% m) Cu-Sn-Pb			Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Références
High-Leaded Tin Bronze, UNS C93600, Continuous Cast M07	79-83	6.0-8.0	11-13	9.00	<a href="http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9133b28071da4d0d9af55b4b01c65e1c&amp;ckck=1">http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9133b28071da4d0d9af55b4b01c65e1c&amp;ckck=1</a>
High-Leaded Tin Bronze, UNS C93700, Copper Casting Alloy (SAE 64)	78-82	9.0-11	8.0-11	9.25	<a href="http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=bded3b18c54e41ea81b04f5c7d8241a3">http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=bded3b18c54e41ea81b04f5c7d8241a3</a>
High-Leaded Tin Bronze, UNS C93800, Copper Casting Alloy, Sand-Cast	75-79	6.3-7.5	13-16	9.25	<a href="http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=bded3b18c54e41ea81b04f5c7d8241a3">http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=bded3b18c54e41ea81b04f5c7d8241a3</a>
UNS C94000, Copper Casting Alloy	70.5	13	15	9.06	<a href="http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=638f1ded048b456ab9a3fe5b0a72105c">http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=638f1ded048b456ab9a3fe5b0a72105c</a>
High-Leaded Tin Bronze, UNS C93900, Copper Casting Alloy	76.5-79.5	5.0-7.0	14-18	9.25	<a href="http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3f6fb06aa975447b8d30f0f411a41b97">http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=3f6fb06aa975447b8d30f0f411a41b97</a>
High-Leaded Tin Bronze, UNS C94300, Copper Casting Alloy	68.5-73.5	4.5-6.0	22-25	9.29	<a href="http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=60df37d9942a469e868c6bc6f5f7b320">http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=60df37d9942a469e868c6bc6f5f7b320</a>
Medium Bronze, UNS C94500, Copper Casting Alloy	73	6.0-8.0	16-22	9.40	<a href="http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=46c3b2a827c54170ab24aebc0fa7de53&amp;ckck=1">http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=46c3b2a827c54170ab24aebc0fa7de53&amp;ckck=1</a>
Ampco Metal AMPCOLOY® 30 Leaded Bronze, Continuous Cast	75-79	7.0-9.0	13-17	9.10	<a href="http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=c92cef656a7a436aa5f79de40a5d03cf">http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=c92cef656a7a436aa5f79de40a5d03cf</a>
Ampco Metal AMPCOLOY® 32 Tin leaded Bronze, Continuous Cast	78-82	9.0-11	8.011	9.00	<a href="http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=c0be4dd7bd80459391a7ac6190dd65d2">http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=c0be4dd7bd80459391a7ac6190dd65d2</a>
UNS C92800, Copper Casting Alloy	79	16	5.0	8.81	<a href="http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=c925a4b103704b66b0d48b3194e37aea">http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=c925a4b103704b66b0d48b3194e37aea</a>
MetalTek MTEK 80-10-10 Cast UNS C93700 Bearing Bronze	80	10	10	8.95	<a href="http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=313c56918fca4d5999f288685609e872">http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=313c56918fca4d5999f288685609e872</a>

Tableau D8 Résultats des mesures de la masse volumique, calculs du taux de porosité et choix de la valeur théorique

N°	Sn (%m)	Pb (%m)	%Imp	masse air	masse eau	T° eau	densité (g/cm <sup>3</sup> )	Porosité (%)	Valeur Théorique (matweb)	équipement
66	18,54	0,05	0,4	124,56	110,14	20°C	8,62	2,0	8,8	Sartorius IDKOA
40	9,33	1,68	2,2	104,76	92,4	20°C	8,46	3,8	8,8	Sartorius IDKOA
63	13,27	0,07	3,9	343,17	302,6	20°C	8,44	4,0	8,8	Sartorius IDKOA
49	11,52	0,01	10,3	320,42	282,39	20°C	8,41	4,4	8,8	Sartorius IDKOA
45	12,1	0,01	8,9	925,96	815,91	20°C	8,40	4,6	8,8	Sartorius IDKOA
39	6,14	0,82	4,1	120,23	105,81	20°C	8,33	5,3	8,8	Sartorius IDKOA
72	0,05	0,49	5,0	411,4	362,67	20°C	8,42	5,3	8,9	Sartorius IDKOA
59	22,14	0,03	6,3	46,27	40,7	20°C	8,29	5,8	8,8	Sartorius IDKOA
64	9,66	0,01	0,5	43,07	37,89	21°C	8,29	5,8	8,8	Sartorius IDKOA
43	13,22	0,01	2,4	255,22	224,77	20°C	8,28	5,9	8,8	Sartorius IDKOA
48	8,98	0,42	2,5	394,51	346,92	20°C	8,27	5,9	8,8	Sartorius IDKOA
51	11,15	0,02	3,9	253,57	222,96	20°C	8,27	6,0	8,8	Sartorius IDKOA
44	8,53	0,62	2,7	708,72	622,97	20°C	8,25	6,2	8,8	Sartorius IDKOA
67	16,83	0,07	0,5	37,92	33,34	20°C	8,25	6,3	8,8	Sartorius IDKOA
70	0,07	0,01	0,9	1391,81	1224,97	21°C	8,33	6,4	8,9	Sartorius IDKOA

65	0,1	0,68	4,7	260,87	229,46	20°C	8,29	6,8	8,9	Sartorius IDKOA
50	12,47	0,28	1,8	336,6	295,51	20°C	8,18	7,0	8,8	Sartorius IDKOA
33	7,71	0,45	2,3	181,66	159,47	20°C	8,17	7,1	8,8	Sartorius IDKOA
69	0,01	0,02	0,7	1371,62	1205,87	21°C	8,26	7,2	8,9	Sartorius IDKOA
56	5,76	0,06	0,6	40,21	35,29	21°C	8,16	7,2	8,8	Sartorius IDKOA
68	0,07	0,01	11,7	381,86	335,61	20°C	8,24	7,4	8,9	Sartorius IDKOA
52	10,34	2,96	2,5	159,37	139,97	20°C	8,14	7,4	8,8	Sartorius IDKOA
53	9,63	0,63	2,5	199,73	175,25	20°C	8,14	7,5	8,8	Sartorius IDKOA
62	11,69	20,06	0,2	59,86	52,72	21°C	8,38	7,9	9,1	Sartorius IDKOA
54	9,71	0,77	2,4	164,19	143,74	20°C	8,01	8,9	8,8	Sartorius IDKOA
47	0,32	0,01	18,3	1428,14	1252,24	21°C	8,10	8,9	8,9	Sartorius IDKOA
46	11,74	1,60	1,1	556,17	486,4	20°C	7,96	9,6	8,8	Sartorius IDKOA
60	14,34	0,02	0,2	9,88	8,64	21°C	7,95	9,6	8,8	Sartorius IDKOA
55	13,05	0,01	3,2	55,84	48,82	20°C	7,94	9,8	8,8	Sartorius IDKOA
61	13,47	32,33	0,3	44,03	38,84	21°C	8,39	9,8	9,3	Sartorius IDKOA
74	14,04	6,20	0,8	16,69	14,56	21°C	7,82	11,1	8,8	Sartorius IDKOA
71	0,07	0,02	1,6	824,32	719,4	21°C	7,84	11,9	8,9	Sartorius IDKOA
42	12,71	0,95	1,9	14,7	12,77	21°C	7,64	13,2	8,8	Sartorius IDKOA
34	6,77	0,34	1,9	196,25	170,04	20°C	7,47	15,1	8,8	Sartorius IDKOA
58	11,87	0,04	0,4	63,77	55,19	20°C	7,41	15,8	8,8	Sartorius IDKOA
75	6,63	0,83	4,7	25,1	21,72	21°C	7,41	15,8	8,8	Sartorius IDKOA
73	0,00	0,12	9,3	306,02	264,94	21°C	7,436	16,4	8,9	Sartorius IDKOA

- Causes de la porosité

Le taux de porosité est à mettre principalement en lien avec la technique de coulée, la composition du métal, et la gestion ou préparation du moule. Il existe trois types de défaut de porosité en fonderie. Les macro-retassures sont des défauts de contraction du métal lors de sa solidification. Le masselotage est une technique permettant de les réduire en prévoyant un volume supplémentaire de métal, qui, en refroidissant en dernier, absorbe le retrait du métal (Dour 2004).

Les micro-retassures résultent de l'emprisonnement de liquide lors de l'avancée du front de solidification. Selon le même principe, les soufflures résultent de l'enfermement de gaz (Dour 2004).

Ces deux derniers phénomènes indésirables sont reliés en premier lieu à la fluidité du métal en fusion. Plus celui-ci est fluide est moins il a de chance d'avoir ces porosités. Ce paramètre dépend de la composition. Un bronze à étain est plus fluide que du cuivre. Mais l'opération de coulée en elle-même est cruciale. Si le métal liquide est trop agité, il peu incorporer de l'air et donc créer par la suite des microporosités (Dour 2004).

- Graphiques :

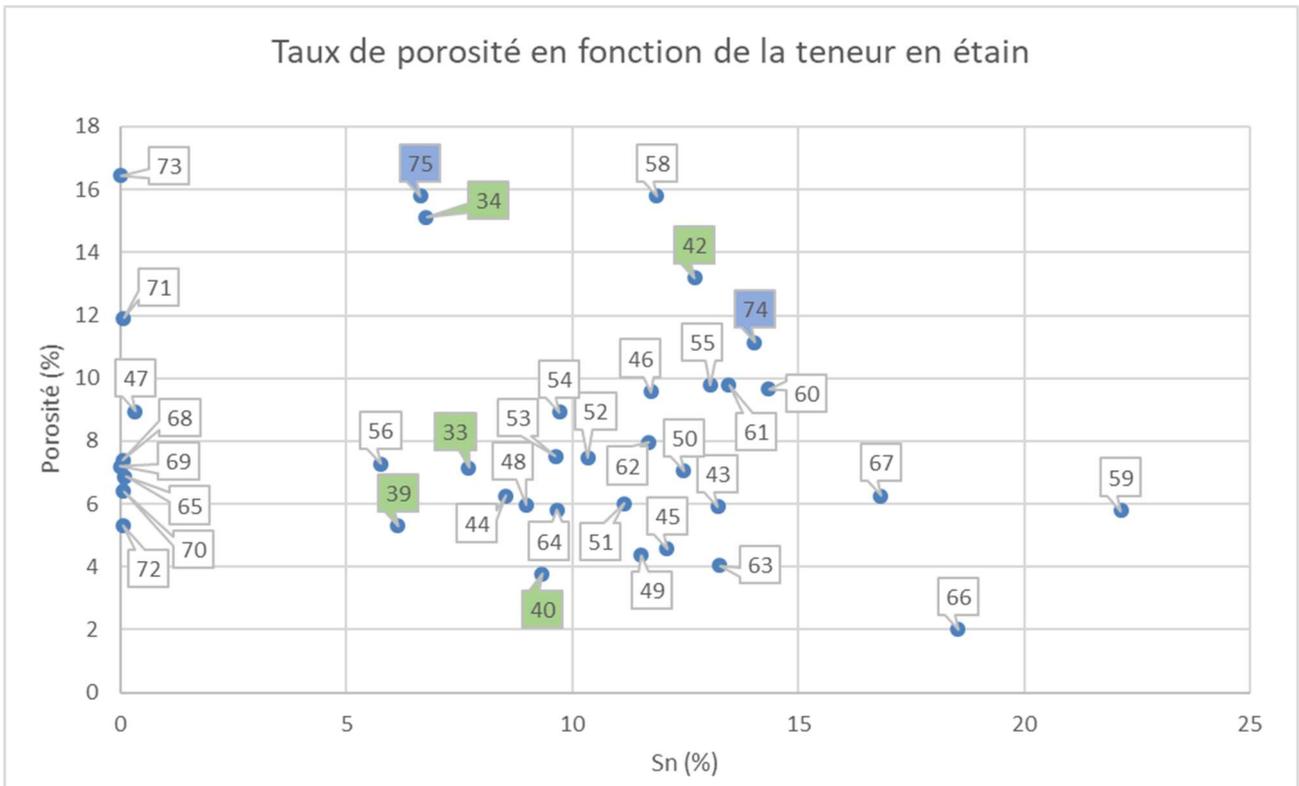


Figure D5 Le taux de porosité en fonction de la teneur en étain

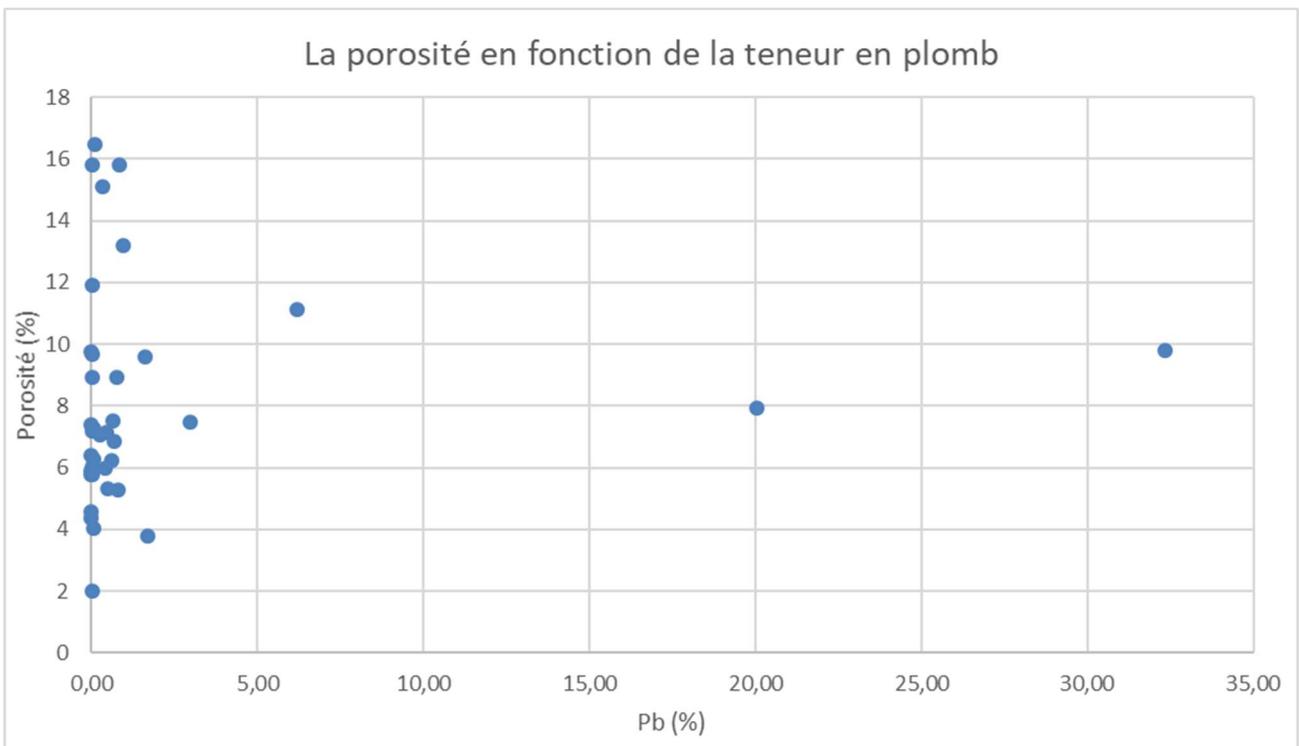


Figure D6 La porosité en fonction de la teneur en plomb

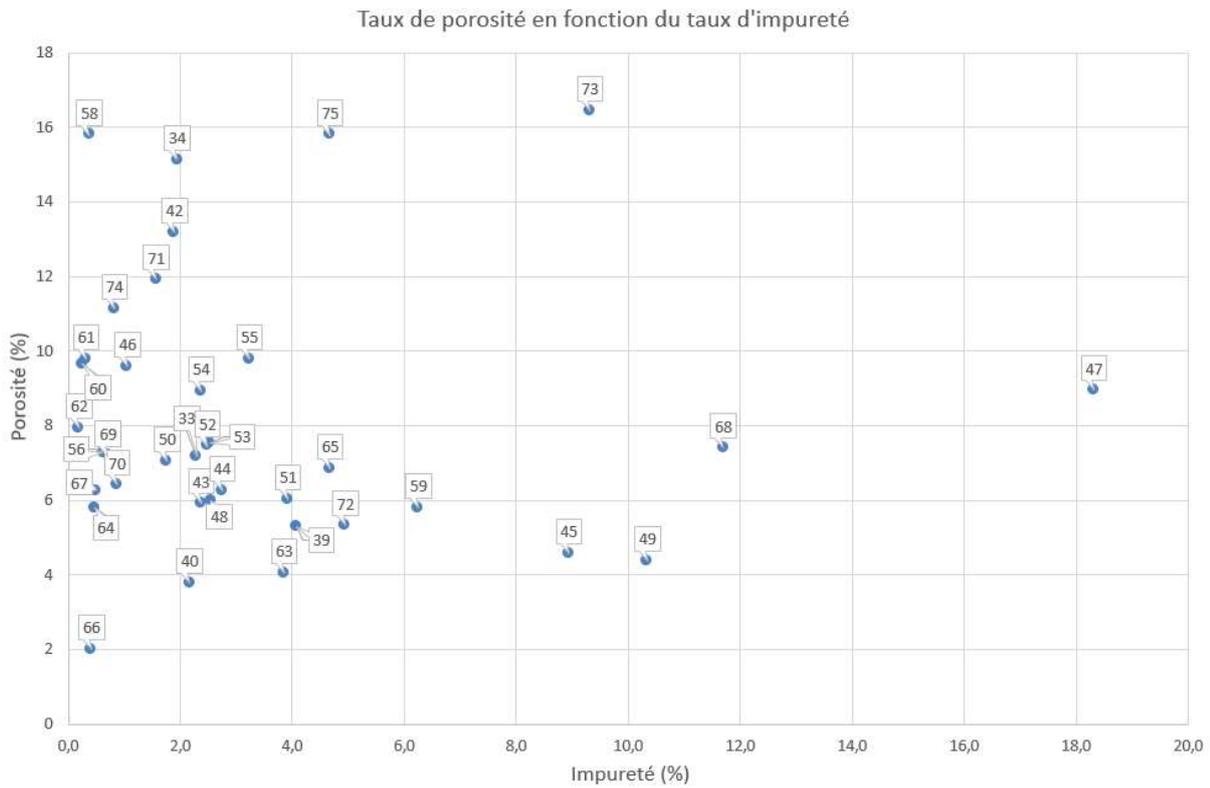


Figure D7 Le taux de porosité en fonction du taux d'impureté

## E. Dureté

Tableau E9 Valeurs HV mesurées sur les objets du dépôt de Saint Sulpice, et sur des valeurs standards (charge P=1 kgf). Valeur moyenne et écart type (L. Robbiola).

Objet n°	Dureté	Valeur / (nbre mesures)		Standards	Dureté (HV)	
45 extrémité	HV1	221 ( ?+corrosion)	(1)	Cuivre brut de coulée	50	± 8 (ref)
45 bord latéral	HV1	Surface trop corrodée	Empreintes non exploitables			
46 extrémité	HV1	Surface trop corrodée	Empreintes non exploitables	Cuivre écroui	100	
46 bord latéral	HV1	Surface trop corrodée	Empreintes non exploitables			
47	HV1	127	± 8 (7)	Bronze Cu13Sn recuit KT	115 (105 HV0.1)	(1)
48 extrémité	HV1	99/106	(2)	Cu22Sn LA biphase	245/273 (186 HV0.1)	(2)

48 bord latéral	HV1	81/88	(2)			
49	HV1	184	± 9 (4)			
58 près cassure	HV1	104/118/214/229 (?)	(4)			
60	HRC 150	73/78/81/71 (~ >700 HV)	(4) dont (1) sans corrosion			
66	HV1	132	± 8 (7)			
73	HV1	104	± 14 (6)			

## F. Synthèse des résultats

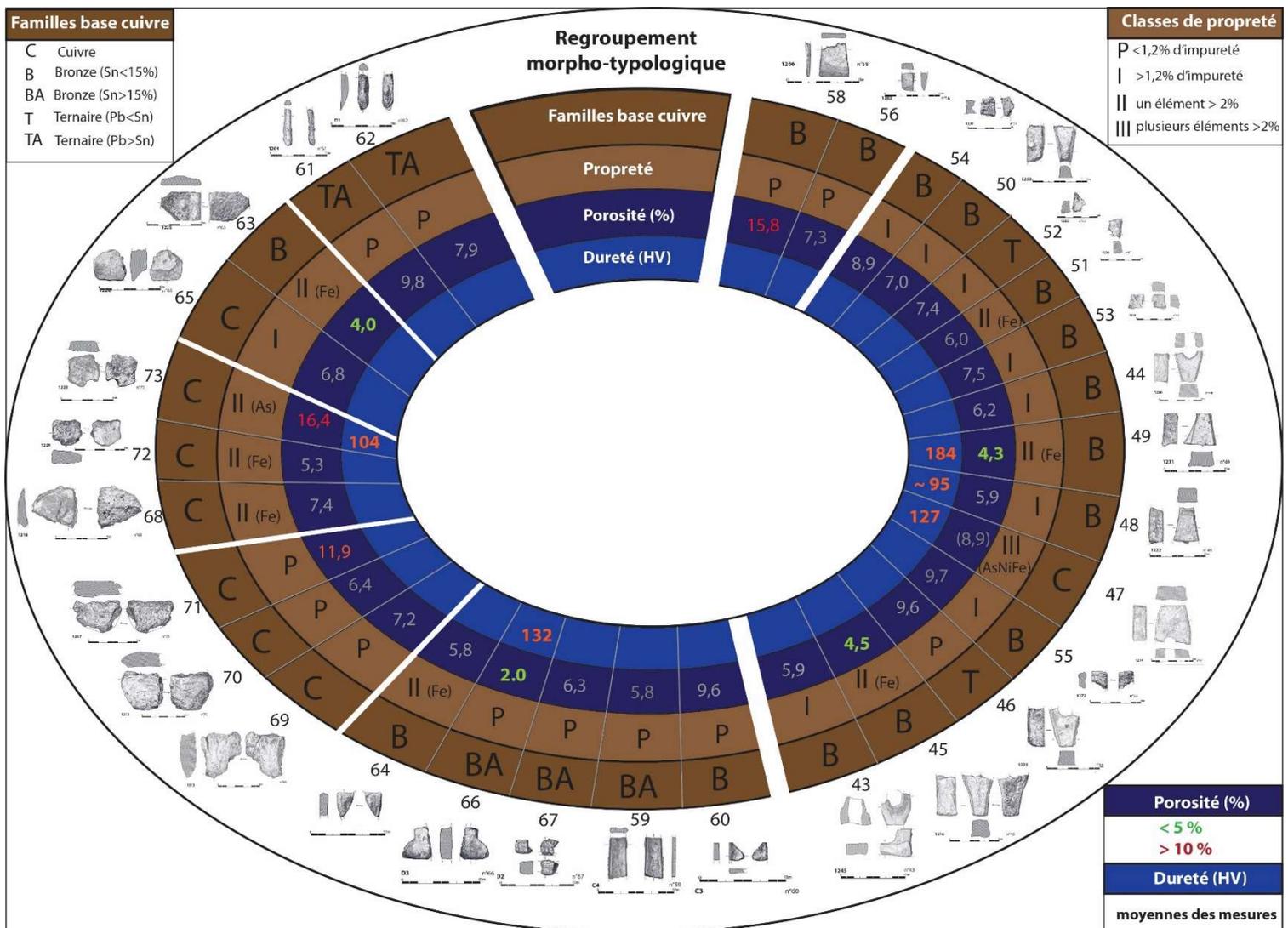


Figure F8 Synthèse des résultats de composition, de morpho-typologie, de porosité et de dureté des lingots supposés (dessins P. Biliant, conception G. Meynieux)

Tableau F9 Synthèse des données et des résultats des 30 lingots supposés

N°	Catégorie morphologique	Composition (%)					Propriétés physiques			
		Cu	Sn	Pb	Imp.	Groupe <sup>5</sup>	Masse (g)	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Porosité (%)	Dureté (HV)
43	Bipenne	84,41	13,22	0,01	2,4	B I (B2)	255,22	8,28	5,9	
44	Bipenne	87,35	9,90	0,62	2,7	B I (B2)	708,72	8,25	6,2	
45	Bipenne	81,81	12,57	0,01	5,6	B II (B3)	925,96	8,398	4,6	
46	Bipenne	85,60	11,74	1,60	1,1	T PP (T1)	556,17	7,957	9,6	
47	Bipenne	81,63	0,32	0,01	18,3	C III	1428,14	8,104	8,9	127
48	Bipenne	88,48	8,98	0,42	2,5	B I (B2)	394,51	8,274	5,9	~ 95
49	Bipenne	78,14	11,52	0,01	10,3	B II (B3)	320,42	8,414	4,4	184
50	Bipenne	85,77	12,47	0,28	1,8	B I (B2)	336,6	8,18	7,0	
51	Bipenne	84,93	11,15	0,02	3,9	B II (B3)	253,57	8,27	6,0	
52	Bipenne	84,21	10,34	2,96	2,5	T I (T2)	159,37	8,144	7,4	
53	Bipenne	87,84	9,63	0,63	2,5	B I (B2)	199,73	8,138	7,5	
54	Bipenne	87,91	9,71	0,77	2,4	B I (B2)	164,19	8,015	8,9	
55	Bipenne	83,72	13,05	0,01	3,2	B I (B2)	55,84	7,94	9,8	
56	Hache	85,92	13,47	0,06	0,6	B P (B1)	40,21	8,16	7,2	
58	Hache	87,75	11,87	0,04	0,4	B P (B1)	63,77	7,41	15,8	
59	Plat fin (hache?)	77,39	22,14	0,01	0,5	BA P (BA)	46,27	8,29	5,8	
60	Plat fin (hache?)	85,42	14,34	0,02	0,2	B P (B1)	9,88	7,95	9,6	
61	Barre	61,59	5,76	32,33	0,3	TA P (TA)	44,03	8,39	9,8	
62	Barre	68,06	11,69	20,06	0,2	TA P (TA)	59,86	8,377	7,9	
63	Plat à bord droit	82,87	13,27	0,07	3,9	B II (B3)	343,17	8,444	4,0	
64	Plat à angle droit	84,09	9,66	0,03	6,3	B II (B3)	43,07	8,29	5,8	
65	Sub-carré épais	95,87	0,10	0,68	4,7	C I (C2)	260,87	8,29	6,8	
66	Rectangulaire plat épais	81,05	18,54	0,05	0,4	BA P (BA)	124,56	8,623	2,0	132
67	Rectangulaire plat épais	82,68	16,83	0,07	0,5	BA P (BA)	37,92	8,249	6,3	
68	Plano-convexe	89,07	0,07	0,01	11,7	C II (C3)	381,86	8,242	7,4	
69	Biconvexe	99,32	0,01	0,02	0,7	C P (C1)	1371,62	8,26	7,2	
70	Biconvexe	99,11	0,07	0,01	0,9	C P (C1)	1391,81	8,33	6,4	
71	Biconvexe	98,46	0,07	0,02	1,6	C P (C1)	824,32	7,84	11,9	
72	Plano-convexe	95,05	0,05	0,49	5,0	C II (C3)	411,4	8,427	5,3	
73	Plano-convexe	90,68	0,00	0,12	9,3	C II (C3)	306,02	7,436	16,4	104

<sup>5</sup> Selon les critères présentés précédemment §3.1.1