

# Étude archéométallurgique de parures hallstattiennes en alliage cuivreux du Rhin supérieur

Laurie TREMBLAY CORMIER et Benoît MILLE

**Résumé :** La vallée du Rhin supérieur se distingue, au premier âge du Fer, par une production métallique caractéristique ; la présente étude a pour objectif d'en approfondir la définition, en complétant l'analyse des formes par celle des traditions métallurgiques. Elle vise également à combler un déficit de la recherche sur les alliages cuivreux, où l'âge du Fer est encore faiblement représenté.

Un corpus de parures de types régionaux a été sélectionné (bracelets de type Bade-Alsace, parures annulaires massives de section circulaire, fermées et lisses), couvrant une large période allant du Ha C2 au Ha D3, soit du VII<sup>e</sup> au milieu du V<sup>e</sup> siècle avant notre ère. Le protocole est basé sur l'étude macroscopique des parures et l'analyse de leur composition élémentaire, avec pour objectif d'établir différents types de composition chimique et d'en proposer une interprétation archéologique. Les analyses ont été réalisées au Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF) à l'aide de la méthode PIXE, principalement sur des prélèvements faits dans les parties saines des parures. Les résultats montrent de nettes différences de composition chimique selon la typologie ; les bracelets de type Bade-Alsace sont ainsi réalisés suivant la recette classique du bronze à l'étain et montrent une variation du spectre d'impuretés qui dépend principalement de la forme du bracelet (variantes A1, B1 et B2). À l'inverse, de nombreuses parures fermées lisses possèdent un taux élevé de plomb, allant jusqu'à 36 %. Ce phénomène pose la question des raisons qui motivent cette forte présence du plomb dans l'alliage ; un rôle plus économique que technique peut être invoqué, avec une volonté d'augmenter la masse globale de métal par l'adjonction de plomb au bronze recyclé. La pratique des bronzes au plomb trouverait ici pour explication l'appauvrissement des stocks de matière première, et traduirait ainsi des changements profonds dans les dynamiques économiques, touchant plus particulièrement aux ressources disponibles.

L'analyse est complétée par la recherche des compositions jumelles, qui correspondent à des objets présentant une composition chimique identique. La mise en évidence de jumeaux de lingot et de creuset permet de proposer l'existence de liens d'ordre technologique entre certaines pièces, qui appartiennent parfois à des ensembles ou à des sites différents. Leur distribution dans l'ensemble du Rhin supérieur, autant sur ses deux rives que dans ses parties nord et sud, atteste l'existence d'un réseau de relations soutenues entre les artisans et la population. L'homogénéité des traditions métallurgiques va ainsi de pair avec celle de la typologie, ajoutant à la cohésion déjà forte de la culture matérielle du Rhin supérieur.

**Mots-clés :** Premier âge du Fer, parure annulaire, archéométallurgie, alliages cuivreux, plomb, composition élémentaire.

**Abstract:** During the Early Iron Age, the Upper Rhine valley stands out by its very typical metal production. The general typology shows strong relations with the neighbouring regions of the Swiss Plateau, Württemberg and the Rhineland, composing an area of similar cultural trends set along the Rhine axis and the Upper Danube. The present work aims at improving the characterization of the Upper Rhine metal production, by completing the typological analysis with the study of metallurgical traditions. It also strives to fill a gap in research regarding copper alloys in the regions north of the Alps, where the Iron Age is still poorly known.

A set of ring ornaments of regional types has been selected according to two criteria. First, the geographical distribution of the type must be limited to or, at least, clustered in the Upper Rhine valley; indeed, as the workshops are unknown, this information alone can suggest a regional origin for the objects. In addition, the objects must be thick enough to be sampled without damage, leading to the exclusion of small ornaments like brooches and pins. Consequently, the items selected for the analysis are arm rings of the Bade-Alsace type and closed, massive rings with a circular section and no decoration. They are evenly distributed in the area and cover a chronological span extending from Ha C2 to Ha D3, or from the 7th to the middle of the 5th century BC. Remains of copper alloy working are quite scarce in the Upper Rhine valley, and are mainly represented by crucible and mould fragments. Three objects from Britzgyberg have thus been analysed, as the only direct comparisons between copper alloy metallurgy and the ring ornaments: a casting sprue, and the fragments of an ingot and of an ankle ring.

The procedure is based on the macroscopic study of the rings and the analysis of their elemental composition. The main goal is the development of a typology of chemical compositions and its archaeological interpretation. In order to check

potential composition and fabrication relationships between the objects, several levels of association have been tested: objects composing a pair, objects with different functions from the same grave, objects from the same cemetery and different graves, and isolated objects. The typology of elemental compositions has been completed by the search for twin compositions, which can bring to light production relationships between some objects, manufactured during the same casting (crucible twins) or using the same copper ingot (ingot twins).

The analyses were carried out in the Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF) using the PIXE method, on the AGLAE particle accelerator. They mainly concerned samples taken in the healthy parts of ornaments, on the inner side of the ring or on the plug, using a 1 mm HSS steel drill. Three objects were not sampled but analysed through surface analysis, without cleaning, at the request of their museum; the results are however hardly meaningful. Indeed, two objects were too corroded while the third one shows extreme values, which may be due to the segregation of chemical elements and their migration to the surface of the object during its cooling, or to surface alteration during its burial in the ground. A total of thirty-one chemical elements have been analysed. Among these, twenty are considered as significant for the study of ancient copper alloys; several of them were excluded, as they were below the detection limit (Mn, Zn, Se, Cd, In, Te, Au, Hg). The statistical processing thus concerned the following elements: copper (Cu), tin (Sn) and lead (Pb), as main alloy components, and phosphorus (P), sulphur (S), iron (Fe), cobalt (Co), nickel (Ni), arsenic (As), silver (Ag), antimony (Sb) and bismuth (Bi) as impurities.

The alloy components show strong differences in the distribution of lead, which seems to correspond to two distinct tendencies in the alloys. According to this, the alloys can be classified in four groups: binary alloys where lead is an impurity (less than 1%; type 1a) or was unintentionally added (1 to 2%; type 1b); ternary alloy with a low amount of added lead (2 to 6%; type 2); and ternary alloys where lead exceeds tin and is added in a moderate (6 to 10%; type 3) or strong amount (over 10%; type 4). The tin distribution is correlated to these composition types: binary alloys have 8% or more tin, while ternary alloys have less than 8% tin, but never go under the limit of 3%. Therefore, this shows that lead did not replace tin, which remained at a level sufficient to improve the properties of the alloy (hardness, colour...), but was added to an already existing bronze mix, creating ternary alloys that can be called 'leaded bronzes'.

These results show clear variations of the chemical composition according to typology. The Bade-Alsace arm rings are made of classical tin-bronzes (1a and 1b types), with an impurity pattern that changes from one variant to the other (A1, B1 and B2); the casting sprue also falls within this group. On the other hand, many massive closed ring have a high lead content, going up to 36%, and are mainly distributed between alloy types 3 and 4, with the ingot fragment and the 'as-cast' ankle ring from Britzgyberg. A chronological evolution can be seen in this scheme, Bade-Alsace arm rings being older than many of the massive closed rings with a high lead content; leaded bronzes could thus appear during the second half of Ha D (6th century BC), although this needs to be confirmed with further investigations. This phenomenon raises the question of the reasons behind the addition of lead to the alloy; aesthetic and technical hypotheses can be proposed, respectively concerning the visual aspect of the ornament and the lowering of the alloy's melting point. However, an economical reason also seems likely, as lead could have been added to bronze in order to increase the material's mass. Leaded bronzes would thus be a response to the waning of recycled bronze stocks, showing deep changes in economic dynamics, with roots in the availability of primary resources.

The search for twin compositions called on a hierarchical clustering analysis of the chemical composition, on standardized data and using the Ward aggregation method, first on the detected impurities (for ingot twins), then adding also tin and lead (crucible twins). Even with a strict similarity limit (Euclidean distance equal or inferior to 1), many crucible twins can be seen within the cluster, and even more for ingot twins. The great number of crucible twins carries important archaeological implications, among which the strict contemporaneity of the concerned objects. In this perspective, PIXE analyses need to be completed with a more sensitive and precise technique, in order to obtain even more reliable results. It is not surprising to note that archaeological pairs are also crucible twins, which confirms the strong unity of ornaments with similar shapes. But, except for object pairs, crucible twins are rarely found within the same grave: neck, arm and ankle rings of a same person were made during separate castings and using different ingots, testifying that sets of ornaments were gradually gathered. Within a same cemetery, crucible twins can be distributed between many graves; the phenomenon also extends between cemeteries, in particular between the Haguenau cemeteries but also to the whole Upper Rhine valley, adding to the high homogeneity of the material culture. These observations lead to the restitution of strong relations between different communities, sharing one common thread: the craftsman (or workshop) who cast the object, around whom bronze production thus seems to have been centralized. It will therefore be necessary to investigate this organisational trend of the metal economy, by extending the analyses to a greater number and different types of objects.

**Keywords :** Early Iron Age, ring ornaments, archaeometallurgy, copper alloys, lead, elemental composition.

**L**A VALLÉE du Rhin supérieur se distingue, au premier âge du Fer, par une production métallique caractéristique. La typologie du mobilier atteste de relations soutenues avec les régions voisines du plateau Suisse, du Wurtemberg et de Rhénanie, formant une aire d'influence culturelle étendue,

articulée autour de l'axe rhénan et du cours supérieur du Danube (Bräuning *et al.*, 2013). La présente étude a pour objectif d'approfondir la définition de la production métallique du Rhin supérieur, en complétant l'analyse des formes par celle des traditions métallurgiques.

Au nord-ouest des Alpes, la recherche en archéométallurgie souffre d'un relatif déséquilibre entre les périodes protohistoriques. L'âge du Fer fait ainsi pâle figure face au grand nombre de travaux portant sur l'âge du Bronze, un déficit qui est contrebalancé par l'importance des problématiques relatives à la production sidérurgique. Cette lacune est particulièrement marquée par l'arrêt de la majorité des travaux à la frontière chronologique de la transition Bronze-Fer. L'argument le plus invoqué est celui d'une production métallique hallstattienne basée sur le recyclage, rendant délicate toute interprétation sur la métallurgie des métaux non-ferreux – un raisonnement qui, jusqu'à présent, n'a été validé par aucune étude de la composition élémentaire du métal (Schwab, 2011, p. 268).

Un corpus de parures appartenant aux types régionaux a été sélectionné pour la mise en place d'un premier référentiel sur les alliages cuivreux du Rhin supérieur. Le corpus réuni ne couvre que partiellement le champ de la culture hallstattienne, puisqu'il s'étend du Ha C2 au Ha D3 et concerne surtout la période du Ha D1 et Ha D2, dont la production métallique est mieux définie et représentée par de nombreuses pièces. Le protocole est basé sur l'étude macroscopique des parures et l'analyse de leur composition élémentaire, avec pour objectif d'établir différents types de composition chimique et d'en proposer une interprétation archéologique. Afin de vérifier l'existence éventuelle de relations de composition et de fabrication entre les objets, différents niveaux d'association ont été testés : objets formant une même paire, objets de type différent mais issus d'une même tombe, objets provenant d'une même nécropole, et objets isolés. La typologie des compositions élémentaires a donc été complétée par la recherche des compositions jumelles, qui peuvent attester de liens de parenté de fabrication entre certains objets, produits lors de la même coulée – jumeaux de creuset – ou à partir du même lingot de cuivre – jumeaux de lingot (Rychner et Kläntzchi, 1995 ; Véber, 2009).

## LE CORPUS

Le choix des pièces à analyser est motivé par deux critères. Tout d'abord, la distribution du type doit être limitée ou, du moins, fortement concentrée dans le Rhin supérieur ; en l'absence des ateliers, seule cette information permet de considérer l'objet comme une production régionale. De plus, les pièces doivent être assez massives pour autoriser le prélèvement de matière sans dommages majeurs, ce qui écarte les petits objets comme les fibules et les épingles. C'est pourquoi les bracelets de type Bade-Alsace et les parures annulaires massives de section circulaire, fermées et lisses ont été retenus (fig. 1). Leur répartition touche l'ensemble de l'aire d'étude (fig. 2), bien que la riche zone des environs de Colmar (Haut-Rhin, France) soit sous-représentée en raison de l'inaccessibilité des collections au moment de l'étude.

## Bracelets de type Bade-Alsace

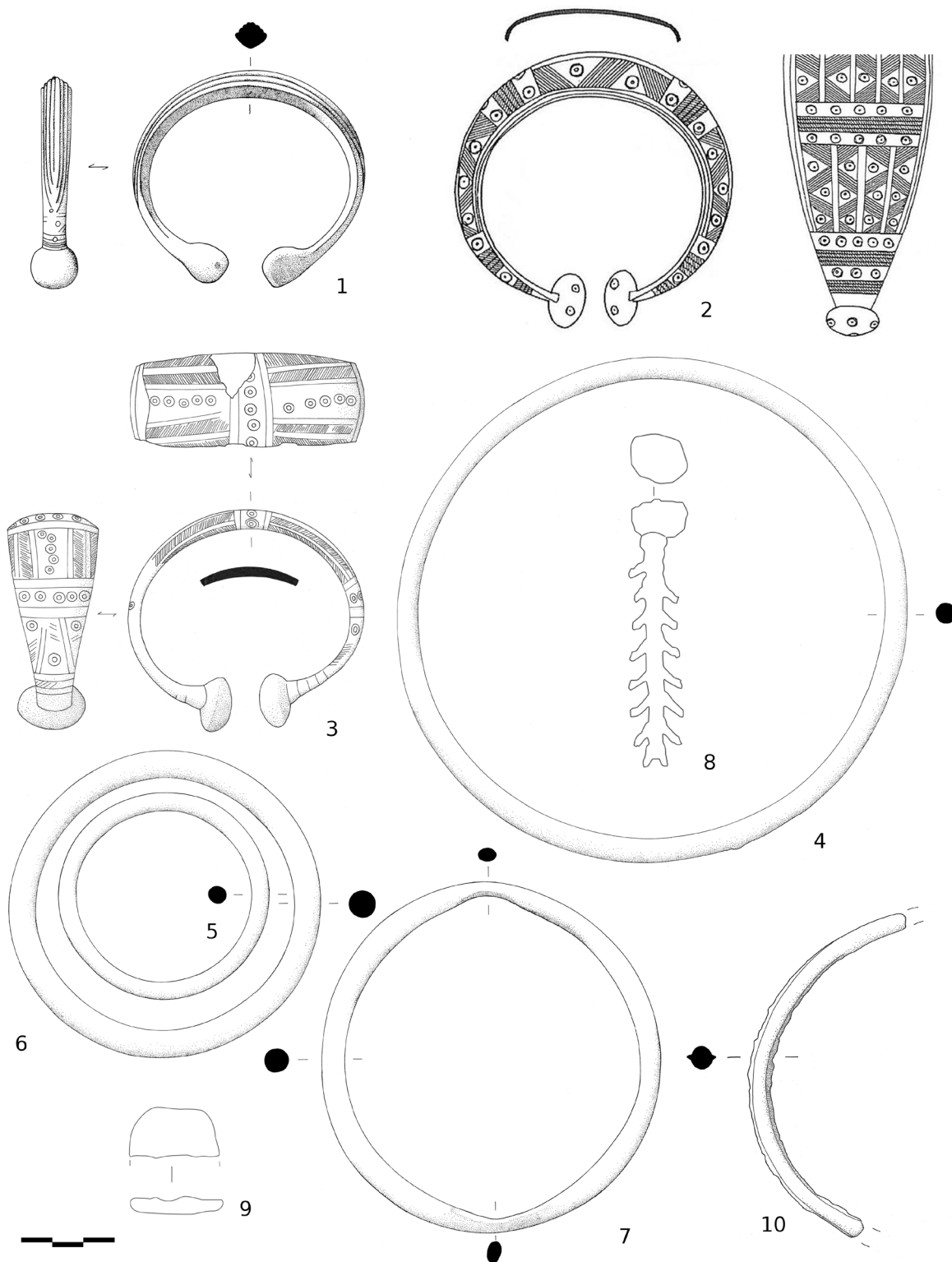
### *Variante A : à cannelures*

Ces bracelets sont composés d'un corps massif décoré de cannelures longitudinales convergentes, aux extrémités terminées par des tampons massifs sphériques ou facettés ; des cercles oculés, des hachures ou des stries incisées peuvent compléter le décor des tampons et du premier quart du jonc (fig. 1, n° 1). Ils sont à distinguer de formes apparentées connues en Lorraine centrale, en Sarre, en Suisse et en Côte-d'Or, dont les cannelures sont généralement parallèles (Hoy, 2015, p. 66 ; Plouin et Koenig, 1990, p. 16 ; Reinhard, 2003, p. 23 et 26 ; Schmid-Sikimić, 1996, p. 26-27). Les traces de fabrication observées sur certains exemplaires attestent l'obtention des tampons par une coulée secondaire d'assemblage ; cette technique est confirmée à Bischoffsheim, Bas-Rhin (Plouin, 2012, fig. 8, n° 3), où un individu incomplet possède une extrémité effilée sans tampon, de même que sur le bracelet de provenance inconnue du musée de Mulhouse (fig. 3). Cette variante est concentrée dans les environs de Colmar, Haut-Rhin, et Breisach, Bade-Wurtemberg ; son association ponctuelle à des bracelets de lignite et à des urnes graphitées à fond rouge oriente vers une datation au Ha D1 (Plouin et Koenig, 1990, p. 19-20) ; cependant, une apparition lors d'une phase récente du Ha C est fortement envisageable depuis la découverte de l'incinération 4022 d'Ungersheim, Bas-Rhin, où un fragment de parure était associé à des formes céramiques typiques du Ha C (Boës, 2006, p. 117 ; Plouin, 2012, p. 116), de même que sur la base de comparaisons avec les formes similaires du plateau Suisse et du Jura suisse (Schmid-Sikimić, 1996, p. 29).

### *Variante B : à jonc large et décor géométrique*

Les bracelets de la variante B sont caractérisés par un jonc de 1,5 à 7 mm d'épaisseur, pour une largeur généralement comprise entre 28 et 58 mm. Le décor est unique à chaque paire ; il est composé de plusieurs registres comportant des hachures, des triangles et des cercles oculés, ces derniers s'étendant aux tampons de certaines pièces. Les tampons sont sphériques ou biconiques, et toujours massifs ; la mise en évidence de coulures métalliques laisse à nouveau supposer une obtention des tampons par coulée secondaire d'assemblage (fig. 4).

L'opposition entre une sous-variante à jonc mince de section plate recourbée (B1 ; fig. 1, n° 2) et une autre à jonc plano-convexe (B2 ; fig. 1, n° 3) est soulignée dès les premières études sur ces parures par R. Degen, qui met cette différence sur le compte de deux ateliers distincts, l'un employant la tôle et l'autre la fonderie (Degen, 1968, p. 525-526). Or, bien que cette différence soit avérée en ce qui concerne l'épaisseur, il convient de demeurer prudent face à l'opposition « jonc martelé ou coulé ». En effet, aucune trace de martelage n'a pu être observée lors de l'étude des objets à section fine. Ces traces auraient



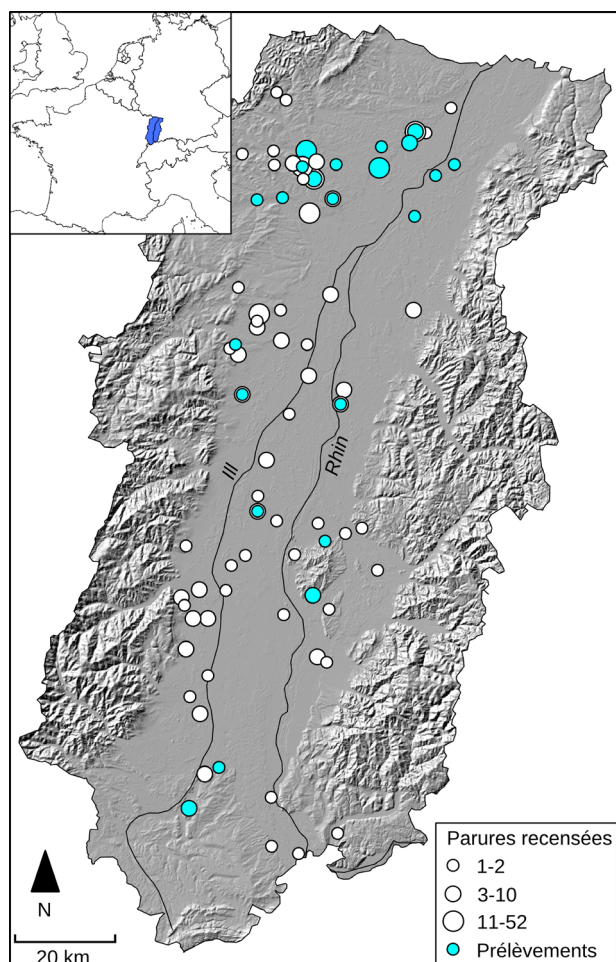
certes pu avoir été effacées lors des étapes de finition par un polissage systématique des deux faces du bracelet; mais elles pourraient également ne jamais avoir existé, suite à une réalisation du jonc par fonderie. La production de plaques très fines par la technique de la fonte à la cire perdue analogues en épaisseur aux tôles obtenues par martelage (inférieures au millimètre) est attestée au Ha B2/B3 pour les bracelets de type Vaudrevange (Véber, 2009, p. 51-55), et cette technique pourrait aussi s'appli-

quer aux bracelets de la variante B1. La répartition de ces sous-variantes suit également une logique géographique, les bracelets de type B1 se rencontrant plutôt entre Colmar et Bâle, et ceux de type B2 se concentrant entre Haguenau et Strasbourg (Degen, 1968, p. 526 et fig. 2).

La technique de décoration semble également similaire pour les deux sous-variantes. La réalisation au repoussé du décor de B1 est à exclure, en raison de l'absence d'empreinte en négatif sur la face interne du jonc.

**Fig. 1 (page de gauche)** – Types d’objets composant le corpus. 1 : bracelet de type Bade-Alsace var. A de Sankt Georgen (Bade-W.), ZFA Rastatt; 2 : bracelet de type Bade-Alsace var. B1 de Mulhouse-Hasenrain (Haut-Rhin), mus. Mulhouse; 3 : bracelet de type Bade-Alsace var. B2 de Dachstein-Ernolsheim (Bas-Rhin), mus. Strasbourg, no inv. D.11.986.1.1; 4 : torque massif de section circulaire fermé lisse de Harthouse 5/1 (Bas-Rhin), mus. Haguenau, n° inv. 135; 5-6 : bracelet et anneau de cheville de forme similaire de Harthouse 10/1 (Bas-Rhin), mus. Haguenau, n° inv. 144; 7 : anneau de cheville de forme similaire présentant des concavités de Bourgheim (Bas-Rhin), mus. Strasbourg, n° inv. 12286; 8-10 : arbre de coulée, fragments de lingot et d’anneau brut de fonte du Britzgyberg (Haut-Rhin), mus. Mulhouse n° inv. M71-1, M71-2 et M85-02 (1, 3, 4-7, 10 : dessins L. Tremblay Cormier; 2 : Degen, 1968, fig. 4, 3; 8-9 : Dubreucq 2013, pl. 52, n°s 4 et 2).

**Fig. 1 (left)** – Analysed object types. 1: arm ring of the Bade-Alsace type, var. A from Sankt-Georgen (Baden-W.), ZFA Rastatt; 2: arm ring of the Bade-Alsace type, var. B1 from Mulhouse-Hasenrain (Haut-Rhin), mus. Mulhouse; 3: arm ring of the Bade-Alsace type, var. B2 from Dachstein-Ernolsheim (Bas-Rhin), mus. Strasbourg, inv. nr D.11.986.1.1; 4: massive closed neck ring with circular section and no decoration from Harthouse 5/1 (Bas-Rhin), mus. Haguenau, inv. nr 135; 5-6: arm and ankle rings with similar shape from Harthouse 10/1 (Bas-Rhin), mus. Haguenau, inv. nr 144; 7: ankle ring with similar shape and concavities from Bourgheim (Bas-Rhin), mus. Strasbourg, inv. nr 12286; 8-10: casting sprue, fragments of ingot and ankle ring, as cast, from the Britzgyberg (Haut-Rhin), mus. Mulhouse, inv. nr M71-1, M71-2 and M85-02 (1, 3, 4-7, 10: drawings L. Tremblay Cormier; 2: Degen, 1968, fig. 4, 3; 8-9: Dubreucq 2013, pl. 52, nos. 4 and 2).



**Fig. 2** – Localisation des objets analysés, sur le fond de l’ensemble des parures similaires recensées.

**Fig. 2** – Location of the analysed objects, over a background of similar finds.

**Fig. 4 (à droite)** – Traces de coulée secondaire du tampon sur un bracelet de variante B2 de Scherzheim, Bade-W. (Badisches Landesmuseum Karlsruhe, n° inv. C. 11335).

**Fig. 4 (right)** – Secondary casting traces of the plug on a B2 variant arm ring from Scherzheim, Baden-W. (Badisches Landesmuseum Karlsruhe, inv. nr. C. 11335).



**Fig. 3** – Bracelet de type Bade-Alsace variante A de provenance inconnue montrant une extrémité effilée, sur laquelle le tampon a été assemblé par coulée secondaire (musée de Mulhouse, coll. Engel-Dollfus, n° inv. 20D).

**Fig. 3** – Arm ring of the Bade-Alsace type, variant A, of unknown provenance, with a pointed end on which a plug was added by secondary casting (Mulhouse museum, coll. Engel-Dollfus, inv. nr. 20D).



L'étude macroscopique n'a permis de déceler aucune trace d'outil ou d'à-coups dans les incisions, stigmates qui auraient pu plaider en faveur d'un décor incisé après la coulée (Gluchy, 2013, p. 144). La question de la réalisation du décor sur le modèle en cire ou l'objet en bronze demeure donc ouverte, et ne pourra être résolue que par des observations à l'échelle microscopique.

Bon nombre de ces parures sont des découvertes anciennes ou des objets isolés; le faible nombre d'associations rend ainsi toute datation difficile. Cependant, leur association à des bracelets de lignite et des perles de collier permet de proposer une apparition à la fin du Ha C, avec une continuité du port durant la première partie du Ha D1 (Plouin, 2007, p. 99; Schmid-Sikimić, 1996, p. 65-66), comme le confirme l'association à des types céramiques du Ha D1a dans le tertre de Soufflenheim (Zehner, 2000). Cette datation haute tend à être confirmée par la pauvreté relative des tombes, ainsi que par la parenté du décor avec celui des parures du Ha B2/B3, qui présentent également des registres de hachures, de stries et l'emploi du cercle oculé.

### Parures annulaires massives de section circulaire, fermées et lisses

De forme simple et sans décor, ces parures sont portées au cou, aux poignets et aux chevilles (fig. 1, nos 4-6). Les dimensions des pièces montrent que chacune est différente, et probablement produite selon les mensurations de son porteur. Certaines parures présentent également des ébarbures longitudinales, attestant une coulée dans un moule bivalve; l'exemple le plus évident est l'anneau brut de fonte du Britzgyberg, même si des traces plus discrètes demeurent sur d'autres exemplaires (fig. 5). Aucun moule contemporain n'ayant été découvert dans la région, on ne peut confirmer l'usage de cette technique de fonte pour ces parures; néanmoins, l'emplacement des stigmates de coulée et la singularité de chaque parure suggèrent l'emploi de moules bivalves non-permanents. Ceux-ci pourraient correspondre aux moules assemblés en terre cuite adaptés à ce type de production, tels qu'ils ont été mis en évidence sur les habitats de la fin de l'âge du Bronze de Fort-Harrouard (Eure-et-Loir) et d'Auvernier (Pernot, 1998, p. 109).

Par ailleurs, ces stigmates de coulée trahissent un ébarbage incomplet après la fonderie ainsi qu'un polissage limité. Le peu de travail accordé à ces étapes de finition peut s'expliquer par l'enroulement – partiel ou total – du jonc par des lanières de matériaux périssables, attesté par de nombreuses traces textiles autant sur les bracelets que les torques et les anneaux de cheville.

Présentes durant tout le Ha D, ces parures sont caractéristiques des tombes féminines du Ha D2, où elles jouent un important rôle dans la composition du costume (Tremblay Cormier, sous presse). En raison de leur forme ubiquiste, les exemplaires isolés ne peuvent être datés avec précision; une certaine tendance a cependant été observée lors de l'étude des pièces, avec un amincissement du jonc et une augmentation du diamètre au Ha D3.



**Fig. 5** – Ébarbures liées à une coulée en moule bivalve. a : sur un fragment d'anneau du Britzgyberg, Haut-Rhin (mus. Mulhouse, n° inv. M85-02); b : sur la face interne d'un anneau de cheville de Bischoffsheim, Bas-Rhin (musée de Strasbourg, n° inv. 1227a).

**Fig. 5** – *Burrs resulting from casting in a two-part mould. a : on a ring fragment from Britzgyberg, Haut-Rhin (Mus. Mulhouse, inv. nr. M85-02); b : on the inner side of an ankle ring from Bischoffsheim, Bas-Rhin (Strasbourg Museum, inv. nr. 1227a).*

Il convient de noter la présence d'une variante morphologique parmi les anneaux de cheville, présentant deux concavités opposées sur la face interne du jonc, considérées comme de l'usure due à la marche (Schaeffer, 1930, p. 249). Cette proposition est toutefois discutable. En effet, ces parures sont fortement concentrées dans les nécropoles de Haguenau; or, l'usure due à une activité universelle comme la marche devrait, en toute logique, toucher l'ensemble des parures, et ne pas se cantonner à une micro-région. De plus, l'observation macroscopique des états de surface n'a montré aucune différence entre les zones « usées » et saines. Par prudence, on isolera donc les anneaux à concavités comme une variante, sur laquelle nous reviendrons dans la suite de cet article.

### Témoins d'activités métallurgiques

Les traces liées au travail des alliages cuivreux sont rares dans la vallée du Rhin supérieur, bien que les opérations d'archéologie préventive aient mené à la mise au jour de témoins sur quelques habitats de plaine, notamment des fragments de creusets ainsi que des moules en terre cuite et en grès (Bräuning *et al.*, 2013, p. 210-212). Les

vestiges les plus nombreux sont ceux du Britzgyberg et de Buergelen, dans le Haut-Rhin, où l'ensemble des activités liées à la métallurgie de transformation est attesté (Adam, 2009, p. 65-67; Dubreucq, 2007, p. 39; Schweitzer, 1997, p. 64). Parmi ceux-ci, trois pièces en alliage cuivreux ont été prélevées et analysées, à titre de comparaison avec les objets finis. Leur datation au sein du Ha D demeure délicate, le contexte stratigraphique de ces pièces étant inconnu; toutefois, au vu des récentes découvertes d'autres témoins métallurgiques au Britzgyberg, une datation au Ha D1 est envisageable (A.-M. Adam, communication personnelle).

#### *Arbre de coulée*

Un petit cône de coulée est associé à un canal principal alimentant quinze ou seize canaux secondaires parallèles (fig. 1, n° 8); la restauration ne permet plus de voir si l'un des canaux supérieurs est absent ou s'il a été coupé au ras du canal principal. Cet arbre de coulée ne montre aucune ébarbure liée à un moule bivalve; au contraire, le modelé d'un bourrelet entre le cône et le canal principal tend plutôt à le rattacher à une coulée à la cire perdue. En raison du faible diamètre du canal principal (6 mm) et des canaux secondaires (3 à 4 mm), de leur disposition parallèle et de la faible masse de bronze engagée (39 g), il est plus probable qu'il soit le témoin de la coulée simultanée de plusieurs petites pièces fabriquées « en grappe » plutôt que d'un ou deux objets de taille plus importante. À La Heuneburg, un exemplaire comparable possède deux canaux secondaires, dont l'un était encore associé à une ébauche de crochet de ceinture (Drescher, 1995, p. 257, fig. G1.4); ses dimensions se rapprochent de cet exemplaire du Britzgyberg, ce qui conforte l'hypothèse d'une coulée de plusieurs petites pièces.

#### *Fragment de lingot*

Une petite plaque incomplète en alliage cuivreux, d'un poids de 19 g, est interprétée comme un fragment de lingot-barre (fig. 1, n° 9), dont le profil semble analogue aux lingots-barres fréquemment rencontrés dans les dépôts launaciens (Carozza, *sous presse*). Cette identification comme matière première est confirmée par sa coulée en moule univalve, visible par l'aspect « en peau d'orange » de l'une de ses faces, formée lors du refroidissement du métal à l'air libre (Drescher, 1995, p. 257). La présence d'une cassure ancienne transversale peut correspondre à la division dudit lingot pour n'en utiliser qu'une partie. La faible quantité de métal représentée par cet objet est en faveur de cette interprétation avec un emploi préférentiel de petits morceaux de matière première lors de la coulée, plutôt que de masses importantes difficiles à fondre (Guillaumet, 2003, p. 48).

#### *Fragment d'anneau en cours de fabrication*

Le fragment d'anneau brut de coulée présente des ébarbures sur les faces interne et externe caractéristiques

d'une fonte en moule bivalve; aucune trace du jet de coulée n'a été identifiée. Les dimensions originelles peuvent être estimées à environ 95 mm de diamètre interne, pour une section de 6 à 7 mm et un poids aux environs de 60 g. Ces dimensions excluent un usage comme bracelet, d'un diamètre interne généralement compris entre 67 et 73 mm. Il semble également trop petit pour être un torque d'enfant ou de nourrisson, les quelques exemplaires du corpus possédant un diamètre de plus de 110 mm. Elles le rapprochent toutefois des anneaux de cheville fermés, dont le diamètre se situe entre 93 et 105 mm; il s'agirait dans ce cas de l'exemplaire le plus méridional d'Alsace (Tremblay Cormier, *sous presse*).

### MÉTHODE D'ÉTUDE

La démarche vise la caractérisation de groupes de composition chimique, grâce à l'élaboration d'une typologie de la composition des alliages et par une étude approfondie du spectre d'impuretés du métal. Ces analyses ont été réalisées au laboratoire du Centre de recherche et de restauration des musées de France à l'aide de la méthode PIXE (*Particle Induced X-Ray Emission*; Dran *et al.*, 2000), sur l'accélérateur de particules AGLAE. L'analyse a été réalisée sur des prélèvements faits dans les parties saines des parures, sur la face interne du jonc ou d'un tampon, par un forage réalisé avec une perceuse équipée d'un foret en acier HSS d'un diamètre de 1 mm. Un seul prélèvement de 10 mg a été effectué par objet, bien qu'il aurait parfois été souhaitable de multiplier ceux-ci afin d'avoir un aperçu plus représentatif de la composition de l'ensemble de la pièce (par exemple, dans le cas des coulées secondaires d'assemblage). Cette limite n'est toutefois pas critique dans le cadre de cette étude : seuls les bracelets de type Bade-Alsace sont produits par coulées multiples, et nous verrons qu'ils montrent une forte homogénéité de composition entre les prélèvements faits sur le jonc ou le tampon. À la demande du Badisches Landesmuseum de Karlsruhe, trois parures du Bade-Wurtemberg ont été analysées en surface, sans nettoyage préalable, plutôt que prélevées. Les résultats sont toutefois difficilement exploitables : les bracelets de Hügelsheim et Söllingen se sont révélés trop corrodés, tandis que l'exemplaire de Scherzheim montre une composition relativement marginale par rapport au reste du corpus; cette différence peut s'expliquer soit par la migration de certains éléments en surface durant la phase de refroidissement, créant une ségrégation de la composition chimique entre le cœur et la surface de l'objet, soit par l'altération de la surface en raison de son enfouissement (Bourgarit et Mille, 2014, p. 115; Pernicka, 2014, p. 245).

Un total de trente et un éléments chimiques a été analysé pour l'ensemble des échantillons. Sur ces trente et un éléments, onze ne sont recherchés que pour détecter une éventuelle contamination du métal par les produits de corrosion (éléments issus du sol et non du métal), et ne

sont donc pas pris en compte dans la suite de l'étude<sup>(1)</sup>. Lorsqu'une forte teneur de l'un de ces éléments a été détectée, l'analyse n'a pas été conservée. C'est par exemple sur cette base que nous avons décidé de ne pas tenir compte des résultats obtenus sur les deux objets précédemment discutés du musée de Karlsruhe. Il reste donc vingt éléments chimiques, qui sont considérés comme les plus significatifs dans les études archéométallurgiques sur le cuivre (Mille et Bourgarit, 2000, p. 18; Bourgarit et Mille, 2014, p. 107; Pernicka, 2014, p. 140). Cependant, parmi ces éléments, plusieurs sont systématiquement en teneur inférieure à la limite de détection : le manganèse (Mn), le zinc (Zn), le sélénium (Se), le cadmium (Cd), l'indium (In), le tellure (Te), l'or (Au) et le mercure (Hg). L'étude statistique des résultats a donc été menée sur les douze éléments chimiques restants, à savoir le cuivre (Cu), l'étain (Sn) et le plomb (Pb), composantes principales des alliages cuivreux protohistoriques, et le phosphore (P), le soufre (S), le fer (Fe), le cobalt (Co), le nickel (Ni), l'arsenic (As), l'argent (Ag), l'antimoine (Sb) et le bismuth (Bi) pour les impuretés (tabl. 1).

L'analyse est complétée par la recherche des compositions jumelles, méthode ayant eu d'intéressants résultats sur le mobilier suisse et lorrain (Rychner et Kläntsch, 1995, p. 64; Véber, 2009, p. 113). En effet, certains objets présentent une composition chimique partiellement ou totalement similaire, pour laquelle il a été fait l'hypothèse que la parenté remonte à l'une ou l'autre étape de la chaîne opératoire. Ainsi, les jumeaux de lingot présentent des teneurs similaires en impuretés du cuivre, ce qui permet de proposer que les objets ont été fabriqués à partir d'un même lingot de cuivre. La ressemblance peut s'étendre aux teneurs des composants de l'alliage (Cu, Sn, Pb); en ce cas, l'hypothèse concerne non seulement une parenté du cuivre, mais signifie également que les quantités d'étain et de plomb ajoutées à l'alliage sont identiques. Ces objets sont donc possiblement issus de la même coulée, ce qui en fait des jumeaux de creuset (Rychner et Kläntsch, 1995, p. 30). Dans ce travail sur les parures hallstattiennes du Rhin supérieur, les compositions jumelles peuvent concerner les objets d'une même paire ou d'une même tombe, mais également le mobilier de tombes ou de nécropoles différentes, montrant ainsi l'existence de relations supplémentaires entre les ensembles.

## RÉSULTATS

### Composition des alliages (cuivre, étain, plomb)

La teneur en cuivre moyenne du corpus est de 82,2% ( $\sigma$  7,13%; tabl. 2); elle est comprise entre un minimum de 64,5% et un maximum de 92,9%, ce qui est relativement usuel pour les alliages cuivreux protohistoriques. Aucun objet n'est en cuivre non allié : même les objets aux teneurs en cuivre les plus élevées ( $\geq 90\%$ ) montrent

l'ajout d'un second élément au mélange (alliage binaire), voire d'un troisième (alliage ternaire).

La distribution de l'étain suit une loi normale (fig. 6); sa moyenne est de 8,45% pour un écart-type de 3,39%, ce qui correspond à une dispersion importante pour des alliages protohistoriques (Northover, 2009, p. 352). Il s'agit cependant d'un taux d'étain également habituel, ne dépassant jamais la barre des 15,8% et ne plongeant qu'à titre anecdotique sous le seuil de 3%.

Pour sa part, le plomb montre une intéressante distribution bimodale, qui semble correspondre à deux tendances distinctes dans la composition des alliages; la grande variabilité des teneurs est confirmée par un écart-type particulièrement important ( $\sigma$  9,21%) et supérieur à la moyenne (8,61%). La dispersion générale des teneurs va ainsi de 0,16 à 36,6%, avec deux pics aux environs de 1,5% et 20%. Le premier quartile correspond aux objets où le plomb est à moins de 1%, donc à l'état d'impureté; il est représenté par dix-neuf pièces. Pour les teneurs situées entre 1 et 2%, il s'agit vraisemblablement d'un ajout involontaire de plomb provoqué par le recyclage d'alliages chargés en plomb; cela concerne onze objets. Au-delà de ce seuil, l'alliage est considéré comme un « bronze au plomb » (Northover, 2009, p. 353); cet ajout de plomb caractérise la majorité du corpus, soit trente-sept pièces.

Dès lors, une classification utilisant le taux de plomb comme critère principal s'avère pertinente, en se basant sur la distribution particulière des analyses mise en évidence sur la figure 6 :

- 1a : alliage binaire cuivre-étain où le plomb est à l'état d'impureté ( $\leq 1\%$ );
- 1b : alliage binaire cuivre-étain où le plomb est un ajout involontaire ( $< 1$  à  $\leq 2\%$ );
- 2 : alliage ternaire cuivre-étain-plomb où le plomb est ajouté en faible quantité ( $< 2$  à  $\leq 6\%$ );
- 3 : alliage ternaire cuivre-plomb-étain où le plomb est ajouté en quantité modérée ( $< 6$  à  $\leq 10\%$ ) et domine l'étain;
- 4 : alliage ternaire cuivre-plomb-étain où le plomb est ajouté en quantité forte ( $> 10\%$ ) et domine l'étain.

Les alliages de type 1a et 1b sont des bronzes au sens strict, alliages binaires de cuivre et d'étain, où la présence du plomb est involontaire : il s'agit d'une impureté du minerai ou du résultat de la refonte de bronzes possédant déjà cet élément. À partir de 2%, on peut considérer que le plomb est ajouté volontairement, formant un alliage ternaire. Il ne remplace toutefois pas l'étain, qui conserve une teneur suffisante pour améliorer les propriétés de l'alliage (dureté, couleur...). Pour ces raisons, on parlera donc de « bronzes au plomb » (Northover, 2009, p. 353) pour les alliages des types 2, 3 et 4. Par ailleurs, ces types de composition sont corrélés à la teneur en étain : les alliages binaires possèdent un taux égal ou supérieur à 8%, tandis que les alliages ternaires se situent en-deçà de cette valeur (fig. 7). Cette particularité joue également en faveur d'une dilution du bronze par un ajout de plomb pour expliquer les alliages ternaires : la base « classique » cuivre-étain du bronze demeure visible, bien que contrebalancée par l'adjonction d'un troisième composant de l'alliage.



Site	Structure	N°	Type objet	Cu	Sn	Pb	P	S	Mn	Fe	Co	Ni	Zn
Birckwald	NR	H1	Bracelet B.-A. var. B2	89,7	7,97	2,08	< 0,021	<b>0,26</b>	< 0,0058	<b>0,0056</b>	<b>0,027</b>	<b>0,38</b>	< 0,011
		H2		74,1	1,02	21,9	<b>0,16</b>	< 0,36	< 0,0064	< 0,0024	< 0,0044	<b>0,78</b>	< 0,029
Bourghheim	Sépulture	S6	Anneau ch. à conca- vités	77,3	6,04	15,4	< 0,054	< 0,25	< 0,0022	<b>0,013</b>	<b>0,023</b>	<b>0,17</b>	< 0,046
		S7		72,8	6,24	24,9	< 0,045	< 0,21	< 0,0025	<b>0,018</b>	<b>0,025</b>	<b>0,23</b>	< 0,029
Donauberg	T6S2	H14	Torque	89,6	10,5	0,16	< 0,060	< 0,5	< 0,27	<b>0,026</b>	< 0,05	<b>0,074</b>	< 0,039
		H16	Anneau ch. à conca- vités	75,2	5,62	21,1	< 0,13	< 0,46	< 0,034	< 0,0028	< 0,05	<b>0,057</b>	< 0,057
		H17		78,8	6,23	14,1	< 0,053	< 0,25	< 0,012	< 0,0028	< 0,0039	<b>0,05</b>	< 0,05
Endingen am Kaiserstuhl	Sépulture	F1	Bracelet B.-A. var. A1	87,5	12,6	0,75	< 0,021	<b>0,33</b>	< 0,0055	<b>0,083</b>	< 0,0096	<b>0,11</b>	< 0,025
		F2		88	12,7	0,73	< 0,025	<b>0,49</b>	< 0,0063	<b>0,082</b>	< 0,0094	<b>0,12</b>	< 0,024
Haguenau	Sépulture	M1	Bracelet B.-A. var. B2	88,7	10,1	1,24	< 0,038	<b>0,41</b>	< 0,0052	<b>0,013</b>	<b>0,059</b>	<b>0,36</b>	< 0,0093
		M2		87,8	11,5	1,32	< 0,018	<b>0,41</b>	< 0,0043	<b>0,01</b>	<b>0,049</b>	<b>0,36</b>	< 0,032
Harthouse	T5S1	H10	Torque	72,5	6,37	26	<b>0,077</b>	< 0,37	< 0,006	<b>0,042</b>	< 0,0086	<b>0,061</b>	< 0,067
		H8	Anneau ch.	69,6	5,98	24,9	< 0,033	< 0,36	< 0,0039	< 0,0014	< 0,0094	<b>0,054</b>	< 0,078
		H9		70,8	5,01	22,1	< 0,026	< 0,4	< 0,012	<b>0,034</b>	< 0,014	<b>0,1</b>	< 0,054
	T10S1	H6	Bracelet fermé	68,8	5,89	24,7	< 0,028	< 0,3	< 0,0069	<b>0,0099</b>	< 0,0045	<b>0,077</b>	< 0,089
		H7	Anneau ch.	72,8	5,16	18,1	< 0,13	< 0,38	< 0,015	<b>0,059</b>	< 0,01	<b>0,19</b>	< 0,094
	T12S6	H11	Torque	69,8	6,91	19	< 0,023	< 0,3	< 0,0086	<b>0,013</b>	< 0,016	<b>0,058</b>	< 0,076
	T12S7	H12	Bracelet fermé	85,2	11	0,69	< 0,011	<b>0,22</b>	< 0,0075	<b>0,043</b>	< 0,0099	<b>0,085</b>	< 0,052
H13		88		9,9	0,62	< 0,027	<b>0,25</b>	< 0,0042	<b>0,076</b>	< 0,014	<b>0,13</b>	< 0,048	
Heidolsheim	Tumulus	S1	Bracelet B.-A. var. B1	85,9	4,7	8	< 0,035	< 0,11	< 0,0031	<b>0,0087</b>	< 0,011	<b>0,49</b>	< 0,031
		S5	Bracelet B.-A. var. A1	85,9	11,2	1,3	< 0,036	<b>0,27</b>	< 0,0052	<b>0,036</b>	<b>0,015</b>	<b>0,26</b>	< 0,02
Hochfelden	NR	S2	Bracelet B.-A. var. B2	87,2	7,77	5	< 0,024	< 0,1	< 0,0053	<b>0,0057</b>	<b>0,016</b>	<b>0,41</b>	< 0,03
<b><i>Hügelsheim</i></b>	<b><i>NR</i></b>	<b><i>K2</i></b>	<b><i>Bracelet B.-A. var. A1</i></b>	<b><i>28,7</i></b>	<b><i>25,2</i></b>	<b><i>4,25</i></b>	<b><i>15,2</i></b>	<b><i>0,69</i></b>	<b><i>0,21</i></b>	<b><i>0,54</i></b>	<b><i>&lt; 0,015</i></b>	<b><i>0,16</i></b>	<b><i>0,1</i></b>
Ihringen	Tumulus	R1	Bracelet B.-A. var. A1	85,9	12,6	0,71	< 0,026	<b>0,31</b>	< 0,0063	<b>0,31</b>	< 0,0096	<b>0,14</b>	< 0,08
Ihringen – Löhbücke	Sépulture	R3	Bracelet B.-A. var. B2	87,1	9,65	2,85	< 0,029	<b>0,37</b>	< 0,0019	<b>0,1</b>	<b>0,046</b>	<b>0,48</b>	< 0,097
		R4		86,3	8,32	2,98	< 0,03	<b>0,39</b>	< 0,0078	<b>0,1</b>	<b>0,046</b>	<b>0,47</b>	< 0,07
	Tumulus	R6	Anneau ch.	85,1	11,3	1,61	< 0,013	<b>0,15</b>	< 0,0055	<b>0,1</b>	<b>0,024</b>	<b>0,2</b>	< 0,092
		R2	Bracelet B.-A. var. B2	80,7	12,7	0,74	< 0,039	<b>0,42</b>	< 0,0048	<b>0,022</b>	< 0,0064	<b>0,2</b>	< 0,11
Illfurth	US 219 ou 220, zone 48	M6	Anneau brut	71,6	15,8	17,8	< 0,04	< 0,27	< 0,0072	< 0,0018	< 0,0058	<b>0,092</b>	< 0,051
	Zone 6 et 9, US 36	M7	Arbre de coulée	90,6	8,34	1,02	< 0,012	<b>0,099</b>	< 0,0025	<b>0,031</b>	<b>0,018</b>	<b>0,2</b>	< 0,027
	Zone 6 et 9, US 39 ou 40			M5	Lingot	89,2	2,3	6,47	<b>0,085</b>	< 0,16	< 0,0015	<b>0,0046</b>	< 0,012
Koenigsbruck	T12S2	H15	Torque	84,7	12,3	5,85	< 0,060	< 0,5	< 0,010	<b>0,19</b>	< 0,01	<b>0,06</b>	< 0,073
	T18S1	H18	Bracelet fermé	85,5	11	0,91	< 0,025	< 0,12	< 0,007	<b>0,11</b>	<b>0,023</b>	<b>0,12</b>	< 0,07
		H19		87,5	9,24	1,21	< 0,028	<b>0,17</b>	< 0,003	<b>0,077</b>	<b>0,027</b>	<b>0,19</b>	< 0,077
		H20	Anneau ch.	89,3	9,95	0,69	< 0,013	<b>0,25</b>	< 0,0051	<b>0,023</b>	<b>0,017</b>	<b>0,089</b>	< 0,0056
		H21		88,1	9,99	0,63	< 0,02	<b>0,34</b>	< 0,0051	<b>0,025</b>	<b>0,019</b>	<b>0,092</b>	< 0,07
	T18S5	H4	Bracelet B.-A. var. B2	86,1	11,1	0,64	< 0,02	< 0,09	< 0,0034	<b>0,019</b>	<b>0,017</b>	<b>0,55</b>	< 0,0084
		H5		86,5	11,6	0,64	< 0,03	< 0,055	< 0,0033	<b>0,023</b>	<b>0,016</b>	<b>0,47</b>	< 0,063
Maegstüb	T1S1	H22	Bracelet fermé	85,4	13	1,35	< 0,072	<b>0,37</b>	< 0,011	<b>0,043</b>	< 0,012	< 0,037	< 0,089
		H23	Anneau ch.	86,6	12,7	0,26	< 0,022	<b>0,41</b>	< 0,0043	<b>0,061</b>	< 0,0065	< 0,012	< 0,094
	T2S2	H24	Bracelet fermé	70,8	3,91	2,4	< 0,072	< 0,38	< 0,006	< 0,0036	< 0,0052	<b>0,086</b>	< 0,059
		H25		87,8	9,49	1,5	< 0,03	<b>0,23</b>	< 0,0034	<b>0,1</b>	< 0,018	<b>0,23</b>	< 0,093
	T4S1	H26	Bracelet fermé	77,3	5,1	15,4	< 0,064	< 0,31	< 0,0062	<b>0,036</b>	< 0,0037	<b>0,07</b>	< 0,06
		H27	Anneau ch.	75,1	7,01	13,3	< 0,017	< 0,19	< 0,0062	<b>0,063</b>	< 0,012	<b>0,14</b>	< 0,056
	T4S3	H28	Anneau ch.	73,8	6,11	14,9	<b>0,11</b>	< 0,29	< 0,0021	<b>0,057</b>	< 0,013	<b>0,17</b>	< 0,054
		H29		Bracelet fermé	64,5	1,32	36,6	<b>0,19</b>	< 0,49	< 0,0043	<b>0,016</b>	< 0,009	<b>0,15</b>
		H30	Anneau ch. à conca- vités	78,1	5,16	17,9	< 0,08	< 0,33	< 0,006	< 0,003	< 0,011	<b>0,093</b>	< 0,078
		H31	79	4,51	13,6	< 0,043	< 0,23	< 0,0035	<b>0,01</b>	< 0,01	<b>0,093</b>	< 0,059	
	T20S1	H32	Bracelet fermé	76,4	3,34	18,5	<b>0,11</b>	< 0,31	< 0,0022	< 0,0032	< 0,004	<b>0,067</b>	< 0,074
		H33		77,3	3,71	18,5	< 0,095	< 0,36	< 0,0077	< 0,0017	< 0,0087	<b>0,088</b>	< 0,058
		H34	Anneau ch. à conca- vités	84,9	7,77	7,75	< 0,054	< 0,17	< 0,0053	< 0,0062	< 0,013	<b>0,18</b>	< 0,057
		H35	Anneau ch.	81,6	6,87	10,7	< 0,036	< 0,25	< 0,0028	< 0,0039	< 0,015	<b>0,18</b>	< 0,074
	Mommenheim	Sépulture	S3	Bracelet B.-A. var. B2	88,5	9,84	1	< 0,029	<b>0,15</b>	< 0,0049	<b>0,054</b>	<b>0,017</b>	<b>0,47</b>
Mulhouse	Sépulture	M3	Bracelet B.-A. var. B1	87,1	12	0,82	< 0,039	<b>0,27</b>	< 0,0026	<b>0,0089</b>	< 0,01	<b>0,21</b>	< 0,031
		M4		89,2	10,1	0,71	< 0,023	<b>0,26</b>	< 0,0037	<b>0,011</b>	< 0,014	<b>0,21</b>	< 0,034
Nonnenweier	Sépulture	F3	Anneau ch.	88,3	4,99	7,12	< 0,015	< 0,12	< 0,0056	<b>0,0665</b>	<b>0,017</b>	<b>0,17</b>	< 0,016
		F4		87,8	7,26	5,28	< 0,03	< 0,17	< 0,0076	<b>0,049</b>	< 0,017	<b>0,16</b>	< 0,048
		F4bis		88,4	6,96	4,3	< 0,031	< 0,11	< 0,0048	<b>0,044</b>	<b>0,016</b>	<b>0,16</b>	< 0,024
Ohlungen	T3S16	H38	Torque	71	6,49	22,3	< 0,062	< 0,31	< 0,0056	< 0,0067	< 0,0024	<b>0,088</b>	< 0,066
Rosheim	NR	S4	Bracelet B.-A. var. A1	91,4	8,8	0,99	< 0,016	<b>0,77</b>	< 0,0038	<b>0,073</b>	< 0,01	<b>0,12</b>	< 0,0088
Scherzheim	NR	K1	Bracelet B.-A. var. B2	86,3	12,3	1,57	<b>0,12</b>	<b>0,15</b>	< 0,0028	<b>0,0083</b>	<b>0,017</b>	<b>0,18</b>	< 0,088
Schirrhein – Fischerhubel et Kurzgeländ	Sépulture	T1S4	Torque	84,3	12,1	0,97	<b>0,071</b>	< 0,047	< 0,0052	<b>0,12</b>	<b>0,024</b>	<b>0,14</b>	< 0,069
		T6S3		83,3	7,16	7,94	< 0,028	< 0,2	< 0,0035	<b>0,084</b>	< 0,021	<b>0,25</b>	< 0,087
		T8S9		92,9	3,77	0,81	< 0,04	< 0,059	< 0,0059	< 0,0028	< 0,014	<b>0,25</b>	< 0,11
		T9S1		H3	Bracelet B.-A. var. A1	86,6	14,7	1,01	< 0,032	<b>0,47</b>	< 0,005	<b>0,0055</b>	< 0,006
<b><i>Söllingen</i></b>	<b><i>NR</i></b>	<b><i>K3</i></b>	<b><i>Bracelet B.-A. var. B2</i></b>	<b><i>37,9</i></b>	<b><i>3,48</i></b>	<b><i>45,2</i></b>	<b><i>1,32</i></b>	<b><i>1,42</i></b>	<b><i>&lt; 0,01</i></b>	<b><i>0,1</i></b>	<b><i>&lt; 0,016</i></b>	<b><i>0,07</i></b>	<b><i>&lt; 0,12</i></b>
Weissensee et Oberfeld	T38S2	H41	Torque	86,1	12,7	0,65	< 0,034	<b>0,33</b>	< 0,0091	<b>0,31</b>	< 0,01	<b>0,18</b>	< 0,065

**Tabl. 1** – Résultats des analyses PIXE effectuées sur les parures annulaires hallstattiennes du Rhin supérieur. Résultats en pourcentage massique. Les teneurs inférieures aux limites de détection sont reportées en gris clair. Mg, Al, Si, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Sr, Zr ne figurent pas dans le tableau (si présents, issus du sol d'enfouissement). Les lignes en gras et italique correspondent aux seules analyses où plusieurs de ces éléments ont été détectés en forte teneur (contamination par les produits de corrosion). N. R. = structure non renseignée.

**Table 1** – PIXE results obtained on the Early Iron Age ring ornaments from the Upper Rhine valley. Results in weight percent. Levels below the detection limit are written in light grey. Mg, Al, Si, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Sr, Zr are not reported (if present, they originate from the soil). Lines written in bold and italic correspond to analyses where several of these elements were detected at high levels (coming from the corrosion products). (N. R. = unknown structure).

Site	Structure	N°	Type objet	As	Se	Ag	Cd	In	Sb	Te	Au	Hg	Bi
Birckwald	NR	H1	Bracelet B.-A. var. B2	0,45	< 0,0059	<b>0,37</b>	< 0,021	< 0,022	<b>1,05</b>	< 0,031	< 0,021	< 0,042	< 0,027
		H2		1,02	< 0,015	<b>0,83</b>	< 0,012	< 0,011	<b>1,49</b>	< 0,023	< 0,051	< 0,075	< 0,18
Bourgheim	Sépulture	S6	Anneau ch. à concavités	0,42	< 0,017	<b>0,19</b>	< 0,011	< 0,016	<b>0,22</b>	< 0,019	< 0,055	< 0,065	< 0,22
		S7		0,49	< 0,021	<b>0,29</b>	< 0,016	< 0,01	<b>0,42</b>	< 0,02	< 0,072	< 0,08	< 0,34
Donauberg	T6S2	H14	Torque	0,17	< 0,0068	<b>0,066</b>	< 0,01	< 0,027	<b>0,1</b>	< 0,04	< 0,024	< 0,03	< 0,012
		H16	Anneau ch. à concavités	0,3	< 0,023	<b>0,084</b>	< 0,037	< 0,043	< 0,034	< 0,053	< 0,16	< 0,087	< 0,27
		H17		0,33	< 0,0078	<b>0,088</b>	< 0,022	< 0,033	<b>0,092</b>	< 0,038	< 0,08	< 0,079	< 0,091
Endingen am Kaiserstuhl	Sépulture	F1	Bracelet B.-A. var. A1	0,045	< 0,0081	<b>0,054</b>	< 0,014	< 0,013	<b>0,1</b>	< 0,02	< 0,016	< 0,021	< 0,022
		F2		0,056	< 0,0066	<b>0,058</b>	< 0,021	< 0,0096	<b>0,088</b>	< 0,032	< 0,023	< 0,016	< 0,015
Haguenuau	Sépulture	M1	Bracelet B.-A. var. B2	0,3	< 0,0081	<b>0,26</b>	< 0,019	< 0,02	<b>0,51</b>	< 0,017	< 0,011	< 0,033	< 0,03
		M2		0,29	< 0,0055	<b>0,28</b>	< 0,016	< 0,019	<b>0,64</b>	< 0,019	< 0,012	< 0,051	< 0,031
Harthouse	T5S1	H10	Torque	0,2	< 0,025	<b>0,11</b>	< 0,019	< 0,026	< 0,062	< 0,031	< 0,11	< 0,026	< 0,23
		H8	Anneau ch.	0,21	< 0,04	<b>0,11</b>	< 0,021	< 0,024	< 0,051	< 0,042	< 0,12	< 0,067	< 0,14
		H9		0,23	< 0,038	<b>0,093</b>	< 0,031	< 0,025	< 0,097	< 0,055	< 0,12	< 0,06	< 0,27
	T10S1	H6	Bracelet fermé	0,15	< 0,019	<b>0,1</b>	< 0,021	< 0,012	<b>0,14</b>	< 0,02	< 0,06	< 0,07	< 0,23
		H7	Anneau ch.	0,17	< 0,037	<b>0,086</b>	< 0,02	< 0,035	< 0,087	< 0,045	< 0,12	< 0,096	< 0,11
	T12S6	H11	Torque	0,18	< 0,018	<b>0,082</b>	< 0,02	< 0,016	< 0,059	< 0,046	< 0,06	< 0,079	< 0,21
	T12S7	H12	Bracelet fermé	0,091	< 0,0072	<b>0,11</b>	< 0,023	< 0,033	<b>0,12</b>	< 0,044	< 0,024	< 0,017	< 0,021
H13		0,14		< 0,0092	<b>0,088</b>	< 0,028	< 0,032	< 0,08	< 0,021	< 0,027	< 0,045	< 0,02	
Heidolsheim	Tumulus	S1	Bracelet B.-A. var. B1	0,55	< 0,012	<b>0,47</b>	< 0,0094	< 0,014	<b>0,98</b>	< 0,017	< 0,033	< 0,051	< 0,085
		S5	Bracelet B.-A. var. A1	0,19	< 0,0075	<b>0,34</b>	< 0,013	< 0,017	<b>0,52</b>	< 0,01	< 0,041	< 0,022	< 0,028
Hochfelden	NR	S2	Bracelet B.-A. var. B2	0,47	< 0,0095	<b>0,4</b>	< 0,019	< 0,014	<b>0,59</b>	< 0,019	< 0,027	< 0,044	< 0,062
<b><i>Hügelsheim</i></b>	<b><i>NR</i></b>	<b><i>K2</i></b>	<b><i>Bracelet B.-A. var. A1</i></b>	<b><i>0,78</i></b>	<b><i>&lt; 0,024</i></b>	<b><i>1,78</i></b>	<b><i>&lt; 0,057</i></b>	<b><i>&lt; 0,069</i></b>	<b><i>0,73</i></b>	<b><i>&lt; 0,086</i></b>	<b><i>&lt; 0,14</i></b>	<b><i>&lt; 0,12</i></b>	<b><i>&lt; 0,13</i></b>
Ihringen	Tumulus	R1	Bracelet B.-A. var. A1	0,2	< 0,0055	<b>0,14</b>	< 0,022	< 0,04	<b>0,24</b>	< 0,047	< 0,046	< 0,04	< 0,04
Ihringen – Löhbücker	Sépulture	R3	Bracelet B.-A. var. B2	0,5	< 0,0091	<b>0,4</b>	< 0,026	< 0,034	<b>0,84</b>	< 0,047	< 0,038	< 0,061	< 0,071
		R4		0,48	< 0,017	<b>0,35</b>	< 0,028	< 0,015	<b>0,84</b>	< 0,058	< 0,072	< 0,11	< 0,073
	Tum Z	R6	Anneau ch.	0,32	< 0,011	<b>0,21</b>	< 0,027	< 0,01	<b>0,3</b>	< 0,052	< 0,068	< 0,04	< 0,074
	Tumulus	R2	Bracelet B.-A. var. B2	0,2	< 0,0049	<b>0,13</b>	< 0,024	< 0,036	<b>0,26</b>	< 0,054	< 0,031	< 0,059	< 0,021
		R5	Anneau ch.	0,19	< 0,022	<b>0,1</b>	< 0,022	< 0,035	<b>0,13</b>	< 0,055	< 0,11	< 0,034	< 0,17
Illfurth	US 219 ou 220, zone 48	M6	Anneau brut	0,19	< 0,02	<b>0,12</b>	< 0,019	< 0,016	<b>0,13</b>	< 0,03	< 0,068	< 0,035	< 0,16
	Zone 6 et 9, US 36	M7	Arbre de coulée	0,25	< 0,0025	<b>0,15</b>	< 0,0088	< 0,01	<b>0,25</b>	< 0,023	< 0,0087	< 0,044	<b>0,083</b>
	Zone 6 et 9, US 39 ou 40	M5	Lingot	0,72	< 0,004	<b>0,67</b>	< 0,0076	< 0,015	<b>1,27</b>	< 0,018	< 0,035	< 0,06	< 0,08
Koenigsbruck	T12S2	H15	Torque	0,26	< 0,011	<b>0,095</b>	< 0,032	< 0,018	<b>0,11</b>	< 0,019	< 0,032	< 0,049	< 0,065
		H18	Bracelet fermé	0,15	< 0,007	<b>0,12</b>	< 0,0093	< 0,031	<b>0,2</b>	< 0,047	< 0,032	< 0,05	< 0,028
	H19	0,24		< 0,0032	<b>0,12</b>	< 0,023	< 0,022	<b>0,21</b>	< 0,039	< 0,012	< 0,035	< 0,04	
	H20	Anneau ch.		0,092	< 0,0075	<b>0,097</b>	< 0,019	< 0,032	<b>0,11</b>	< 0,037	< 0,025	< 0,027	< 0,027
	H21		0,1	< 0,013	<b>0,11</b>	< 0,025	< 0,026	<b>0,14</b>	< 0,048	< 0,039	< 0,042	< 0,023	
T18S5	H4	Bracelet B.-A. var. B2	0,59	< 0,0028	<b>0,59</b>	< 0,014	< 0,018	<b>1,14</b>	< 0,016	< 0,029	< 0,045	< 0,014	
	H5		0,66	< 0,0078	<b>0,61</b>	< 0,028	< 0,026	<b>1,09</b>	< 0,051	< 0,045	< 0,06	< 0,023	
Maegstüb	T1S1	H22	Bracelet fermé	0,075	< 0,013	<b>0,068</b>	< 0,03	< 0,049	< 0,065	< 0,068	< 0,052	< 0,018	< 0,023
		H23	Anneau ch.	0,049	< 0,011	<b>0,071</b>	< 0,026	< 0,031	< 0,043	< 0,013	< 0,041	< 0,026	< 0,024
	T2S2	H24	Bracelet fermé	0,19	< 0,04	<b>0,09</b>	< 0,016	< 0,01	<b>0,1</b>	< 0,032	< 0,12	< 0,063	< 0,14
		H25		0,17	< 0,014	<b>0,077</b>	< 0,026	< 0,03	< 0,069	< 0,028	< 0,047	< 0,033	< 0,031
	H26	Bracelet fermé	0,18	< 0,013	<b>0,1</b>	< 0,022	< 0,023	< 0,087	< 0,034	< 0,062	< 0,066	< 0,17	
			H27	Anneau ch.	0,21	< 0,016	<b>0,091</b>	< 0,019	< 0,024	< 0,024	< 0,027	< 0,048	< 0,059
	H28	0,19	< 0,027		<b>0,094</b>	< 0,021	< 0,014	<b>0,073</b>	< 0,041	< 0,089	< 0,065	< 0,16	
	H29	Bracelet fermé	0,086	< 0,024	< 0,03	< 0,016	< 0,0065	< 0,019	< 0,037	< 0,11	< 0,037	< 0,29	
			H30	Anneau ch. à concavités	0,17	< 0,018	<b>0,099</b>	< 0,019	< 0,023	< 0,073	< 0,021	< 0,059	< 0,044
		H31	0,19		< 0,015	<b>0,093</b>	< 0,017	< 0,0082	< 0,073	< 0,043	< 0,052	< 0,042	< 0,15
		H32	Bracelet fermé	0,19	< 0,019	<b>0,1</b>	< 0,016	< 0,02	<b>0,1</b>	< 0,035	< 0,052	< 0,077	< 0,2
	H33			0,23	< 0,057	<b>0,081</b>	< 0,02	< 0,02	< 0,037	< 0,023	< 0,15	< 0,096	< 0,23
	H34			Anneau ch. à concavités	0,22	< 0,033	<b>0,093</b>	< 0,026	< 0,024	<b>0,13</b>	< 0,045	< 0,092	< 0,067
	H35	Anneau ch.	0,2	< 0,015	<b>0,072</b>	< 0,026	< 0,025	<b>0,15</b>	< 0,048	< 0,13	< 0,053	< 0,16	
	H36	Torque	0,22	< 0,02	<b>0,086</b>	< 0,02	< 0,022	<b>0,11</b>	< 0,036	< 0,045	< 0,063	< 0,16	
Mommenheim	Sépulture	S3	Bracelet B.-A. var. B2	0,45	< 0,0051	<b>0,64</b>	< 0,015	< 0,016	<b>1,15</b>	< 0,026	< 0,021	< 0,038	< 0,018
Mulhouse	Sépulture	M3	Bracelet B.-A. var. B1	0,15	< 0,0045	<b>0,16</b>	< 0,02	< 0,015	<b>0,33</b>	< 0,023	< 0,031	< 0,021	< 0,015
		M4		0,16	< 0,0057	<b>0,14</b>	< 0,019	< 0,021	<b>0,24</b>	< 0,027	< 0,012	< 0,033	< 0,022
Nonnenweier	Sépulture	F3	Anneau ch.	0,18	< 0,007	<b>0,15</b>	< 0,011	< 0,0024	<b>0,21</b>	< 0,0097	< 0,025	< 0,039	< 0,045
		F4		0,27	< 0,0075	<b>0,18</b>	< 0,0094	< 0,021	<b>0,17</b>	< 0,03	< 0,028	< 0,044	< 0,034
		F4bis		0,2	< 0,0032	<b>0,15</b>	< 0,016	< 0,005	<b>0,23</b>	< 0,016	< 0,011	< 0,041	< 0,022
Ohlungen	T3S16	H38	Torque	0,18	< 0,02	<b>0,08</b>	< 0,022	< 0,018	< 0,033	< 0,02	< 0,062	< 0,068	< 0,21
Rosheim	NR	S4	Bracelet B.-A. var. A1	0,069	< 0,0054	<b>0,081</b>	< 0,014	< 0,021	<b>0,072</b>	< 0,03	< 0,028	< 0,03	< 0,03
Scherzheim	NR	K1	Bracelet B.-A. var. B2	0,22	< 0,0083	<b>0,14</b>	< 0,021	< 0,029	<b>0,27</b>	< 0,041	< 0,036	< 0,034	< 0,044
Schirrhein – Fischerhubel et Kurzgeland	T1S4	H37	Torque	0,38	< 0,0076	<b>0,2</b>	< 0,018	< 0,031	<b>0,24</b>	< 0,048	< 0,029	< 0,075	< 0,076
	T6S3	H39		0,24	< 0,049	<b>0,14</b>	< 0,026	< 0,031	<b>0,17</b>	< 0,024	< 0,16	< 0,068	< 0,14
	T8S9	H40		0,35	< 0,008	<b>0,38</b>	< 0,021	< 0,026	<b>0,79</b>	< 0,038	< 0,035	< 0,091	0,11
	T9S1	H3		Bracelet B.-A. var. A1	0,35	< 0,0076	<b>0,12</b>	< 0,022	< 0,02	<b>0,15</b>	< 0,027	< 0,032	< 0,056
<b><i>Söllingen</i></b>	<b><i>NR</i></b>	<b><i>K3</i></b>	<b><i>Bracelet B.-A. var. B2</i></b>	<b><i>0,62</i></b>	<b><i>&lt; 0,083</i></b>	<b><i>0,88</i></b>	<b><i>&lt; 0,039</i></b>	<b><i>&lt; 0,061</i></b>	<b><i>0,79</i></b>	<b><i>&lt; 0,089</i></b>	<b><i>&lt; 0,25</i></b>	<b><i>&lt; 0,3</i></b>	<b><i>&lt; 0,23</i></b>
Weissensee et Oberfeld	T38S2	H41	Torque	0,19	< 0,0095	<b>0,14</b>	< 0,032	< 0,048	<b>0,3</b>	< 0,076	< 0,023	< 0,048	< 0,049

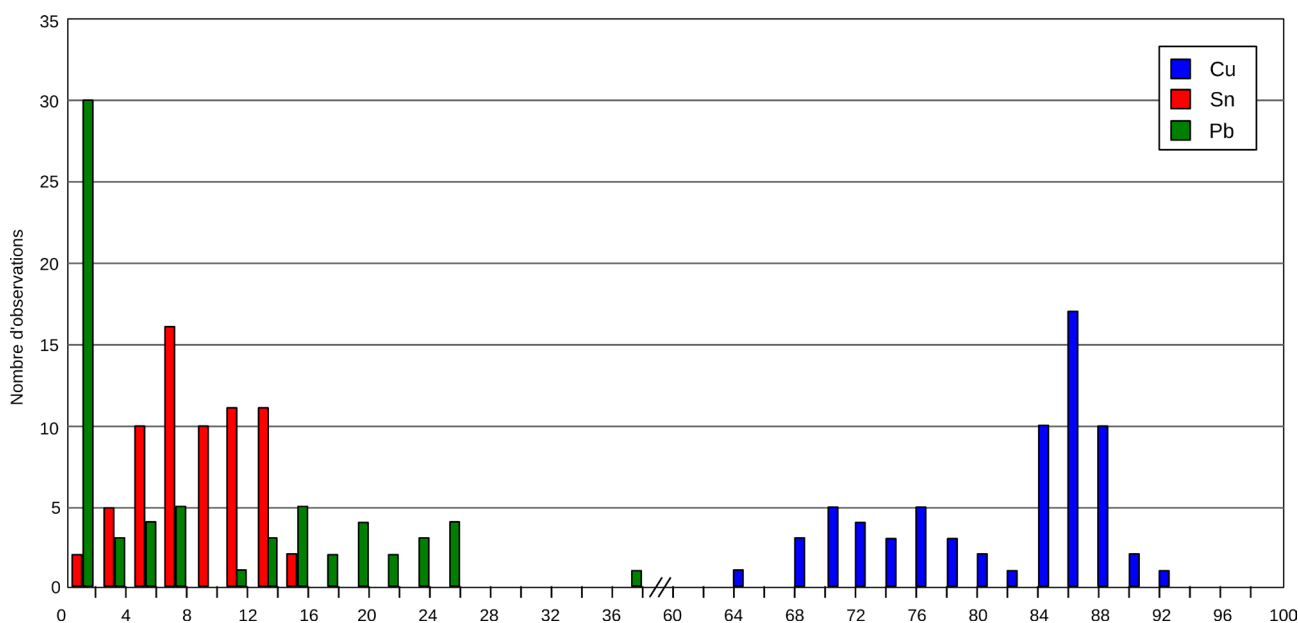
**Tabl. 1 (suite et fin)** – Résultats des analyses PIXE effectuées sur les parures annulaires hallstattiennes du Rhin supérieur. Résultats en pourcentage massique. Les teneurs inférieures aux limites de détection sont reportées en gris clair. Mg, Al, Si, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Sr, Zr ne figurent pas dans le tableau (si présents, issus du sol d’enfouissement). Les lignes en gras et italique correspondent aux seules analyses où plusieurs de ces éléments ont été détectés en forte teneur (contamination par les produits de corrosion). N. R. = structure non renseignée.

**Table 1 (end)** – PIXE results obtained on the Early Iron Age ring ornaments from the Upper Rhine valley. Results in weight percent. Levels below the detection limit are written in light grey. Mg, Al, Si, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Sr, Zr are not reported (if present, they originate from the soil). Lines written in bold and italic correspond to analyses where several of these elements were detected at high

	Cu	Sn	Pb
Minimum	64,5	1,02	0,16
1 <sup>er</sup> quartile	72,8	5,81	1
Médiane	83,3	7,77	6,68
3 <sup>e</sup> quartile	87,18	11,45	18,4
Maximum	92,9	15,8	36,6
Moyenne	82,2	8,45	8,61
Écart-type	7,13	3,39	9,21

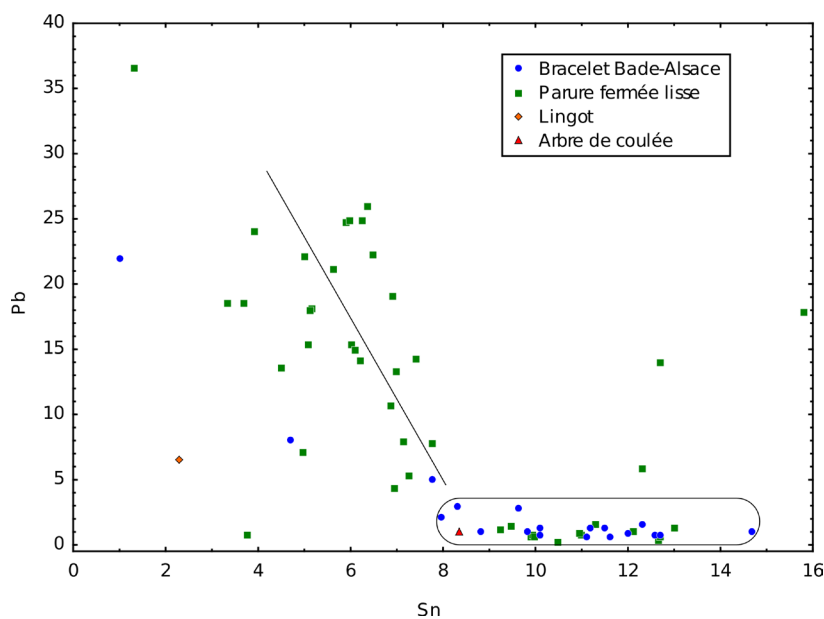
**Tabl. 2** – Statistiques descriptives des teneurs des composants de l’alliage : cuivre (Cu), étain (Sn) et plomb (Pb).

**Table 2** – Descriptive statistics for the alloy components: copper (Cu), tin (Sn) and lead (Pb).



**Fig. 6** – Histogramme des teneurs en cuivre (Cu), étain (Sn) et plomb (Pb) pour l’ensemble du corpus.

**Fig. 6** – Histogram of the copper (Cu), tin (Sn) and lead (Pb) contents for all the objects.



**Fig. 7** – Distribution comparée de l’étain (Sn) et du plomb (Pb), illustrant l’homogénéité de la composition des bracelets de type Bade-Alsace. La droite de dilution du plomb montre une corrélation négative entre le plomb et l’étain.

**Fig. 7** – Compared distribution of tin (Sn) and lead (Pb), showing the homogeneity of the composition of Bade-Alsace type arm rings. The dilution line displays a negative correlation between lead and tin.

Le mobilier se répartit de manière cohérente entre ces différents types d'alliage (fig. 8). Ainsi, les bracelets Bade-Alsace de la variante A1 possèdent une faible teneur en plomb, et appartiennent exclusivement aux alliages de type 1a et 1b ; de même, deux des trois bracelets de la variante B1 appartiennent au type 1a, le troisième étant de type 4. Les douze bracelets de la variante B2 ont une répartition plus lâche et cela concerne principalement les groupes 1a, 1b et 2 ; même lorsqu'il y a ajout de plomb, le schéma de composition conserve l'étain comme composant secondaire principal (à l'exception de l'exemplaire de Birckwald, Bas-Rhin).

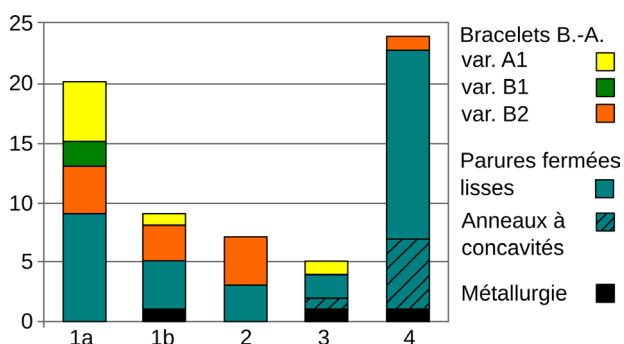


Fig. 8 – Distribution du mobilier entre les types d'alliages en fonction des variantes typologiques.

Fig. 8 – Distribution of the objects among the alloy types according to typological variants.

À l'inverse, les parures fermées et lisses se retrouvent majoritairement dans les alliages où le plomb domine l'étain, soient les types 3 et 4. Cependant, on les retrouve également dans une moindre mesure dans les types 1a, 1b et 2, montrant la variabilité des matériaux employés pour leur réalisation. À noter que les anneaux de cheville à concavités se retrouvent presque exclusivement dans le type 4 ; l'emploi d'un matériau distinct tend à confirmer leur statut de variante morphologique, plutôt que leur attribution à un phénomène d'usure. Finalement, le lingot et l'anneau brut de fonte du Britzgyberg appartiennent aux types 3 et 4, tandis que l'arbre de coulée est composé d'un alliage de type 1b, dans lequel le plomb est *a priori* présent de manière involontaire.

Une tendance chronologique se dessine dans cette distribution, qu'il conviendrait de confirmer à l'aide d'un plus grand nombre d'analyses et d'un éventail de types plus varié. Les parures datées du Ha C2 au Ha D1 (bracelets de type Bade-Alsace et parures fermées lisses) ont ainsi des alliages à la composition plus classique, où le plomb dépasse rarement 6% et ne domine jamais l'étain. Au contraire, la grande majorité des bronzes au plomb correspond à des pièces datées du Ha D2 ou du Ha D3, où le plomb est présent en quantité modérée à forte et domine l'étain ; il s'agit presque exclusivement de parures annulaires fermées lisses. Il semblerait donc que l'ajout massif de plomb se généralise au cours du VI<sup>e</sup> siècle avant notre ère, mais cette proposition requiert cependant de plus amples investigations.

## Impuretés et autres éléments-traces

Les éléments retenus pour caractériser la composition du métal sont le soufre, le fer, le cobalt, le nickel, l'arsenic, l'argent, l'antimoine, le phosphore et le bismuth<sup>(2)</sup> (tabl. 3). L'examen des matrices de corrélations (méthode de Pearson) montre un fonctionnement conjoint du nickel, de l'arsenic, de l'argent et de l'antimoine avec le cuivre, confirmant leur statut d'impuretés liées à ce métal (Rychner et Kläntschi, 1995, p. 13).

	S	Fe	Co	Ni	As	Ag	Sb
Minimum	0	0	0	0	0,05	0	0
1 <sup>er</sup> quartile	0	0,01	0	0,09	0,18	0,09	0,07
Médiane	0	0,03	0	0,14	0,21	0,12	0,16
3 <sup>e</sup> quartile	0,31	0,08	0,02	0,2	0,35	0,22	0,4
Maximum	0,77	0,31	0,06	0,78	1,02	0,83	1,49
Moyenne	0,13	0,04	0,01	0,2	0,26	0,19	0,29
Écart-type	0,18	0,06	0,01	0,16	0,17	0,17	0,37

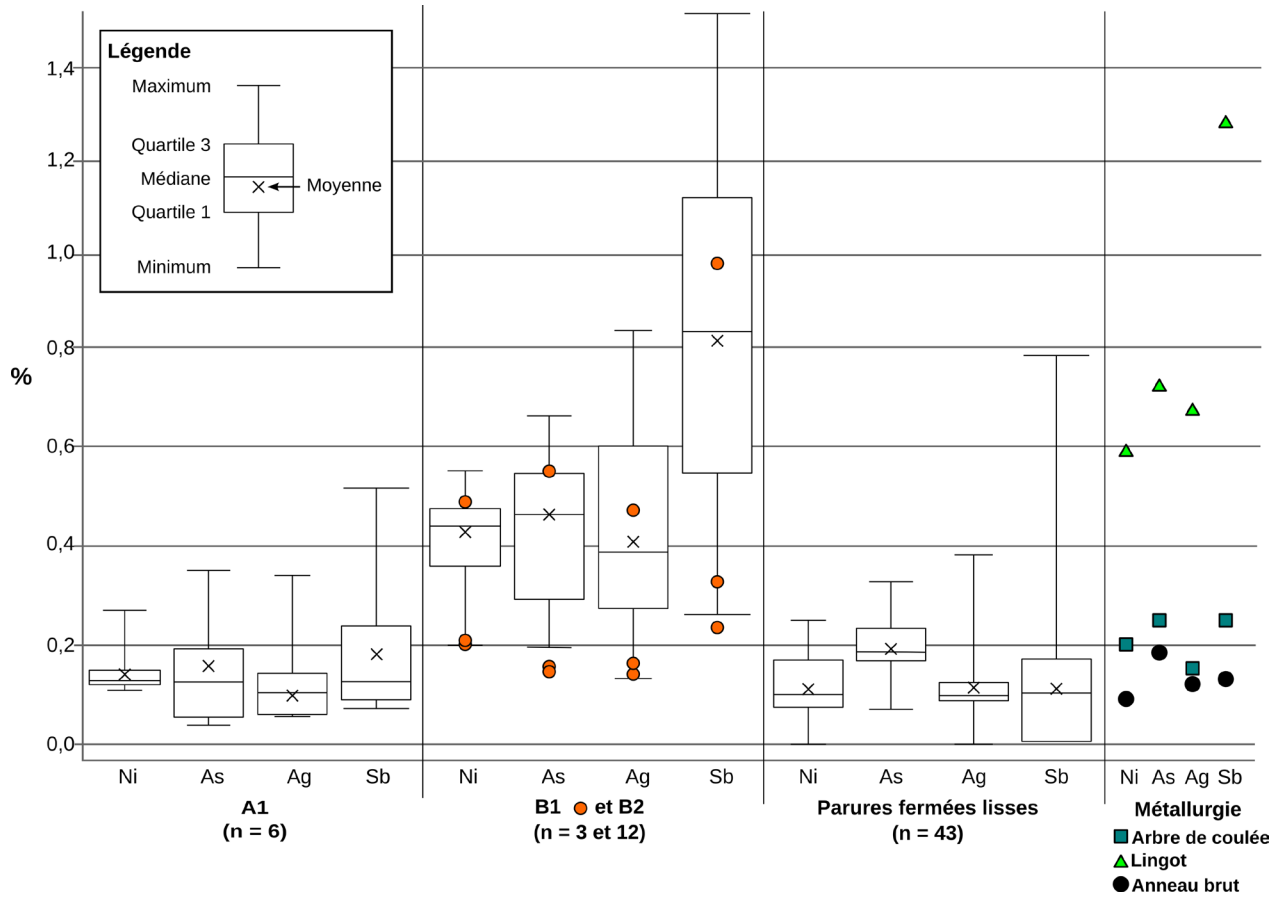
Tabl. 3 – Statistiques descriptives des teneurs en éléments-traces : soufre (S), fer (Fe), cobalt (Co), nickel (Ni), arsenic (As), argent (Ag) et antimoine (Sb).

Table 3 – Descriptive statistics for the trace elements: sulphur (S), iron (Fe), cobalt (Co), nickel (Ni), arsenic (As), silver (Ag) and antimony (Sb).

Des différences dans les taux de nickel, arsenic, argent et antimoine sont visibles selon le type d'objet (fig. 9). Les bracelets de type Bade-Alsace variante A1 sont ainsi particulièrement pauvres en impuretés, et ont une teneur homogène en ces éléments. Au contraire, les bracelets de la variante B2 montrent des taux plus élevés et plus dispersés, notamment pour l'antimoine. Les trois bracelets de la variante B1 s'insèrent dans ces valeurs, avec cependant une tendance aux teneurs plus faibles. Les teneurs moyennes des parures annulaires fermées lisses sont également basses, sous la barre des 0,4%, à une exception près ; elles se rapprochent ainsi des bracelets de la variante A1, tout en conservant une dispersion des valeurs plus large.

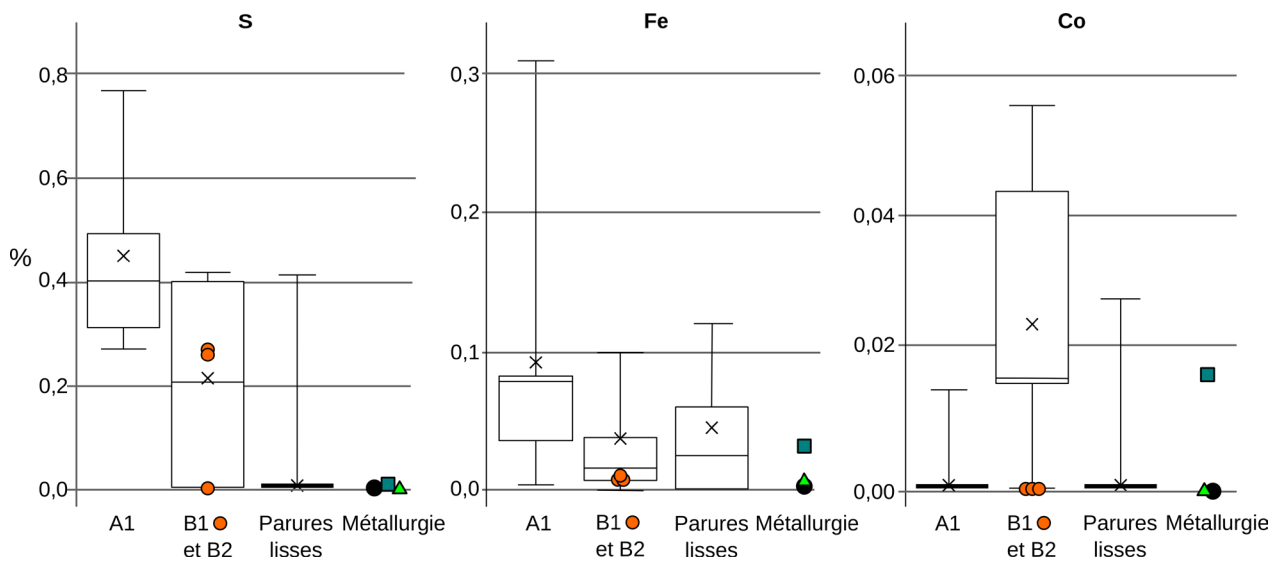
Les témoins du travail métallurgique au Britzgyberg fournissent d'intéressants éléments de comparaison. Ainsi, l'anneau brut de fonte et l'arbre de coulée montrent des teneurs plutôt faibles en nickel, arsenic, argent et antimoine, qui les rapprochent de la variante A1 des bracelets de type Bade-Alsace et des parures annulaires fermées lisses. Le fragment de lingot est isolé du reste du corpus en raison de ses teneurs élevées en nickel, arsenic et argent.

Une seconde corrélation positive, mais plus discrète, est visible entre le soufre, le fer et le cobalt. La distribution de ces éléments est moins tranchée que précédemment, mais montre tout de même des différences (fig. 10). Ainsi, les bracelets de type A1 se caractérisent par de plus fortes teneurs en soufre et en fer ; à l'inverse, les parures



**Fig. 9** – Teneurs en nickel (Ni), arsenic (As), argent (Ag) et antimoine (Sb) selon le type d’objet. Les bracelets de type Bade-Alsace variante B1 et les témoins d’activités métallurgiques sont trop peu nombreux pour être représentés par des boîtes de dispersion et sont donc illustrés par des symboles.

**Fig. 9** – Nickel (Ni), arsenic (As), silver (Ag) and antimony (Sb) contents, by object types. The Bade-Alsace variant B1 arm rings and metallurgical remains are too few to be represented in box-plot charts, and are thus represented by symbols.



**Fig. 10** – Teneurs en soufre (S), fer (Fe) et cobalt (Co) selon le type d’objet. Objets liés à la métallurgie : arbre de coulée (carré), lingot (triangle) et anneau brut de fonte (cercle).

**Fig. 10** – Sulphur (S), iron (Fe) and cobalt (Co) contents by object types. Objects related to metallurgy: casting sprue (square), ingot (triangle) and ring, as cast (circle).

fermées lisses, l'anneau brut de fonte et l'arbre de coulée possèdent des taux très bas, avoisinant les valeurs nulles. Les teneurs des bracelets de type Bade-Alsace variante B2 possèdent une dispersion assez large; la variante B1 se distingue par des taux faibles en fer et en cobalt. La singularité du fragment de lingot se confirme à nouveau, par sa teneur plus élevée en cobalt et en fer.

### Synthèse des résultats

La caractérisation archéométallurgique du corpus montre des différences nettes dans la composition chimique du matériau selon la typologie. Les bracelets de type Bade-Alsace de variante A1 sont ainsi réalisés dans un matériau comportant relativement peu d'impuretés à l'exception du soufre, suivant la recette classique du bronze à

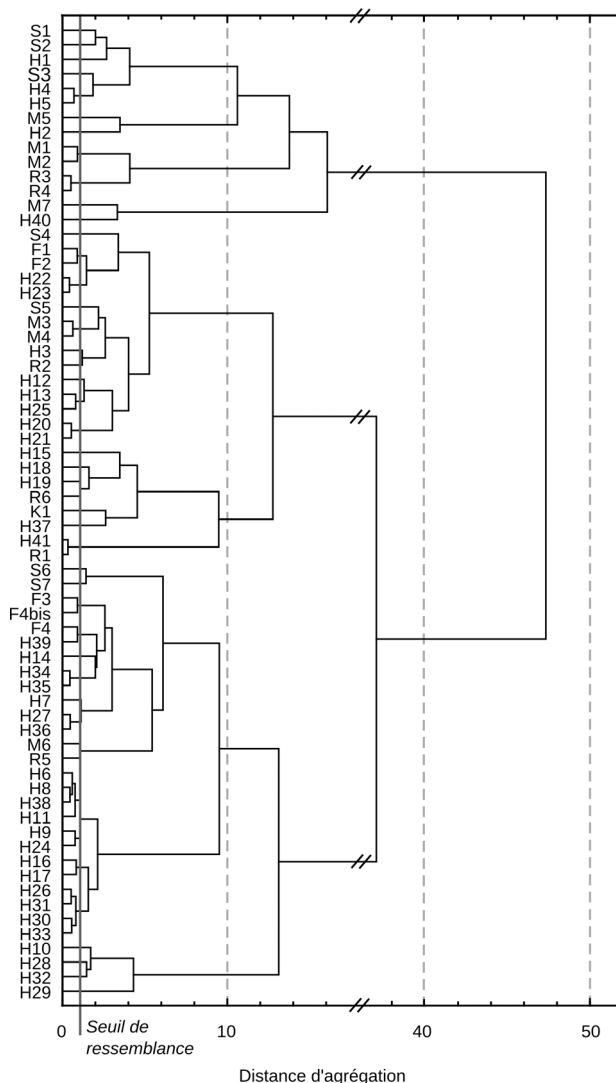


Fig. 11 – Classification ascendante hiérarchique des soixante-sept prélèvements, basée sur neuf éléments-traces et les deux éléments d'alliage (P, S, Fe, Co, Ni, As, Ag, Sn, Sb, Pb, Bi).

Fig. 11 – Hierarchical clustering of the sixty-seven samples, based on nine trace elements and the two alloying elements (P, S, Fe, Co, Ni, As, Ag, Sn, Sb, Pb, Bi).

l'étain. Les teneurs en éléments-traces sont assez homogènes, contrairement à celles des variantes B1 et B2, où elles sont non seulement plus dispersées, mais également beaucoup plus élevées.

Les bracelets de la variante B2 sont visiblement produits à l'aide d'un cuivre de sources différentes que la variante A1, avec un taux de plomb lui aussi variable, qui peut résulter du recyclage de bronzes possédant parfois déjà une certaine teneur en plomb. La variante B1 s'intègre dans ce même schéma, mais montre une tendance à des taux d'impuretés et de plomb plus faibles; cette observation pourrait être due à une sous-représentation statistique, ou être liée à une volonté d'utiliser un bronze plus propre pour des contraintes techniques, et notamment l'obtention d'une plaque fine pour la réalisation du jonc. Il importe de vérifier cette observation par l'analyse d'un plus grand nombre de bracelets de cette variante.

Les parures fermées lisses ont des teneurs en impuretés similaires aux bracelets de variante A1, à l'exception de l'arsenic et du soufre. Leur dispersion est cependant plus grande, montrant un choix moins strict quant à la pureté du matériau. Le plomb est l'élément qui distingue ces parures du reste du corpus, celui-ci jouant un rôle très important dans le matériau, parallèlement à des taux de soufre et de cobalt généralement bas.

Finalement, le fragment de lingot du Britzgyberg se place tout à fait à l'écart du corpus étudié; il est paradoxalement composé d'un fort taux de plomb, d'une faible teneur en étain et de teneurs hautes en nickel, arsenic, argent et antimoine. Ce schéma d'impuretés est généralement associé aux alliages à faible teneur en plomb. Ce lingot ne peut donc être directement relié aux parures annulaires du Rhin supérieur, puisqu'il ne peut être issu de leur refonte, pas plus qu'il ne peut en représenter une éventuelle source de matière première. L'arbre de coulée et l'anneau brut sont pour leur part similaires aux parures fermées lisses, dont ils sont probablement contemporains.

## COMPARAISONS

### À l'échelle régionale : les compositions jumelles

Contrairement à la démarche originellement adoptée par V. Rychner et N. Kläntzchi (calcul pour chaque élément chimique du coefficient de variation, et cela pour chaque paire d'objets à tester), nous avons eu recours aux techniques statistiques multivariées pour mesurer la ressemblance entre les objets. Cela permet non seulement une recherche plus systématique (toutes les combinaisons possibles sont testées), mais également une mesure plus fiable du degré de ressemblance entre les objets. La recherche des compositions jumelles s'est appuyée sur une classification ascendante hiérarchique (CAH) des données de composition. Les données ont été centrées et réduites au préalable, de façon à ce que chaque élément chimique ait le même poids dans le traitement

de classification. La méthode d'agrégation de Ward a été choisie pour son potentiel fortement discriminant, la ressemblance entre deux objets étant mesurée par la distance euclidienne qui les sépare. La recherche des compositions jumelles a été réalisée d'une part en se basant sur les neuf éléments traces détectés par PIXE (jumeaux de lingot), et d'autre part sur les neuf mêmes éléments chimiques auxquels ont été ajoutés l'étain et le plomb (jumeaux de creuset). Malgré un seuil de ressemblance plutôt sévère (distance euclidienne inférieure ou égale à 1), la classification montre un grand nombre de compositions chimiques identiques pour les jumeaux de creuset (fig. 11), et *a fortiori* beaucoup plus encore pour les jumeaux de lingot. Ce grand nombre de compositions jumelles pose de nombreuses questions, car les implications archéologiques qui en découlent sont très importantes, en premier lieu desquelles le lien de stricte contemporanéité des objets jumeaux de creuset. Par ailleurs, et de même que pour les études de provenance, ce type de raisonnement ne fonctionne que par la négative : seules des compositions différentes garantissent que les compositions ne sont pas jumelles. Il est par contre possible que deux compositions identiques soient le fruit du hasard. Pour tester correctement la question des compositions jumelles, il convient donc d'élargir autant que faire se peut la gamme des éléments chimiques analysés, et de recourir aux techniques d'analyse élémentaire les plus précises et les plus sensibles possibles. Dans cette perspective, les analyses faites en PIXE mériteraient d'être complétées par une technique encore plus sensible et discriminante, de façon à asseoir la comparaison sur des bases encore plus solides. La comparaison serait en effet beaucoup plus robuste en se basant sur trente éléments chimiques, y compris des éléments en très faibles traces, plutôt que les neuf impuretés et les deux éléments d'alliage sur lesquels nous nous sommes basés.

Les interprétations présentées ci-dessous sont donc à considérer comme la première étape d'un travail qu'il faudra approfondir en priorité dans la suite de cette recherche, étant donné le grand nombre de réponses positives que nous avons obtenu. Pour cet article, nous n'approfondirons donc pas outre mesure l'étude des relations entre les objets, en particulier pour ce qui concerne les jumeaux de lingot, et limiterons essentiellement le propos aux jumeaux de creuset.

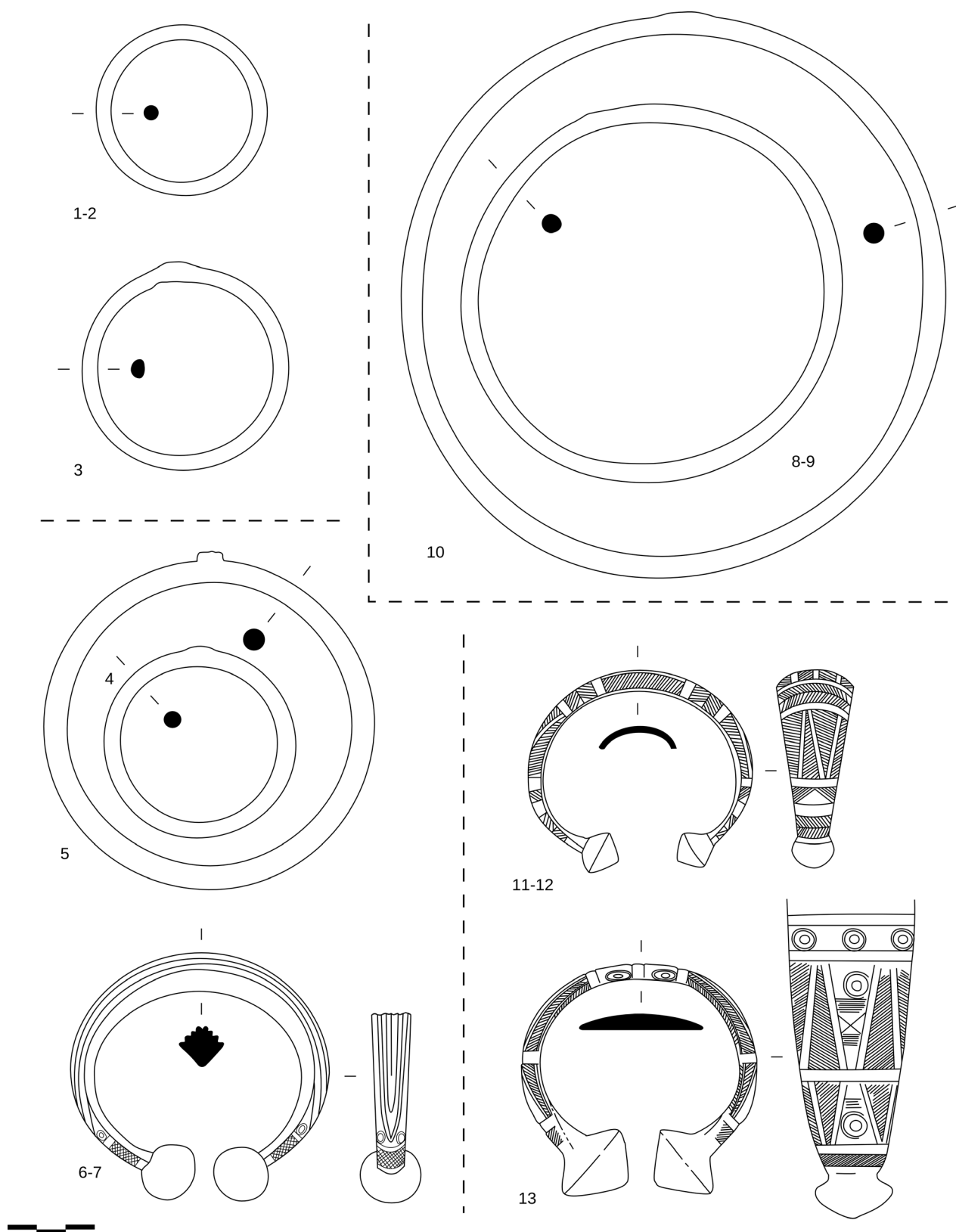
Plusieurs jumeaux de creuset sont également des paires archéologiques, à la fois pour les parures de type Bade-Alsace et les bracelets et anneaux de cheville fermés lisses. Ce premier résultat confirme la très forte unité formée par les parures d'une même paire, qu'il s'agisse des dimensions ou du décor et cette observation va dans le sens de leur fabrication simultanée. La lecture de la matrice des distances montre que le seuil statistique que nous avons choisi est sans doute trop sévère dans certains cas, car plusieurs paires d'objets rigoureusement identiques sont en effet exclues des résultats à quelques décimales près. Il s'agit exclusivement de parures fermées lisses (bracelets de Koenigsbruck, tumulus 18, sépulture 1; Maegstüb, tumulus 4, sépulture 1, et tumulus 20,

sépulture 1; anneaux de cheville de Nonnenweier), montrant la variabilité de composition des objets de ce type. Dans l'état actuel des données et par mesure de prudence, on préférera toutefois conserver un seuil statistique volontairement bas, afin d'éviter de créer des amalgames artificiels<sup>(3)</sup>, même si cela se fait au détriment de quelques véritables jumeaux de fabrication.

En dehors des paires archéologiques, il est à noter que les jumeaux de creuset concernent rarement les objets d'une même tombe : les torques, bracelets et anneaux de cheville d'un même individu sont produits lors de coulées distinctes et à partir d'un lingot de cuivre différent. Ce résultat peut aller dans le sens d'une mise en place progressive des éléments du costume au cours de la vie du porteur (Tremblay Cormier, sous presse), mais aussi révéler l'origine diversifiée des parures composant un même ensemble. Trois tombes de la nécropole de Maegstüb, Bas-Rhin, font exception : la sépulture 1 du tumulus 1 et la sépulture 1 du tumulus 4, dont les bracelets et anneaux de cheville sont des jumeaux de creuset, et la sépulture 1 du tumulus 20, où le torque, les bracelets et les anneaux de cheville sont potentiellement issus d'un même lingot. Au niveau typologique, les jumeaux de creuset concernent donc principalement des parures annulaires fermées lisses, en plus de la paire de variante A1 d'Endingen; s'y ajoute la parure de variante B1 de Mulhouse, qui est également jumelle d'un bracelet de la variante B2 d'Ihringen (fig. 12). Cette observation confirme la relation entre le matériau employé et la forme de l'objet, attestée ci-dessus par la relative homogénéité des compositions chimiques selon la typologie.

À l'échelle de la nécropole, les jumeaux de creuset peuvent se répartir entre plusieurs tombes. Le cas est visible à Harthouse et Maegstüb, Bas-Rhin, où il touche une part importante des ensembles analysés. Mais le résultat le plus surprenant est certainement l'extension du phénomène des compositions jumelles à l'échelle du Rhin supérieur, espace d'une longueur de 180 km, mettant en relation des nécropoles parfois éloignées (fig. 13). Les nécropoles du massif forestier de Haguenau (Donaueberg, Harthouse, Koenigsbruck, Maegstüb, Ohlungen, Schirrheimerweg et Weissensee) partagent ainsi de nombreux jumeaux de creuset; elles montrent l'existence d'un tissu de relations étroites entre les sites, en corrélation avec la très forte homogénéité de la culture matérielle. Si l'on doit aussi tenir compte des jumeaux de lingot, il se crée même des liens avec les ensembles d'Ihringen et Nonnenweier, dans le Bade-Wurtemberg.

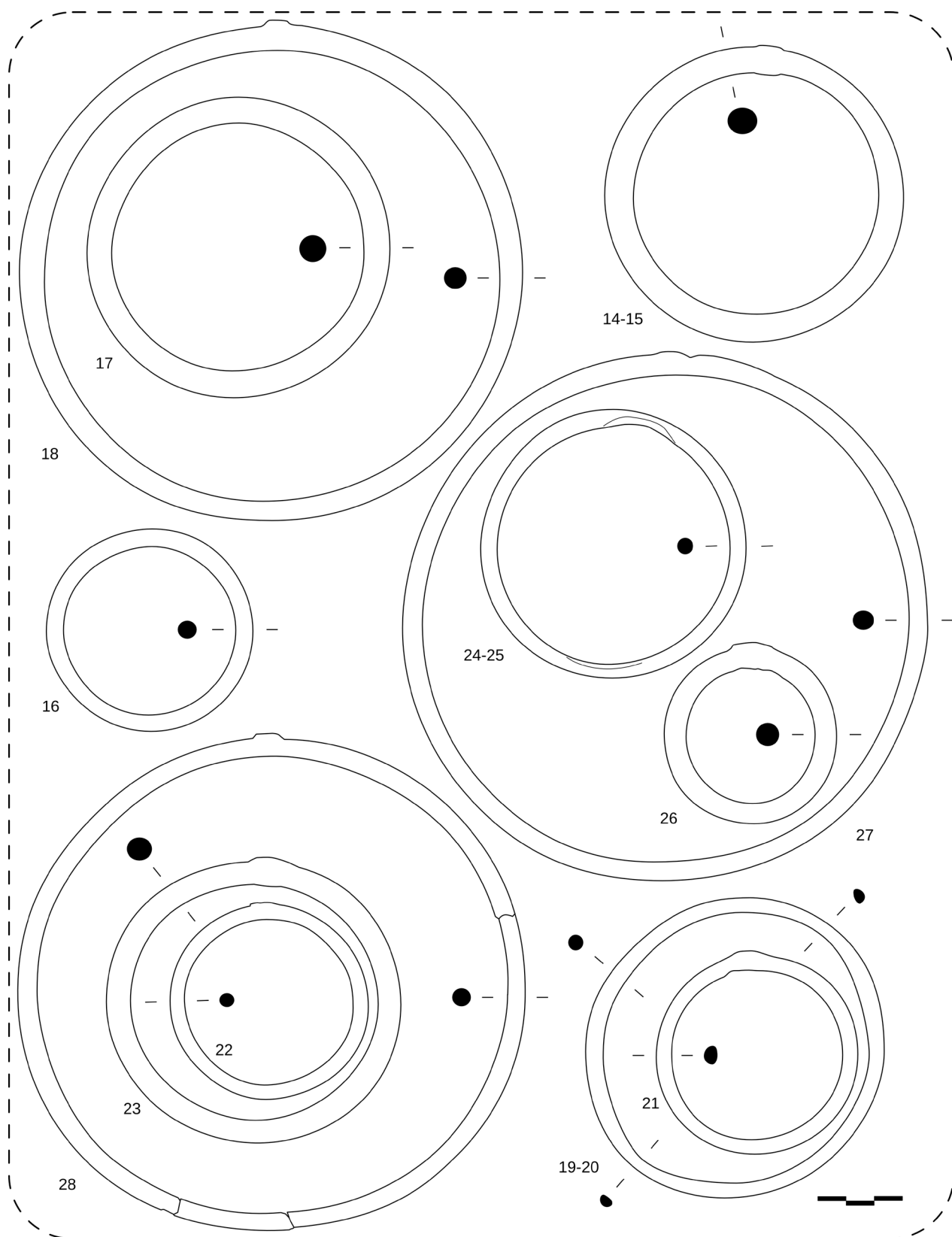
Particulièrement intéressant est l'anneau de jambe brut de fonte du Britzgyberg : celui-ci semble en effet produit à partir d'un cuivre similaire à celui des nécropoles haguenviennes, distantes de près de 150 km. Les teneurs en étain et en plomb diffèrent toutefois suffisamment pour qu'il ne s'agisse pas de jumeaux de creuset. Des analyses élémentaires plus approfondies seront nécessaires pour discuter l'éventualité de jumeaux de lingot avec cet objet. Paradoxalement, le fragment de lingot découvert sur ce même site ne possède aucun jumeau dans le corpus des objets analysés; la matière



**Fig. 12** – Jumeaux de creuset dans la vallée du Rhin supérieur au premier âge du Fer. 1-2 : Koenigsbruck 12/7, Bas-Rhin ; 3 : Maegstub 2/2, Bas-Rhin ; 4-5 : Maegstub 1/1, Bas-Rhin ; 6-7 : Endingen, Bade-W. ; 8-9 : Nonnenweier, Bade-W. ; 10 : Schirrheimerweg 6/3, Bas-Rhin ; 11-12 : Mulhouse, Haut-Rhin ; 13 : Ihringen, Bade-W. (1-5, 8-10 : dessins L. Tremblay Cormier ; 6-7 : Gerbig et Seewald, 1958, pl. 7/1-2 ; 11-12 : Degen, 1968, fig. 3/4 ; 13 : Degen, 1968, fig. 9/2).

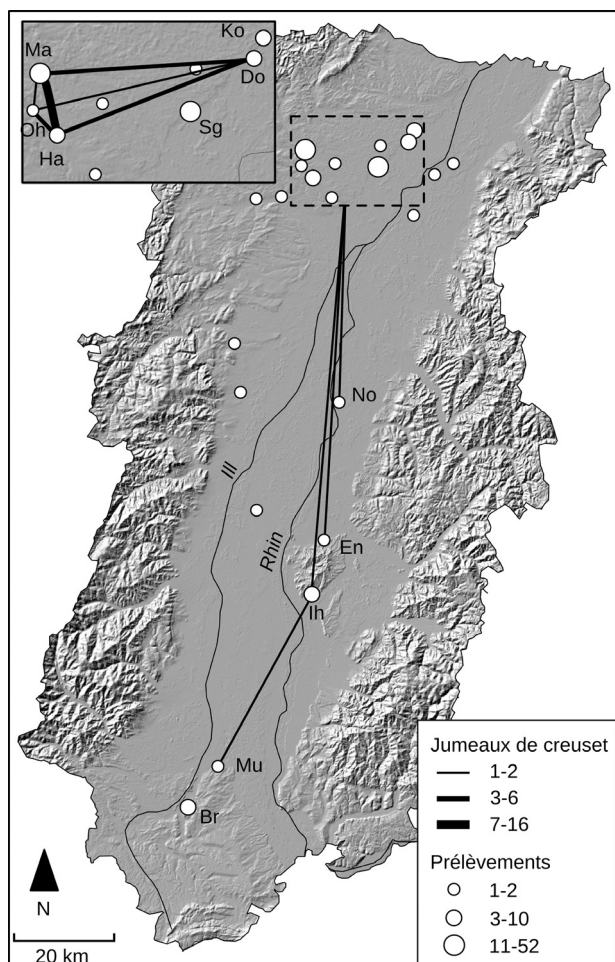
**Fig. 12** – Crucible twins from the Upper Rhine Valley in the Early Iron Age. 1-2 : Koenigsbruck 12/7, Bas-Rhin ; 3 : Maegstub 2/2, Bas-Rhin ; 4-5 : Maegstub 1/1, Bas-Rhin ; 6-7 : Endingen, Baden-W. ; 8-9 : Nonnenweier, Baden-W. ; 10 : Schirrheimerweg 6/3, Bas-Rhin ; 11-12 : Mulhouse, Haut-Rhin ; 13 : Ihringen, Baden-W. (1-5, 8-10 : drawings L. Tremblay Cormier ; 6-7 : Gerbig et Seewald, 1958, pl. 7/1-2 ; 11-12 : Degen, 1968, fig. 3/4 ; 13 : Degen, 1968, fig. 9/2).





**Fig. 12 (suite et fin)** – Jumeaux de creuset dans la vallée du Rhin supérieur au premier âge du Fer. 14-15 : Harthouse 5/1, Bas-Rhin; 16-17 : *id.* 10/1; 18 : *id.* 12/6; 19-20 : Donauberg 6/2, Bas-Rhin; 21 : Maegstub 2/2, Bas-Rhin; 22-23 : *id.* 4/1; 24-25 : *id.* 4/3; 26-27 : *id.* 20/1; 28 : Ohlungen 3/16, Bas-Rhin (14-28 : dessins L. Tremblay Cormier).

**Fig. 12 (end)** – Crucible twins from the Upper Rhine Valley in the Early Iron Age. 14-15 : Harthouse 5/1, Bas-Rhin; 16-17 : *id.* 10/1; 18 : *id.* 12/6; 19-20 : Donauberg 6/2, Bas-Rhin; 21 : Maegstub 2/2, Bas-Rhin; 22-23 : *id.* 4/1; 24-25 : *id.* 4/3; 26-27 : *id.* 20/1; 28 : Ohlungen 3/16, Bas-Rhin (14-28 : drawings L. Tremblay Cormier).



**Fig. 13** – Distribution des jumeaux de creuset, avec un agrandissement de la zone des nécropoles de Haguenau. Les relations entre ces dernières et le reste du Rhin supérieur ont été fusionnées pour faciliter la lecture. Pour cette même raison, seuls les sites présentant des compositions jumelles sont étiquetés. Nécropoles de Haguenau : Donaueberg (Do), Harthouse (Ha), Koenigsbruck (Ko), Maegstüb (Ma), Ohlungen (Oh), Schirrheimerweg (Sg); autres sites : Britzgyberg (Br), Eendingen (En), Ihringen (Ih), Mulhouse (Mu), Nonnenweier (No).

**Fig. 13** – Distribution of crucible twins, with an enlargement of the Haguenau cemeteries area. The relations between these and the other Upper Rhine sites have been merged to increase the map's readability. For the same reason, only the sites with twin compositions are labelled. Haguenau cemeteries: Donaueberg (Do), Harthouse (Ha), Koenigsbruck (Ko), Maegstüb (Ma), Ohlungen (Oh), Schirrheimerweg (Sg); other sites: Britzgyberg (Br), Eendingen (En), Ihringen (Ih), Mulhouse (Mu), Nonnenweier (No).

première fournie par cette pièce a-t-elle été employée pour fabriquer d'autres types d'objets que les parures annulaires? Seule l'analyse d'un plus grand nombre de pièces, aux fonctions variées, permettra d'éclaircir cette question.

### Comparaisons extra-régionales

Plus largement, les traditions métallurgiques du Rhin supérieur peuvent-elles être comparées à celles des autres régions européennes au premier âge du Fer? La démarche se heurte au peu d'analyses disponibles pour la période, plus particulièrement au nord-ouest des Alpes (tabl. 4). Bien que souvent hétéroclites et modestes, les corpus de comparaisons fournissent néanmoins d'intéressantes pistes de réflexion permettant de replacer le Rhin supérieur dans un contexte géographique élargi.

Pour le Plateau suisse, un lot de dix agrafes de ceinture du Ha D1 fournit quelques éléments de comparaison (Fasnacht, 1996). La teneur moyenne en plomb est de 1,31 %, ce qui les rend comparables aux bracelets de type Bade-Alsace; les faibles teneurs en impuretés du cuivre vont également en ce sens, et les rapprochent de la variante A1. Il en va de même pour le dépôt contemporain d'Échallens, dans le canton de Vaud – y compris pour les haches à douilles, qui ne se rapportent pas aux productions armoricaines étant donné le faible taux de plomb, mais plutôt aux productions launaciennes (Rychner, 1984, p. 361).

Concernant la fin du premier âge du Fer, une grande partie du mobilier de la tombe de Vix, Côte-d'Or, a été analysée (Mille et Bourgarit, 2003). Un anneau de cheville à tenon et un torque, tous deux en tôle, ont une teneur basse en plomb et en impuretés; cela peut s'expliquer par des contraintes techniques, le travail de la tôle requérant généralement un métal à faible taux d'impuretés, cette contrainte n'existant pas pour les pièces obtenues par fonderie. Ainsi, les pièces coulées du char possèdent 6 % à 7,5 % de plomb ajouté, mais sans que ce dernier ne domine l'étain. Les moyeux, clous et plaquettes analysés étant malheureusement sans comparaisons (Egg *et al.*, 2003, p. 71-72), il n'est pas possible de rattacher ces résultats à une tradition régionale. Cependant, la comparaison chronologique permet d'appuyer l'idée d'une généralisation des bronzes au plomb, déjà bien en place à la fin du premier âge du Fer au nord des Alpes.

Ce phénomène est confirmé au second âge du Fer sur les *oppida* allemands du Martberg, Rhénanie-Palatinat, et de Manching, Bavière, où les objets coulés contiennent de fortes teneurs de plomb, allant jusqu'à 31 % pour les fibules de Manching (Schwab, 2011, p. 271, et 2014, p. 177). Malheureusement, le Sud-Ouest de l'Allemagne est, à l'heure actuelle, peu représenté dans les corpus de comparaison hallstattiens. Ce biais est d'autant plus regrettable qu'il fait face à une forte parenté typologique avec le Rhin supérieur, dont l'intérêt est ici indéniable.

Les productions du domaine atlantique bénéficient d'un plus grand nombre d'études. Ainsi, une synthèse ancienne des épées en bronze hallstattiennes découvertes en France montre une teneur en plomb moyenne de 1,6 %, dépassant à quelques reprises le seuil de 2 % (Vuaillet, 1987). Il s'agit d'une valeur relativement forte lorsque comparée aux bronzes du Rhin supérieur (types d'alliage 1a et 1b), d'autant plus que ces armes sont datées de la première partie du Ha C. Cette différence est à imputer aux traditions métallurgiques atlantiques, connues pour l'ajout massif de plomb dès le Bronze final (Véber *et al.*, 2003), et s'étend jusqu'au Nord-Ouest de la péninsule Ibérique (Montero *et al.*, 2003, p. 45-46). Au début du premier âge du Fer, les taux de plomb des objets coulés

sont ainsi relativement élevés mais très variables, allant de 0,05% à 25% pour les différents dépôts du Poitou (Briard et Bourhis, 1977); les teneurs sont encore plus extrêmes pour les haches de types armoricains, en moyenne de 28% mais pouvant atteindre 99% (Briard *et al.*, 1998). Dans les dépôts de la Manche et du Finistère, où les haches à douille composent la majeure partie des ensembles, le taux de plomb s'élève en moyenne à 31%; la composition chimique y est relativement homogène et montre, comme pour les alliages de type 2 à 4, l'ajout de plomb à une base de bronze plutôt qu'un remplacement de l'étain (Aranda *et al.*, 2013; Le Carlier de Veslud *et al.*, 2015, p. 83).

Cette tradition des bronzes au plomb ne semble pas toucher le Sud-Ouest de la France. De récentes analyses portant sur le mobilier launacien (fin du VI<sup>e</sup> et début du VII<sup>e</sup> siècle) montrent en effet des taux de plomb aux environs de 1%, les objets dépassant ce seuil étant pour la plupart allochtones (Mille et Artioli, sous presse).

Les Alpes orientales ont un fonctionnement métallurgique différent des régions au nord-ouest des Alpes. Le plomb est en effet peu présent dans les alliages, en continuité avec les traditions de l'âge du Bronze; par exemple, les analyses du dépôt de Fließ, Tyrol, et du mobilier de la nécropole de Bischofshofen, Salzburg, ne dépassent ainsi que rarement le seuil de 2% de plomb (Lutz et Schwab, 2014; Northover, 2009).

À l'inverse, les traditions métallurgiques hallstattiennes du Sud-Est des Alpes montrent l'ajout volontaire de plomb, en quantité toutefois faible à modérée, dès

le début du premier âge du Fer. Ainsi, à Most na Soči, Goriška (VIII<sup>e</sup> au IV<sup>e</sup> siècle) le taux de plomb d'une grande partie du mobilier est compris entre 3 et 15%; la volonté de créer des alliages de composition différente est particulièrement visible sur les fibules de type Santa Lucia, où le matériau varie en fonction de la pièce concernée (Giulia-Mair, 1995, p. 67). Des teneurs en plomb similaires sont attestées dans la nécropole contemporaine italienne de Paularo, Udine (Giulia-Mair *et al.*, 2003), de même que dans les objets coulés du dépôt plus tardif (VI<sup>e</sup> au IV<sup>e</sup> siècle) d'Arbedo, dans le Tessin (Northover, 1998). À Paularo, les objets locaux se distinguent par ailleurs par l'emploi d'un cuivre à fortes impuretés et une adjonction massive de plomb, ayant peut-être pour rôle de remplacer l'étain, dont la teneur moyenne est relativement basse (7%).

L'augmentation du taux de plomb caractérise également les traditions métallurgiques méditerranéennes, et ce dès l'époque archaïque. Les objets coulés (poignées et pieds de récipients, trépieds, agrafes de ceinture, fibules, candélabres, miroirs, au contexte majoritairement funéraire ou inconnu) et les statuettes étrusques ont ainsi un taux de plomb moyen entre 3 et 4%, et qui grimpe à 8% à partir du IV<sup>e</sup> siècle; ces variations ne concernent toujours pas les objets en tôle (fragments indéterminés, casques, et panse de divers types de récipients : amphores, cistes, cruches, oenochoés, situles, tasses...), qui montrent toujours une composition sans plomb. L'apparition des bronzes au plomb touche également la Grèce à partir du VII<sup>e</sup> siècle et, dans une moindre mesure, la Sardaigne

		Cu	Sn	Pb
Nord-Ouest des Alpes	Agrafes de ceinture du plateau Suisse	79,41	18,3	1,3
	Dépôt d'Échallens (Suisse), hors lingots	88,67	9,18	1,76
	Tombe de Vix (France) : parure annulaire	86,56	11,6	0,26
	Tombe de Vix (France) : char	85,8	9,52	4,19
Domaine atlantique	Épée hallstattiennes de France	87,31	9,34	1,57
	Objets divers du Poitou (France) obtenus par coulée	82,25	10,76	4,69
	Haches à douille armoricaines	59,99	5,14	28,35
Alpes orientales	Dépôt de Fließ (Autriche)	–	9 à 10	< 2
	Bischofshofen (Autriche) : objets coulés	88,05	8,69	0,68
Alpes du Sud-Est	Dépôt d'Arbedo (Suisse) : objets coulés	80,51	9,25	9,1
	Paularo (Italie) : objets coulés	87,91	7,81	2,65
	Most na Soči (Slovénie) : objets coulés	84,98	9,35	2,38
Méditerranée orientale	Objets coulés étrusques de la période archaïque	87,71	7,96	3,76
	Objets coulés étrusques du V <sup>e</sup> siècle	85,68	9,56	4,22
	Tombe de Vix (France) : anses des bassins étrusques	85,86	8,63	5
	Objets coulés étrusques du IV <sup>e</sup> au II <sup>e</sup> siècle	82,61	8,8	8,1
	Objets coulés de Sardaigne du V <sup>e</sup> au III <sup>e</sup> siècle	85,02	10,53	3,32
	Tombe de Vix (France) : pièces coulées du cratère	89,43	9,7	0,39

**Tabl. 4** – Comparaisons extra-régionales au premier âge du Fer : teneurs moyennes en cuivre (Cu), étain (Sn) et plomb (Pb), exprimées en pourcentages massiques ; les teneurs en italique sont des valeurs estimées.

*Table 4* – Early Iron Age extra-regional comparisons: average copper (Cu), tin (Sn) and lead (Pb) contents, in weight percent; estimated values are in italic format.

(Craddock, 1986; Hoppe et Schwab, 2016). Ce phénomène est donc antérieur d'environ un siècle aux nouvelles traditions métallurgiques mises en évidence dans le Rhin supérieur, ce qui pose la question des dynamiques sous-jacentes à cette évolution.

À l'échelle européenne, le plomb joue ainsi un rôle variable dans les alliages cuivreux. Il apparaît précocement dans le domaine atlantique français et dans les îles Britanniques, à partir de la fin de l'âge du Bronze, et atteint des valeurs souvent extrêmes. Au sud-est des Alpes et en Méditerranée, il prend une place de plus en plus importante dans les traditions métallurgiques à partir du VII<sup>e</sup> siècle; le Rhin supérieur semble touché par ce phénomène plus tardivement, au cours du VI<sup>e</sup> siècle, cette tendance chronologique restant à confirmer par un plus grand nombre d'analyses. Un important vide de la recherche demeure, plus particulièrement pour l'Est de la France et les Alpes occidentales, où l'apparition de cette nouvelle tradition métallurgique reste à démontrer.

## CONCLUSIONS

### Pourquoi ajouter du plomb dans le bronze ?

Plusieurs raisons techniques ont été invoquées pour expliquer l'ajout de plomb à l'alliage. Il modifierait les propriétés de l'alliage lors de la coulée en fluidifiant le mélange, mais l'amélioration ne serait pas notable au-delà de 2% (Northover, 2009, p. 352). À plus forte dose (10 à 20%), il permet d'abaisser le point de fusion : alors que le *liquidus* d'un bronze à 10% d'étain vaut 1010 °C, le *liquidus* du même bronze mais à 20% de plomb se situe aux alentours de 900 °C (Villars *et al.*, 1995, p. 637). L'adjonction de plomb pour faciliter le traitement du décor incisé à froid après la coulée, comme ce fut proposé pour les appliques décoratives du cratère de Vix (Mille et Bourgarit, 2003, p. 262), ne peut pas non plus s'appliquer ici : les pièces à forte teneur en plomb sont majoritairement lisses, et inversement.

Une possibilité est celle du changement de la couleur de l'alliage par l'ajout de plomb. Le plomb à forte dose pourrait en effet donner au bronze un aspect proche de l'argent (Schwab, 2014, p. 179), un métal encore peu utilisé au premier âge du Fer dans les régions nord-alpines. La recherche d'un effet visuel particulier serait ainsi un facteur important dans l'apparition du nouvel alliage. Cependant, la recherche de cette qualité esthétique est à nuancer : la surface grise en question est une couche fine de plomb qui se forme par ségrégation inverse en surface de l'objet lors du refroidissement. Cette couche est particulièrement fine et s'use rapidement; de plus, le résultat possède un fini plutôt mat que brillant, ce qui s'éloigne d'un aspect argenté.

La substitution de l'étain par du plomb, comme proposé pour les pièces de Paularo (Giulia-Mair *et al.*, 2003, p. 161), n'est pas une solution satisfaisante pour le Rhin supérieur en raison de la teneur modérée en étain du

corpus des bronzes binaires. Cette hypothèse a également été révoquée pour le Nord-Ouest de la péninsule Ibérique, où les ressources en étain sont abondantes et côtoient néanmoins une importante production de bronzes au plomb depuis la fin de l'âge du Bronze (Montero *et al.*, 2003, p. 45-46).

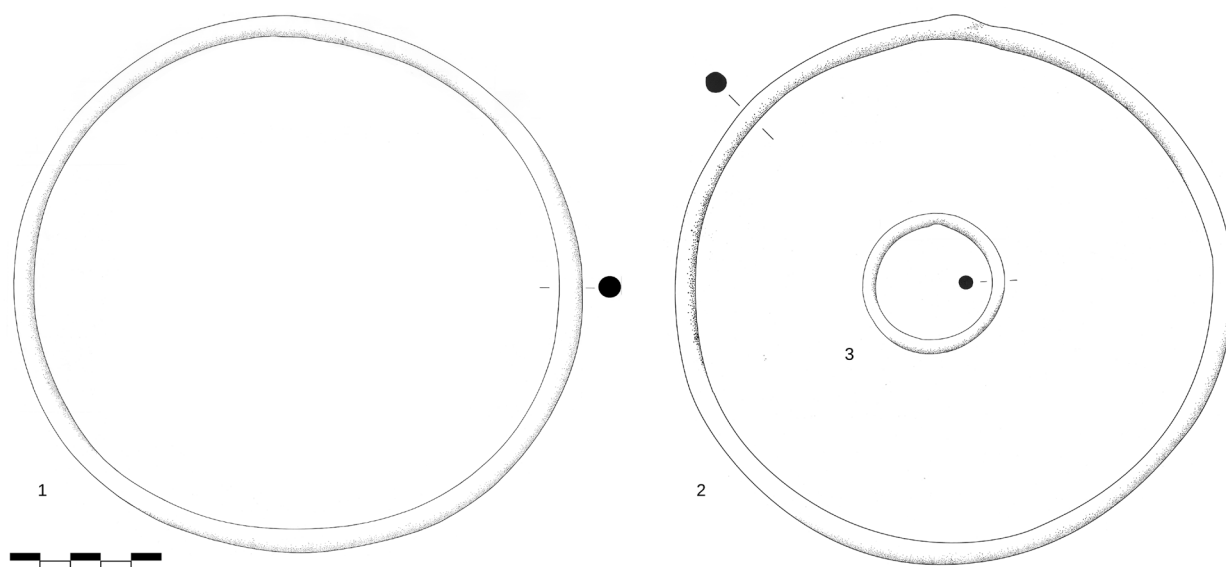
Cependant, l'ajout de plomb peut avoir un rôle d'augmentation de la masse globale du stock de métal en circulation, elle-même obtenue par la refonte d'objets en bronze. Cela expliquerait que le taux d'étain reste significatif dans les alliages ternaires. Cette pratique trouverait son application en cas d'appauvrissement des stocks de matière recyclable, en coupant l'alliage au plomb; une telle composition « à l'économie » a ainsi été proposée pour expliquer la forte teneur en plomb des alliages du Bronze final en Angleterre (Northover, 1981, p. 218). Les bronzes au plomb traduiraient ainsi des changements profonds dans les dynamiques économiques du bronze, touchant plus particulièrement aux ressources disponibles.

Dans le corpus étudié, les alliages ternaires concernent la majorité des parures fermées lisses, y compris le fragment brut de fonte du Britzgyberg. La figure 7 illustre parfaitement la ségrégation entre ce groupe et celui des alliages binaires, concentrés dans la zone sans plomb et à plus forte teneur en étain, et représentés par les bracelets de type Bade-Alsace et une partie des parures fermées lisses. Autour de ces deux traditions métallurgiques gravitent quelques valeurs extrêmes. Le torque de Schirrhein (tumulus 8, sépulture 9; fig. 14, n° 1) possède par exemple une très faible teneur en étain; une origine allochtone peut être proposée, mais ne pourra toutefois être vérifiée que par l'analyse de la composition chimique de parures similaires, provenant de régions voisines (Sarre, Rhénanie-Palatinat, Wurtemberg ou Plateau suisse). Il en va de même au sein des alliages ternaires pour le torque de Koenigsbruck (tumulus 12, sépulture 2; fig. 14, n° 2) et le bracelet fermé lisse de Maegstub (tumulus 4, sépulture 3; fig. 14, n° 3). Le lingot du Britzgyberg est lui aussi atypique, sa forme le rapprochant d'ailleurs des lingots-bâres launaciens.

### L'importance du recyclage

Le recyclage des objets en alliage cuivreux est attesté dès les débuts de la métallurgie; il est attribué à des sociétés dont l'approvisionnement en matière première s'affaiblit ou s'arrête (Pernicka, 2014, p. 259), ou dont l'accès à l'un ou l'autre des éléments de l'alliage (cuivre ou étain) est insuffisant. Il est cependant faux d'assurer qu'il brouille aléatoirement les schémas de composition : le recyclage d'objets en circuit fermé aura plutôt pour effet la conservation et l'homogénéisation de leurs caractéristiques chimiques (Northover, 1981, p. 217). Pour preuve, la mise en évidence de groupes de composition chimique pour le mobilier suisse de l'âge du Bronze, malgré une pratique du recyclage avérée (Rychner et Kläntsch, 1995).

La refonte d'objets en alliage cuivreux comme matériau de base peut-elle être confirmée pour le Rhin supérieur, au premier âge du Fer? Bien que difficile à prouver,



**Fig. 14** – Exemples de mobilier de composition chimique atypique. 1 : torque de Schirrein 8/9; 2 : torque de Koenigsbruck 12/2; 3 : bracelet de Maegstub 4/3 (dessins L. Tremblay Cormier).

**Fig. 14** – Examples of objects with atypical chemical composition. 1: neck ring from Schirrein 8/9; 2: neck ring from Koenigsbruck 12/2; 3: arm ring from Maegstub 4/3 (drawings L. Tremblay Cormier).

cette idée est fortement envisageable. En effet, bien que les éléments-traces suivent des schémas cohérents, corrélés à la typologie, les groupes définis ne montrent pas de ruptures véritables. Les différentes teneurs ont tendance à se chevaucher et à avoir une dispersion relativement importante, ce qui cadrerait avec le recyclage de bronzes à la composition chimique variable, mais possédant généralement la même provenance.

Cela est particulièrement visible pour les bracelets de la variante B2 du type Bade-Alsace, dont les teneurs en impuretés sont les plus fortes et les plus dispersées. À l'inverse, la variante A1 montre un plus grand contrôle du matériau employé pour la fabrication de l'objet. Une pratique de recyclage spécialisé, où les pièces sont sélectionnées avant refonte (Schwab, 2014, p. 180), pourrait expliquer l'homogénéité de cette production.

### Une communauté de formes et de technologie

La dispersion des compositions jumelles entre les nécropoles amène de forts éléments d'interprétation à propos de l'organisation de la production métallurgique. Elle induit en effet des relations de contemporanéité entre plusieurs pièces appartenant à des communautés différentes, qui possèdent donc un dénominateur commun : l'artisan, maître d'œuvre de la coulée à l'origine de l'objet. Cependant, il faut garder à l'esprit que les résultats sur lesquels se fondent les propositions sont pour l'instant limités à la parure annulaire; or, il n'est pas exclu que celles-ci aient appartenu à une logique productive distincte des autres catégories d'objets métalliques, dont la composition de l'alliage voire même l'approvisionnement seraient adaptés à leurs propres contraintes techniques, fonctionnelles ou esthétiques.

Ainsi, plusieurs éléments tendent vers une certaine centralisation de la production; il sera toutefois nécessaire d'élargir le champ des investigations à d'autres types de mobiliers afin de confirmer cette hypothèse. En premier lieu, on peut évoquer la grande homogénéité typologique, technique et chimique des variantes des bracelets de type Bade-Alsace, qui implique l'existence d'un artisan ou d'un atelier spécialisé. Ce dernier contrôle visiblement chaque étape de la chaîne opératoire, depuis le choix du matériau et des objets à recycler, jusqu'à la forme générale de l'objet et son décor. Le résultat, particulièrement uniforme, traduit la mise en œuvre d'une idée précise et univoque du produit fini, un savoir-faire unique et une même source de matière première, ce qui ne semble pas compatible avec une production par différents ateliers.

L'argument de l'homogénéité typologique est plus difficile à défendre pour les parures fermées lisses, en raison de leur forme très simple. Toutefois, la distribution des jumeaux de creuset entre plusieurs porteurs et différentes nécropoles de la région atteste d'une relation technique directe entre ces parures. La coulée simultanée de mobiliers, appartenant pourtant à des communautés distinctes, laisse envisager une production centralisée autour d'un nombre très limité d'artisans bronziers. La piste d'un simple partage des recettes d'alliage ne suffit pas à expliquer la situation que nous avons mise en évidence, car à l'identité de l'alliage se surimpose celle du spectre des impuretés. Ce constat conduit donc à sérieusement envisager la contemporanéité de la production de nombreuses pièces, et parallèlement l'implication d'un groupe très restreint d'artisans.

Les premiers résultats obtenus, et notamment la mise en évidence de nombreuses compositions jumelles, invitent à pousser plus loin les interprétations. Cela

nécessitera toutefois l'emploi d'une technique d'analyse aux seuils de détection plus bas que le PIXE, afin d'étayer plus encore les associations qui se dessinent entre les objets. Cela permettra d'aborder la question de la circulation du cuivre à l'échelle de la région et de mieux caractériser les réseaux de relation entre les différents acteurs.

En l'absence d'indices d'activités métallurgiques autres que ceux du Britzgyberg, il est délicat de localiser ces artisans (ou ateliers) et de leur attribuer la paternité de l'un ou l'autre des types de parure annulaire étudiés ici. De plus, tel qu'évoqué précédemment, ces résultats ne sont pour l'instant fondés que sur un type précis d'objets, dont le partage d'une même logique productive avec le reste du mobilier (parure, armes, outils...) n'est pas avéré. Ces éléments contribuent en tout cas à mettre en lumière une importante cohésion à l'échelle du Rhin supérieur, à la fois culturelle et technologique ; ils marquent tout l'intérêt d'approfondir la question en élargissant le champ d'investigation à un plus grand nombre d'objets, aux types et fonctions variés, et en utilisant une technique analytique encore plus sensible et précise que le PIXE.

**Remerciements :** Cet article est issu d'un post-doctorat de deux ans, accueilli par le Regierungspräsidium Stuttgart, Abteilung

Archäologie, et financé par la fondation Fritz Thyssen. Nos plus sincères remerciements vont aux conservateurs et attachés de conservation des musées de Haguenau, Karlsruhe, Mulhouse, Strasbourg et des dépôts archéologiques de Freiburg et Rastatt, pour leur soutien et la mise à disposition de leurs collections. Nous remercions également Claire Pacheco, Brice Moignard, Laurent Pichon et Quentin Lemasson, grâce à qui les analyses ont pu être effectuées sur l'accélérateur de particules AGLAE du C2RMF.

## NOTES

- (1) Les éléments retenus pour caractériser la composition du métal sont : P, S, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Au, Hg, Pb, Bi. Pour identifier les échantillons contaminés par la corrosion, les éléments suivants ont été utilisés : Mg, Al, Si, Cl, K, Ca, Ti, V, Cr, Sr, Zr.
- (2) Le phosphore et le bismuth, représentés à moins de dix reprises, ne seront pas commentés en détail.
- (3) Certains jumeaux sont ainsi déjà discutables, comme le couple formé par le bracelet de variante A1 d'Ihringen et le torque de Weissensee (tumulus 38, sépulture 2), appartenant à des types et des périodes chronologiques différentes, dont la ressemblance pourrait être le fruit du hasard et pour laquelle des analyses plus approfondies permettraient sans doute de mettre en évidence certaines différences.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADAM A.-M. (2009) – *L'habitat fortifié du premier âge du Fer du Britzgyberg (Illfurth, Haut-Rhin). Fouille programmée 2009*, rapport de fouille programmée, service régional de l'Archéologie d'Alsace, Strasbourg, 74 p.
- ARANDA B., LE CARLIER DE VESLUD C., MARCIGNY C., LE BANNIER J.-C. (2013) – Le dépôt de haches à douille de type armoricain du Ha D1-D2 de Trelly (Manche). Interprétations à partir des analyses chimiques élémentaires, *Bulletin de la Société préhistorique française*, 110, 1, p. 105-119.
- BOËS É. (2006) – Synthèse chronotypologique, in M. Châtelet (dir.), *Ungersheim « Lehlematten » (Haut-Rhin). Un habitat néolithique, une nécropole protohistorique et des potagers le long d'un chemin romain*, rapport final d'opération archéologique, service régional de l'Archéologie d'Alsace, Strasbourg, p. 113-117.
- BOURGARIT D., MILLE B. (2014) – Provenance du cuivre et alliages, in P. Dillmann et L. Bellot-Gurlet (dir.), *Circulation des matériaux et des objets dans les sociétés anciennes*, Paris, Éditions des archives contemporaines (Sciences archéologiques), p. 103-131.
- BÄRUNING A., LÖHLEIN W., PLOUIN S. (2013) – *Die frühe Eisenzeit zwischen Schwarzwald und Vogesen = Le Premier âge du Fer entre la Forêt-Noire et les Vosges*, Stuttgart, Regierungspräsidium Stuttgart Landesamt für Denkmalpflege (Archäologische Informationen aus Baden-Württemberg, 66), 288 p.
- BRIARD J., BOURHIS J. (1977) – Composition chimique des haches à douille armoricaines. Méthodes. Résultats. Interprétation, *Revue d'archéométrie*, 1, p. 3-14.
- BRIARD J., BOURHIS J., VIVET J. (1998) – Nouvelles séries d'analyses spectrographiques sur les bronzes armoricains : Tréboul et haches à douilles, in C. Mordant, M. Pernot et V. Rychner, *L'atelier du bronzier en Europe du XX<sup>e</sup> au VIII<sup>e</sup> siècle avant notre ère*, 1. *Les analyses de composition du métal : leur apport à l'archéologie de l'âge du Bronze*, Paris, CTHS (Documents préhistoriques, 10-1), p. 91-100.
- CAROLLA L. (sous presse) – Les témoins des activités métallurgiques des dépôts launaciens, in J. Guilaïne, L. Carozza, D. Garcia, J. Gasco, T. Janin et B. Mille (dir.), *Launac et le Launacien, dépôts de bronze protohistoriques du Sud de la Gaule*, Montpellier, Les Presses universitaires de la Méditerranée.
- CRADDOCK P. (1986) – The Metallurgy and Composition of Etruscan Bronze, *Studi Etruschi*, 52, p. 211-271.
- DEGEN R. (1968) – Ein späthallstattzeitlicher Armspangentypus am Oberrhein. Zu einem Neufund aus Reinach, Baselland, in L. Berger, P. Bürgin et E. Schmid (dir.), *Provincialia. Festschrift für Rudolf Laur-Belart*, Bâle - Stuttgart, Schwabe, p. 523-550.
- DRAN J.-C., CALLIGARO T., SALOMON J. (2000) – Particle-Induced X-Ray Emission, in E. Ciliberto et G. Spoto (dir.), *Modern Analytical Methods in Art and Archaeology*, New York, John Wiley (Chemical analysis, 15), p. 135-166.
- DRESCHER H. (1995) – Die Verarbeitung von Buntmetall auf der Heuneburg, in E. Gersbach (dir.), *Baubefunde der Perioden IVc-IVa der Heuneburg*, Mayence, Philipp von Zabern (Heuneburgstudien, 9), p. 255-364.

- DUBREUCQ É. (2013) – *Métal des premiers Celtes : productions métalliques sur les habitats des provinces du Hallstatt centre-occidental*, Dijon, Éditions universitaires de Dijon (Art, archéologie et patrimoine), 449 p.
- DUBREUCQ É. (2007) – Le mobilier métallique, in M. Roth-Zehner (dir.), *Illfürth Lieu-dit Buergelen, lotissement « les Hauts de Buergelen » (Alsace, Haut-Rhin)*, rapport d'archéologie préventive, service régional de l'Archéologie d'Alsace, Strasbourg, p. 35-40
- EGG M., FRANCE-LANORD A., ROLLEY C., MILCENT P.-Y. (2003) – Le char, in C. Rolley (dir.), *La tombe princière de Vix*, Paris, Picard, p. 57-76.
- FASNACHT W. (1996) – Metallanalysen und metallkundliche Untersuchungen an bronzenen Gürtelhaken, in B. Schmid-Sikimić (dir.), *Der Arm- und Beinschmuck der Hallstattzeit in der Schweiz: mit einem Anhang der Gürtelhaken und Gürtelgehänge der Hallstattzeit im Schweizerischen Mittelland, Jura and Wallis*, Stuttgart, Franz Steiner (Prähistorische Bronzefunde, 10, 5), p. 197-202.
- GERBIG R., SEEWALD C. (1958) – Endingen – Fundschau 1954-1956 : Hallstattzeit, *Badische Fundberichte*, 21, p. 249-250.
- GIUMLIA-MAIR A. (1995) – The Copper-Based Finds from a Slovenian Iron Age Site, *Bulletin of the Metals Museum*, 23, p. 59-81.
- GIUMLIA-MAIR A., VITRI S., CORAZZA S. (2003) – Iron Age Copper-Based Finds From the Necropolis of Paularo in the Italian Oriental Alps, in *Archaeometallurgy in Europe*, actes de la conférence internationale (Milan, 25-26 septembre 2003), Milan, Associazione italiana di metallurgia, p. 157-166.
- GLUCHY A. (2013) – *Les techniques du bronzier à l'âge du Bronze : méthodologie d'une lecture des états de surface d'objets de bronze à partir de l'étude du décor de bracelets du dépôt n° 2 de Saint-Priest « les Feuilly » (Rhône)*, thèse de doctorat, université de Bourgogne, Dijon, 403 p.
- GUILLAUMET J.-P. (2003) – *Paléomanufacture métallique. Méthode d'étude*, Gollion, Infolio, 156 p.
- HOPPE T., SCHWAB R. (2016) – Eine tierische Odyssee oder ein Kessel Bunter. Neue metallurgische Untersuchungen am Löwenkessel von Hochdorf, in M. Bartelheim, B. Horejs et R. Krauss (dir.), *Von Baden bis Troia. Ressourcennutzung, Metallurgie und Wissenstransfer*, Rahden, Leidorf (Oriental and European Archaeology, 3), p. 423-437.
- HOY J. (2015) – *La parure annulaire hallstattienne en Lorraine*, mémoire de master, université de Strasbourg, 227 p.
- LE CARLIER DE VESLUD C., LE BANNIER J.-C., MARCIGNY C., FILY M. (2015) – L'analyse chimique des objets à base cuivre protohistoriques. Des données complémentaires aidant à l'attribution chronologique des dépôts, *Bulletin de l'Association pour la promotion des recherches sur l'âge du Bronze*, 13, p. 81-86.
- LUTZ J., SCHWAB R. (2014) – The Early Iron Age Hoard from Fliess in Tyrol and Ore Resources in the Eastern Alps, in E. Pernicka et R. Schwab (dir.), *Under the Volcano*, Rahden, Leidorf (Forschungen zur Archäometrie und Altertumswissenschaft, 5), p. 25-34.
- MILLE B., ARTIOLI G. (sous presse) – Les objets launaciens : composition élémentaire du métal, composition isotopique du plomb, in J. Guilaine, L. Carozza, D. Garcia, J. Gasco, T. Janin et B. Mille (dir.), *Launac et le Launacien, dépôts de bronze protohistoriques du Sud de la Gaule*, Montpellier, Les Presses Universitaires de la Méditerranée.
- MILLE B., BOURGARIT D. (2000) – 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, p. 13-26.
- MILLE B., BOURGARIT D. (2003) – Composition élémentaire des bronzes, in C. Rolley (dir.), *La tombe princière de Vix*, Paris, Picard, p. 253-265.
- MONTERO I., ROVIRA S., DELIBES G., FERNÁNDEZ-MANZANO J., FERNÁNDEZ-POSSES M., HERRÁN J., MARTÍN C., MAICAS R. (2003) – High Leaded Bronze in the Late Bronze Age Metallurgy of the Iberian Peninsula, in *Archaeometallurgy in Europe*, actes de la conférence internationale (Milan, 25-26 septembre 2003), Milan, Associazione italiana di metallurgia, p. 39-45.
- NORTHOVER P. (1981) – Metallurgy in Bronze Age Archaeology, *Revue d'archéométrie*, 1, p. 215-224.
- NORTHOVER P. (1998) – Analysis of Copper Alloy Metalwork from Arbedo TI, in M. Schindler (dir.), *Der Depotfund von Arbedo TI und die Bronzedeptofunde des Alpenraums vom 6. bis zum Beginn des 4. Jh. v. Chr.*, Bâle, Schweizerische Gesellschaft für Ur- und Frühgeschichte (Antiqua, 30), p. 289-316.
- NORTHOVER P. (2009) – Analysis and Metallography of Copper Alloy Metalwork, in A. Lippert et P. Stadler (dir.), *Das spätbronze- und früheisenzeitliche Gräberfeld von Bischofshofen-Pestfriedhof*, Bonn, Rudolf von Habelt (Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie, 168), p. 351-384.
- PERNICKA E. (2014) – Provenance Determination of Archaeological Metal Objects in B. Roberts et C. Thornton (dir.), *Archaeometallurgy in Global Perspective. Methods and Syntheses*, New York, Springer, p. 239-268.
- PERNOT M. (1998) – L'organisation de l'atelier du bronzier, in C. Mordant, M. Pernot et V. Rychner (dir.), *L'atelier du bronzier en Europe du XX<sup>e</sup> au VIII<sup>e</sup> siècle avant notre ère, 2. Du minerai au métal, du métal à l'objet*, Paris, CTHS, p. 107-116.
- PLOUIN S. (2007) – Les bracelets en bronze à décor géométrique du musée d'Unterlinden, *Bulletin de la Société Schongauer*, 2001-2005, p. 97-113.
- PLOUIN S. (2012) – Les sites funéraires du Hallstatt et de La Tène ancienne, in G. Oswald et G. Triantafyllidis (dir.), *L'occupation du sol dans la vallée de la Bruche de la Préhistoire à la fin de l'Antiquité*, rapport final de projet collectif de recherche, service régional de l'Archéologie d'Alsace, Strasbourg, p. 107-136.
- PLOUIN S., KOENIG M.-P. (1990) – Les bracelets hallstattiens à cannelures longitudinales, *Annales de la Société d'histoire et d'archéologie de Colmar*, 37, p. 7-32.
- REINHARD W. (2003) – *Studien zur Hallstatt- und Frühlatènezeit im südöstlichen Saarland*, Bliesbrück-Reinheim,

- Publications du Parc archéologique européen (BLESA, 4), 408 p.
- RYCHNER V. (1984) – De l'âge du Bronze à l'âge du Fer : le dépôt d'Échallens (canton de Vaud, Suisse), *Bulletin de la Société préhistorique française*, 81, p. 357-370.
- RYCHNER V., KLÄNTSCHI N. (1995) – *Arsenic, nickel et antimoine : une approche de la métallurgie du Bronze moyen et final en Suisse par l'analyse spectrométrique*, Lausanne, Cahiers d'archéologie romande (Cahiers d'archéologie romande, 63-64), 335 p.
- SCHAEFFER C.-F.-A. (1930) – *Les tertres funéraires préhistoriques dans la forêt de Haguenau, 2. Les Tumulus de l'âge du Fer*, Haguenau, musée de Haguenau, 332 p.
- SCHMID-SIKIMIĆ B. (1996) – *Der Arm- und Beinschmuck der Hallstattzeit in der Schweiz: mit einem Anhang der Gürtelhaken und Gürtelgehänge der Hallstattzeit im Schweizerischen Mittelland, Jura and Wallis*, Stuttgart, Franz Steiner (Prähistorische Bronzefunde, 10, 5), 219 p.
- SCHWAB R. (2011) – Kupferlegierungen und Kupferverarbeitung im Oppidum auf dem Martberg, in H. H. Wegner (dir.), *Berichte zur Archäologie am Mittelrhein und Mosel*, Trèves, Rheinischen Landesmuseum Trier, p. 267-285.
- SCHWAB R. (2014) – Resources and Recycling: Copper Alloys and Non-Ferrous Metalworking in the Oppidum of Manching, in E. Pernicka et R. Schwab (dir.), *Under the Volcano*, Rahden, Leidorf (Forschungen zur Archäometrie und Altertumswissenschaft, 5), p. 175-188.
- SCHWEITZER J. (1997) – L'oppidum du Britzgyberg et le faciès hallstattien dans le Horst de Mulhouse, in P. Brun et B. Chaume (dir.), *Vix et les éphémères principautés celtiques. Les VI<sup>e</sup> et V<sup>e</sup> siècles avant J.-C. en Europe occidentale*, Paris, Errance (Archéologie aujourd'hui), p. 57-66.
- TREMBLAY CORMIER L. (sous presse) – Les parures annulaires massives fermées lisses du Rhin supérieur au Ha D : variantes régionales et marqueurs identitaires, in G. Bataille, S. Deffressigne, J. Kaurin et S. Marion (dir.), *Production et protoindustrialisation aux âges du Fer : perspectives sociales et environnementales*, actes du 39<sup>e</sup> Colloque international de l'AFEAF (Nancy, 14-17 mai 2015).
- VÉBER C. (2009) – *Métallurgie des dépôts de bronzes à la fin de l'âge du Bronze final (IX<sup>e</sup>-VIII<sup>e</sup> s. av. J.-C.) dans le domaine Sarre-Lorraine. Essai de caractérisation d'une production bronzière au travers des études techniques : formage et analyses élémentaires*, Oxford, Archaeopress (BAR, International series 2024), 340 p.
- VÉBER C., MILLE B., BOURGARIT D. (2003) – Essai de caractérisation du métal lorrain, in A. Giunliia-Mair et F. Lo Schiavo (dir.), *Le problème de l'étain à l'origine de la métallurgie*, Oxford, Archaeopress (British Archaeological Reports, 1199), p. 67-76.
- VILLARS P., PRINCE A., OKAMOTO H. (1995) – Cu-Pb-Sn, in P. Villars, A. Prince et H. Okamoto (dir.), *Handbook of Ternary Alloy Phase Diagrams*, Materials Park (OH), American Society for Metals, vol. 7, p. 631-638.
- VUAILLAT D. (1987) – *La paléométallurgie de la Franche-Comté. Âge du Bronze et âge du Fer*, Paris, Les Belles Lettres (Annales littéraires de l'université de Besançon, 359), 171 p.
- ZEHNER M. (2000) – *Soufflenheim – Golf International, lieu-dit Obermattwald (Bas-Rhin)*, rapport final d'opération, Antea Sàrl, service régional de l'Archéologie d'Alsace, Strasbourg, 66 p.

**Laurie TREMBLAY CORMIER**  
UMR 7044 « Archimède »,  
5, allée du Général-Rouvillois,  
67083 Strasbourg Cedex

**Benoît MILLE**  
Ingénieur d'étude du ministère de la Culture,  
chargé des études en métallurgie,  
Centre de recherche et de restauration  
des musées de France,  
14, Quai Mitterrand,  
75001 Paris  
et UMR 7055 « Préhistoire et technologie »  
Maison Archéologie Ethnologie,  
21, allée de l'Université,  
92023 Nanterre Cedex