Zeitschrift: Cahiers d'archéologie romande

Herausgeber: Bibliothèque Historique Vaudoise

Band: 63 (1995)

Artikel: Arsenic, nickel et antimoine : une approche de la métallurgie de Bronze moyen et final en Suisse par l'analyse spectrométrique : tome I

Autor: Rychner, Valentin / Kläntschi, Niklaus

Kapitel: 4: Description globale des résultats

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-835407

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

4

Description globale des résultats

Au cours de l'âge du Bronze, la composition chimique des bronzes varie selon deux axes principaux:

1) *l'importance relative des impuretés les unes par rapport aux autres*, notion qui débouche sur celle de *schéma de composition*;
2) *le niveau absolu des teneurs*.

Ces deux types de variation sont également pertinents, c'est-à-dire qu'ils peuvent l'un comme l'autre servir de point de départ à la démonstration de l'évolution des compositions chimiques du bronze au cours du temps. En fait, les deux axes en question ne sont pas complètement indépendants l'un de l'autre mais, au contraire, largement corrélés. En d'autres termes, à un schéma de composition donné correspondent le plus souvent des teneurs bien définies. Pour analyser les résultats, on est cependant forcé, dans un premier temps, de distinguer les deux points de vue et de les envisager l'un à la suite de l'autre.

Notre effort, cependant, ne sera pas également réparti entre l'un et l'autre. Arbitrairement (mais aussi parce qu'elle nous paraissait plus originale et, surtout, mieux adaptée) nous avons choisi, en effet, de mettre l'accent sur l'étude des schémas de composition et d'appuyer en premier lieu sur elle nos approches de détail. L'examen des variations du niveau absolu des teneurs, ci-dessous, sera donc relativement sommaire et uniquement basé sur la notion de moyenne.

Pour mettre en évidence des variations diachroniques de composition chimique, d'autre part, on peut procéder de deux manières différentes. La première consiste à grouper *a priori* les objets selon leur âge et à vérifier ensuite dans quelle mesure ces groupes chronologiques s'opposent aussi sur le plan métallurgique. A l'inverse, la deuxième cherche à définir d'abord des groupes métallurgiques et à vérifier ensuite leur pertinence chronologique. On adoptera ici le premier de ces deux points de vue pour l'examen des variations de concentration, mais le deuxième pour l'étude des schémas de composition.

1. Le niveau absolu des teneurs

Comme nous venons de le dire, nous confronterons ici les uns aux autres des groupes d'objets réunis en fonction de leur chronologie, en montrant dans quelle mesure ils se distinguent aussi au point de vue de la composition chimique.

Nous avons ainsi commencé par éliminer les cent dix-neuf objets de datation imprécise, de même que les neuf objets du Bronze ancien et l'unique objet du HaC, pour ne garder que les huit cent douze restants, qui peuvent entrer sans difficulté dans l'un ou l'autre des "tiroirs" Bronze moyen, BzD-HaA1, HaA2, HaB1 et HaB2. Les caractéristiques de composition chimique de ces cinq groupes chronologiques sont exprimées de trois façons différentes et complémentaires. Pour commencer, cinq graphiques construits sur le modèle proposé par Waterbolk et Butler (1965), et contenant un histogramme de fréquence par élément, à échelle logarithmique, décrivent chacun un groupe chronologique considéré dans son ensemble (fig. 4-8). Une autre série d'histogrammes de fréquence, à échelles linéaires pouvant varier d'un élément à l'autre, permet de mieux saisir les variations diachroniques de concentration, élément par élément (fig. 9). Un tableau de chiffres, enfin, indique, par élément et par période, la teneur moyenne, l'écart type, le coefficient de variation ainsi que les teneurs minimums et maximums (tabl. 10).

Il n'est pas besoin d'un long examen pour comprendre qu'un des buts principaux de notre recherche est atteint à ce stade déjà. Chiffres et graphiques, en effet, traduisent

de manière flagrante les changements intervenant entre le Bronze moyen et la fin du Bronze final, et montrent que chaque tranche chronologique ne s'individualise pas seulement par la morphologie des objets en bronze, mais aussi par la composition du métal utilisé.

1. Le Bronze moyen

Par rapport aux moyennes générales (tabl. 10, lignes "tout"), le Bronze moyen se définit par des teneurs moyennes en impuretés uniformément plus basses. Les faibles valeurs du plomb, de l'antimoine, du bismuth et du cobalt sont spécialement frappantes, alors que le niveau de l'arsenic et du nickel, du zinc et du fer sont proches de la moyenne. La somme totale des impuretés reste au-dessous de 1% (on ne tient pas compte dans cette somme du plomb dont le statut, du Bronze moyen au Bronze final, passe en partie de celui d'impureté à celui d'élément de l'alliage; voir p. 62-64 et tabl. 16).

Compte non tenu des lingots, la teneur moyenne en *étain* est d'environ 6% relatifs supérieure à la moyenne générale. Le faible coefficient de variation et la concentration de l'histogramme soulignent la signification de cette moyenne.

2. Le Bronze D - Hallstatt A1

La somme des impuretés (0.73%) est encore plus basse qu'au Bronze moyen. Elle est ici à son minimum. Les proportions d'arsenic et de nickel, en particulier, sont environ deux fois plus faibles, alors que celles de l'antimoine, de l'argent et du cobalt sont à peine supérieures à celles de la période précédente. La grande différence avec le Bronze moyen, cependant, est à chercher dans le plomb (environ quatre fois plus) et dans le bismuth (dix fois plus), dans une moindre mesure dans le zinc (environ trois fois plus). Il se confirme donc que cette phase intermédiaire entre Bronze moyen et Bronze final, au point de vue métallurgique également, n'est pas la simple continuation du Bronze moyen. Quant à la variabilité des compositions, elle est tout à fait comparable à celle du Bronze moyen.

La proportion d'*étain*, dans les objets finis, atteint son maximum au BzD-HaA1 (8.69%), mais elle n'est qu'à peine supérieure à celle du Bronze moyen.

3. Le Hallstatt A2

Cette période frappe par la très faible variabilité des compositions, traduite non seulement par l'apparence des histogrammes mais aussi par les coefficients de variation étonnamment bas. Le changement métallurgique intervenant au HaA2 est, par ailleurs, radical.

La somme totale des impuretés (2.54%) exprime parfaitement ce changement. Le cuivre du HaA2, en effet, est caractérisé par des teneurs supérieures à la moyenne pour toutes les impuretés majeures: arsenic, antimoine, argent, nickel et cobalt. La relative abondance de ce dernier élément, qui atteint alors ses teneurs maximums, est certainement l'une des "signatures" les plus caractéristiques de l'époque. L'abondance du fer, de loin supérieure à celle rencontrée avant ou après, est également très remarquable. Bismuth et zinc, en revanche, accusent une baisse assez nette par rapport au BzD-HaA1.

La teneur moyenne de *plomb*, impureté et/ou élément de l'alliage, augmente aussi de façon considérable depuis le BzD-HaA1 pour se situer aux environs de 1%. La variabilité des teneurs est cependant assez importante.

La moyenne de l'*étain*, à peine inférieure à celle du BzD-HaA1, se situe presque exactement au même niveau qu'au Bronze moyen. Les teneurs sont extrêmement bien groupées autour de la moyenne, puisque 86.9% des teneurs sont comprises entre 6 et 10%.

4. Le Hallstatt B1

La période se présente en partie comme la suite du HaA2, mais les teneurs moyennes en antimoine et en argent sont encore nettement plus élevées. Celles d'arsenic et de nickel restent stables, tandis que le cobalt et le fer baissent très nettement. La somme totale des impuretés atteint son maximum (3.15%). La grande différence avec le HaA2 réside dans l'homogénéité très inférieure du groupe. La plus grande dispersion des histogrammes et les indices de variation relativement élevés montrent, en effet, que l'unité métallurgique du HaB1 est bien moins forte que celle du HaA2, et que cette période est caractérisée par plusieurs sortes de cuivre, ce que confirmera d'ailleurs la suite de l'étude.

Le *plomb* reste au même niveau. C'est le seul élément à montrer un groupement supérieur à celui du HaA2.

Les teneurs d'*étain*, très dispersées, baissent sensiblement, pour tomber au-dessous de la moyenne générale.

5. Le Hallstatt B2

L'hétérogénéité caractéristique du HaB1 fait place à une unité comparable à celle du HaA2, voire même supérieure en ce qui concerne l'arsenic et le nickel. En même temps, le niveau moyen de toutes les principales impuretés baisse considérablement pour atteindre des valeurs très proches des moyennes générales. La somme totale des impuretés (1.54%) est également très voisine de la moyenne générale. Une des caractéristiques les plus frappantes du HaB2

est la forte augmentation de la teneur en *plomb*, qui va de pair avec la baisse de celle en *étain*. Cette dernière est de plus d'un quart inférieure à celle enregistrée au BzD-HaA1.

6. Compositions pauvres, normales et riches

Un simple coup d'œil à la liste des analyses permet de se rendre compte qu'un assez grand nombre de compositions "*pauvres*" en impuretés s'opposent à un petit nombre de compositions au contraire très "*riches*", et qu'entre ces deux extrêmes s'intercale la grande masse des compositions "*normales*". Dans la suite de notre travail, il a paru nécessaire de distinguer ces trois groupes — le tout étant, bien sûr, de leur trouver des limites. Tirées à travers un ensemble sans rupture, elles ne peuvent être qu'arbitraires et subjectives. Celles que nous proposons reposent en partie sur l'histogramme des *teneurs cumulées* en arsenic, antimoine et nickel (fig. 10), construit sur la même échelle logarithmique que celle des figures 4-8. Nous considérons comme *pauvres* les compositions des sept premières colonnes, dont les valeurs s'échelonnent entre 0.008 et 0.42%. Cette définition de la "pauvreté" correspond très largement à celle que nous avions tendance à proposer intuitivement, à savoir: les trois éléments < 0.1%; deux des trois éléments < 0.1%; un élément < 0.1%, les deux autres < 0.2%. Quant à la limite entre "normal" et "riche", nous la situons vers 4.3% de teneur cumulée (douzième colonne de l'histogramme), valeur que nous préférons arrondir à 4%. Les compositions riches comprennent presque toujours au moins une teneur, mais le plus souvent plusieurs, atteignant ou dépassant 2%.

Tout arbitraires qu'elles soient, ces limites définissent cependant trois groupes dont la signification chronologique saute aux yeux (fig. 11), comme cela, d'ailleurs, était facile à prévoir en fonction de ce qui a été dit plus haut de la variation absolue des teneurs. Plus de 80% des compositions pauvres, en effet, sont du Bronze moyen et du BzD-HaA1, période à laquelle elles sont même dominantes. Elles jouent cependant aussi un rôle non négligeable au HaB1. Quant aux compositions riches, elles sont surtout typiques du HaB1.

2. L'importance relative des impuretés

Avec l'argent, qui a posé des problèmes d'analyse (voir p. 16), et le cobalt, dont la prise en compte intervient à un stade ultérieur, les trois impuretés principales, en quantité et en signification, sont l'*arsenic*, l'*antimoine* et le *nickel*. L'importance relative de ces trois éléments varie beaucoup. C'est ainsi que l'on peut isoler treize *schémas de composition* différents. Le tableau 11 fait apparaître, d'une part, que l'importance en nombre d'objets de ces schémas est très variable, mais surtout que leur répartition chronologique n'est pas aléatoire. La plupart d'entre eux, en effet, ont un centre de gravité assez précis. Les treize schémas, cependant, n'ont pas tous une signification chronologique propre. Certains peuvent donc être regroupés. C'est ainsi que nous proposons de reconnaître sept *types de schémas* principaux (sont considérées comme égales deux teneurs dont la différence n'excède pas 10% relatifs):

1) As>Sb>Ni, As>Sb=Ni et As=Sb>Ni
2) As>Ni>Sb et As=Ni>Sb
3) Ni>As>Sb
4) Ni>Sb>As, Ni=Sb>As et Ni>Sb=As
5) Sb>Ni>As
6) Sb>As>Ni et Sb>As=Ni
7) As=Sb=Ni

La signification chronologique des six premiers types est illustrée par les graphiques des figures 13 et 14. Ils ne tiennent compte que des huit cent quatre objets attribuables avec précision à l'une ou l'autre des phases Bronze moyen, BzD-HaA1, HaA2, HaB1 et HaB2, et laissent donc de côté les neuf objets du Bronze ancien, l'unique objet HaC ainsi que les cent dix-neuf objets de datation plus ou moins imprécise (HaA2-B1, HaB et indéterminés). Le schéma de type 7, le moins important numériquement et qui n'a sans doute pas grande signification, est également laissé de côté. La figure 13 montre l'importance variable des phases chronologiques dans chacun des six types de schémas; la figure 14, inversement, l'importance variable des schémas de composition dans chacune des cinq phases chronologiques.

On constate ainsi que plus de 80% des objets Bronze moyen ont des schémas de type 2 et 3. Le BzD-HaA1 est la période la moins bien définie. Le type de schéma le plus fréquent, le type 3, ne concerne en effet que 36% des objets. Le BzD-HaA1 est encore proche du Bronze moyen, dans la mesure où le type 3 est le plus important. Il s'en distingue cependant nettement, dans la mesure où le type 2 joue un rôle nettement moindre et où les types 1, 4, 5 et surtout 6 sont beaucoup plus représentés. Le HaA2 se distingue radicalement de ce qui précède, puisque les schémas de type 4, jusque là peu importants, rassemblent 60% des objets, alors que les types 1 et 2 disparaissent presque complètement. Les types de schémas 5 et 6 jouent déjà un rôle appréciable. Le HaB1 est surtout partagé entre les types 4, 5 et 6 (93% des objets), le plus fréquent étant le type 5. Le HaB2, quant à lui, est surtout caractérisé par les schémas de type 6 qui concernent 75% des objets. Le type 5 conserve une certaine importance, alors que le type 1, inexistant ou presque au HaA2 et au HaB1, joue un rôle presque aussi important qu'au BzD-HaA1.

La répartition des compositions pauvres, normales et riches dans les sept types de schémas de composition ne réserve aucune surprise (tabl. 13). Logiquement, puisqu'elles sont surtout caractéristiques du Bronze moyen et du BzD-HaA1, les compositions pauvres sont les plus

fréquentes dans les schémas typiques de ces périodes, c'est-à-dire dans les schémas de types 1, 2 et 3. Bien attestées également au HaB1, elles le sont donc dans le schéma le plus courant du HaB1, le schéma de type 5 qui contient, d'autre part, la plus grande concentration de compositions riches, typiques du HaB1.

3. Les compositions jumelles

Dans chacun des schémas de composition que nous allons étudier en détail, la classification automatique va créer des groupes d'objets de composition similaire. L'extrémité distale des branches du dendrogramme réunira, dans ces groupes, les compositions les plus voisines, par paires ou par groupes plus importants. La question se posera donc tout naturellement de savoir à partir de quel degré de ressemblance deux ou plusieurs objets peuvent ou doivent être considérés comme de composition identique, donc comme issus de la même coulée de métal ou, au moins, du même lingot de cuivre.

A défaut de données expérimentales, nous avons eu recours à la comparaison des analyses multiples ou répétées de onze objets (annexe 1), dans l'idée que la ressemblance chimique entre plusieurs échantillons d'un même objet ne devait pas être très différente de celle existant entre des objets différents issus de la même coulée. Pour obtenir une image chiffrée des ressemblances, nous avons calculé pour chaque objet et pour chacun des éléments les plus importants (Sn, Pb, As, Sb, Ag, Ni, Co) un *coefficient de ressemblance*, en multipliant par 100 le quotient de la plus petite valeur mesurée par la plus grande (tabl. 3). La ressemblance est ainsi proportionnelle à la valeur du coefficient, 100 exprimant l'identité des valeurs mesurées. Les variations observées tiennent aussi bien à la précision relative des analyses qu'à l'inhomogénéité des objets, apparemment très faible à l'échelle relativement grossière de nos échantillons.

L'examen de ces valeurs chiffrées appelle d'abord trois remarques générales: 1) les coefficients idéaux de 100 ne sont pas atteints quand il y a plus de deux analyses; 2) la variation des résultats est d'autant plus forte que les teneurs sont plus basses; 3) pour presque tous les éléments, si les teneurs ne sont pas trop basses, les coefficients de ressemblance sont compris entre 90 et 100.

Si l'on considère ensuite chacun des éléments, on constate que l'*étain* est très stable. Sa variation dépasse rarement 5% relatifs (83, 474). Le *plomb* varie un peu plus, et quand la teneur descend au-dessous de 0.1%, comme c'est le plus souvent le cas au Bronze moyen, le coefficient tombe au-dessous de 90. La situation semble être la même pour l'*antimoine* et l'*argent* mais, faute de points de repère, il est difficile de se faire une idée de la baisse des coefficients de ressemblance en cas de teneurs d'*arsenic* et de *nickel* inférieures à 0.1%. On peut sans doute admettre qu'elle doit être au moins aussi forte que celle constatée pour l'antimoine et l'argent, dont les limites de détection sont inférieures à celles du nickel et de l'arsenic.

Le *cobalt* pose plus de problèmes. Abstraction faite d'une éventuelle répartition dans le bronze moins régulière que celle des autres impuretés, la principale raison en est le niveau général nettement plus bas des teneurs, qui frôlent et atteignent même souvent la limite de détection, située vers 0.03% (voir p. 16). Dans le cas des teneurs inférieures à 0.04% (A.419, 56), le coefficient moyen de ressemblance, en effet, n'est que de 65.5 (le coefficient idéal de A.337 devant être considéré comme le fruit du hasard, il est écarté des calculs). Il est de 77.5 pour les teneurs comprises entre 0.04% et 0.15%, et atteint l'excellent niveau de 97.1 quand les teneurs dépassent 0.15%. Dans la recherche des compositions jumelles, il s'agit donc, en ce qui concerne les impuretés, de choisir des critères d'identité plus ou moins sévères selon que les teneurs sont supérieures ou inférieures à environ 0.1% (tabl. 3). Il conviendra, d'autre part, de ne pas tenir compte du coefficient de ressemblance de l'argent quand un objet dont le numéro d'ordre est inférieur à 303 révèle une teneur inférieure à celle d'un objet à partir du numéro 303. Rappelons, en effet, que les échantillons 1 à 302 ont pu perdre une partie de leur argent lors de leur mise en solution (voir p. 16).

L'identité de composition de deux objets peut se situer à deux niveaux différents:

1) elle concerne les sept éléments envisagés, étain compris; si elle n'est pas fortuite, les chances sont très grandes qu'il s'agisse de "jumeaux de coulée", c'est-à-dire d'objets issus de la même coulée de métal, voire du même lingot de bronze refondu en plusieurs fois, sans modifications;
2) elle concerne seulement les impuretés du cuivre, à l'exclusion de l'alliage; il s'agit alors de "jumeaux de lingot", c'est-à-dire d'objets issus du même lingot de cuivre refondu en plusieurs fois avec des ajouts différents d'étain et, éventuellement, de plomb.

Le statut du *plomb*, en effet, varie au cours de l'âge du Bronze (voir p. 62-64 et tabl. 16). Au Bronze moyen, quand sa teneur est régulièrement inférieure à 0.1%, il est à considérer comme impureté du cuivre. Des jumeaux de lingot devraient alors montrer la même teneur de plomb. La situation est beaucoup moins claire dès le début du Bronze final, au moment où les teneurs sont plus élevées et varient beaucoup à l'intérieur d'un même groupe de composition. Nous sommes d'avis, cependant, que dans la plupart des objets de cette époque, le plomb n'est pas à considérer comme impureté du cuivre mais comme un élément intrusif mêlé à l'étain, accidentellement ou non,

et dans des proportions très variables. Dans ces conditions, la recherche des jumeaux de lingot ne doit pas tenir compte de la teneur en plomb.

Un cas se présente assez fréquemment: c'est celui de deux objets jumeaux quant aux impuretés et à l'étain, mais différents quant au plomb. A notre avis, il s'agit alors de jumeaux de lingot, et l'identité des teneurs en étain est le fait d'un hasard qu'explique facilement la très faible variabilité de l'alliage en étain.

En définitive, deux objets pourront être déclarés de composition identique et donc jumeaux (de coulée ou de lingot) si les coefficients de ressemblance des éléments considérés ne descendent pas au-dessous des minimums constatés ou, encore mieux, pas au-dessous des moyennes établies. Nous sommes parfaitement conscient des limites que comporte l'application trop mécanique de cette méthode. Des exemples montrent, en effet, qu'il faut quelquefois compter avec des "accidents", même dans le cas de fabrication évidemment simultanée (voir, par exemple, les bracelets de Sursee dans le groupe 5R) et, dans l'autre sens, que toute paire satisfaisant à nos critères n'est pas forcément constituée d'authentiques jumeaux (voir, par exemple, le groupe 4N). L'utilisation critique, mais relativement stricte de nos critères nous apparaît cependant comme le meilleur moyen de réduire l'incertitude des quelques conclusions que nous pourrons tirer de ces rapprochements. C'est pourquoi nous nous limiterons, dans la plupart des cas, à la mention des paires d'objets satisfaisant entièrement aux critères définis, sans dresser la liste exhaustive des paires à peu près satisfaisantes. Le problème des compositions jumelles sera ensuite repris de façon synthétique au chapitre 6 (p. 64-67).