



HAL
open science

Déterminer les zones d’approvisionnement en cuivre archéologique

Céline Tomczyk, Kévin Costa, Alain Giosa

► **To cite this version:**

Céline Tomczyk, Kévin Costa, Alain Giosa. Déterminer les zones d’approvisionnement en cuivre archéologique. Méthodes d’enregistrement des données en archéologie, Éditions de la Sorbonne, 2019, 9791035105396. 10.4000/books.psorbonne.37927 . halshs-02886216

HAL Id: halshs-02886216

<https://shs.hal.science/halshs-02886216>

Submitted on 1 Jul 2020

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

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

Méthodes d'enregistrement des données en archéologie

Candice Del Medico, Marion Dessaint et Camille Gorin (dir.)

DOI : 10.4000/books.pSORbonne.37927
Éditeur : Éditions de la Sorbonne
Lieu d'édition : Paris
Année d'édition : 2019
Date de mise en ligne : 18 décembre 2019
Collection : Archéo.doct
ISBN électronique : 9791035105396



<http://books.openedition.org>

Référence électronique

DEL MEDICO, Candice (dir.) ; DESSAINT, Marion (dir.) ; et GORIN, Camille (dir.). *Méthodes d'enregistrement des données en archéologie*. Nouvelle édition [en ligne]. Paris : Éditions de la Sorbonne, 2019 (généré le 06 février 2020). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/psORbonne/37927>>. ISBN : 9791035105396. DOI : 10.4000/books.pSORbonne.37927.

Ce document a été généré automatiquement le 6 février 2020.

© Éditions de la Sorbonne, 2019
Conditions d'utilisation :
<http://www.openedition.org/6540>

Déterminer les zones d'approvisionnement en cuivre archéologique

Contributions et limites du traitement statistique de la base de données
Oxalid

Archaeological copper provenancing using the Oxalid database: interests
and limits

Céline Tomczyk, Kévin Costa et Alain Giosa

Nous souhaitons remercier nos directeurs pour leur soutien et leurs conseils ainsi que Bruno Desachy pour son écoute attentive et critique de notre protocole.

De plus, il est important de souligner que, sans l'initiative de quelques chercheurs mettant à disposition leurs bases de données, ce type de travail n'aurait pas pu voir le jour. Ainsi, nous souhaitons remercier les collaborateurs de la base Oxalid et plus particulièrement Zofia Stos-Gale qui en assure la gestion.

- 1 À la protohistoire (Néolithique, âges du Bronze et du Fer) a commencé l'exploitation des gisements cuprifères. À ce jour, la détermination des sources de cuivre utilisées pour la confection des artefacts se base sur des diagrammes binaires présentant les ratios isotopiques du plomb. Sortes d'abaques, ces graphiques permettent de comparer les valeurs d'un objet de provenance indéterminée à des objets connus.
- 2 À la différence des données élémentaires quantitatives (teneurs exprimées en ppm), les ratios isotopiques sont sans unité. Ils sont identiques entre un objet et le minerai utilisé pour sa confection et forment la signature isotopique du métal. Les traitements métallurgiques n'impactent pas la signature isotopique du plomb qui reste conservée entre minerai source et objet produit malgré les (re)fontes successives (Pernicka, 2014).
- 3 Les études de provenance utilisant des données isotopiques pour caractériser des objets archéologiques se présentent sous la forme de deux diagrammes binaires ($^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ sur $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ sur $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$).

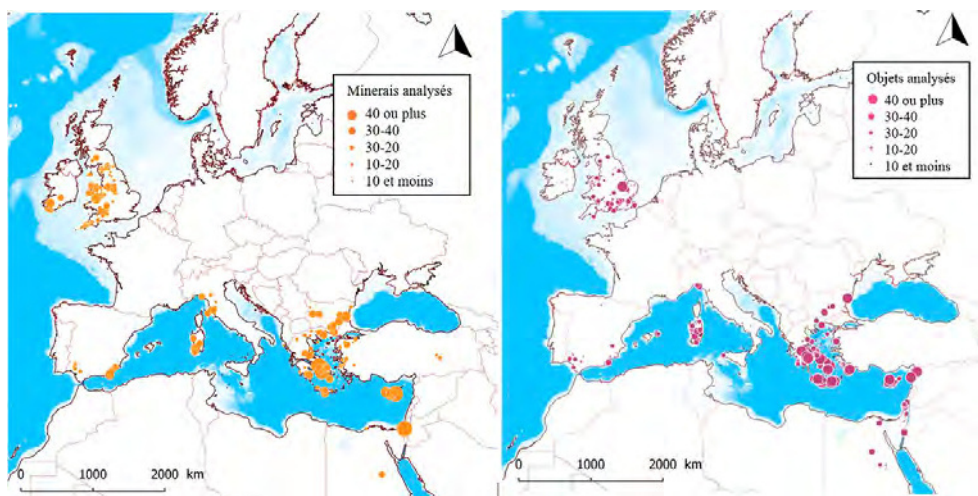
- 4 Ils ne sont pas satisfaisants pour analyser la signature isotopique (4 ratios pertinents), car ils comportent une part de subjectivité, tant du fait du choix des ratios isotopiques présentés que de l'interprétation de la proximité des échantillons. Cette subjectivité peut être contournée par l'utilisation d'analyses statistiques multidimensionnelles¹.
- 5 Ainsi, la présente étude propose un traitement statistique multivarié (CAH et AFD) des données contenues dans la base de données Oxalid. Le logiciel XLSTAT a été utilisé pour toutes les analyses statistiques.
- 6 Pour le pourtour méditerranéen et les îles britanniques (**fig. 1**), la base Oxalid fournit des données issues de prospections géologiques (roches prélevées d'après leur potentiel métallogénique apparent) et d'artefacts archéologiques. Les artefacts peuvent alors être rapprochés à un gisement potentiel en utilisant la signature isotopique comme traceur.
- 7 Cette analyse est limitée par :
 - la qualité et l'exhaustivité de la prospection géologique ;
 - la détermination d'un recoupement satisfaisant entre artefact et minerai.
- 8 En effet, la provenance de certains artefacts ne peut pas être déterminée s'ils proviennent d'un gisement non reconnu ou s'ils résultent du mélange de cuivre de gisements différents.
- 9 Un échantillon de validation est utilisé pour assurer la pertinence de cette méthode. Il est formé par des artefacts standardisés et de provenance connue : des lingots.
- 10 L'outil statistique ainsi développé permettra de proposer une provenance aux artefacts archéologiques.

Méthodologie

La base de données Oxalid

- 11 La base de données Oxalid a été créée au milieu des années 1970. Elle est le fruit de la mise en commun des travaux de deux équipes de recherche des universités d'Oxford (Royaume-Uni) et de Heidelberg (Allemagne). Initialement, ces travaux avaient pour but d'étudier les premières métallurgies du pourtour méditerranéen (Stos-Gale, Gale, 2009), ne couvrant ainsi pas l'ensemble de l'Europe. La France, bien que riche en minerai de cuivre n'est pas renseignée.
- 12 Ces travaux, réalisés entre 1975-2002, ont permis la caractérisation isotopique de nombreux minerais, scories, lingots et artefacts, couvrant l'ensemble de la chaîne opératoire de production du cuivre².
- 13 La base de données, libre de droits (<http://oxalid.arch.ox.ac.uk/>), contient à ce jour plus de 3 500 données d'analyses de produits finis ou semi-finis (résidus de fonderie et lingots), localisées dans les mêmes espaces géographiques avec plus de 2 000 occurrences de minerais (**fig. 1**).

Fig. 1 : Localisation des analyses de la base Oxalid



- 14 Les contextes de découverte (type de minerai/d'objet, datation des objets, etc.) sont renseignés de manière homogène. Les produits finis et semi-finis sont issus de contextes datés entre la fin du Néolithique et la fin de l'âge du Bronze.
- 15 Les minerais proviennent de mines protohistoriques et antiques avérées³, ou supposées situées à proximité de découvertes archéologiques remarquables, présentant des artefacts en cuivre ou bronze.
- 16 Toutes les mesures ont été réalisées par le même laboratoire et la même équipe, suivant le même protocole analytique et en utilisant la même machine⁴.

Les isotopes pris en compte

- 17 Les isotopes du plomb sont au nombre de quatre (^{208}Pb , ^{207}Pb , ^{206}Pb et ^{204}Pb) et ont été identifiés comme traceurs de provenance. Ils constituent la signature isotopique d'un objet. Le ^{204}Pb est stable alors que les isotopes ^{206}Pb , ^{207}Pb et ^{208}Pb sont produits par la décroissance radioactive d'isotopes pères : ^{238}U , ^{235}U et ^{232}Th . Les rapports initiaux U/Pb et Th/Pb évoluent de manière différente selon les processus géologiques en jeu. Les rapports aux ^{204}Pb permettent de dater le gisement (étant l'isotope stable) là où les autres éléments apportent des précisions quant au contexte de formation des gisements (Marcoux, 1986). L'utilisation des ratios isotopiques permet donc de définir un gisement, tant en termes d'âge que de processus métallogéniques.
- 18 Traditionnellement, les isotopes du plomb sont utilisés en archéologie sous la forme de trois ratios : $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ et $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Il est à noter que les géologues utilisent des ratios différents de ceux utilisés par les archéologues : $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ ⁵, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ et $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$. Le fait d'utiliser le ^{204}Pb en dénominateur permet de mieux cerner la décroissance radioactive, le ^{204}Pb étant l'isotope stable⁶.
- 19 Nous avons choisi d'utiliser les cinq ratios précédemment décrits dans les modèles statistiques, ce qui permet un léger gain de précision. Un effet d'interdépendance est produit du fait du calcul de nouveaux ratios⁷, mais cet effet de chaîne est alors constant sur l'ensemble des données.

Le modèle minéral

Corpus des données isotopiques sur les minerais

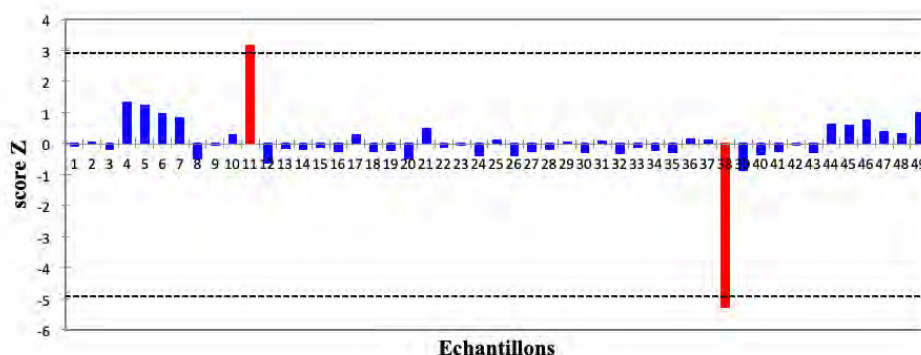
Les zones non-cuprifères

- 20 Les prospections permettant de localiser les gisements ont été réalisées prioritairement à proximité des sites de consommation (**fig. 1**). Or, les valeurs isotopiques ne reflètent en rien la teneur en cuivre. Ainsi, certaines analyses présentes dans la base Oxalid concernent des régions considérées comme non cuprifères pour les géologues. C'est le cas notamment de la Crête, où plus de 40 mesures ont été effectuées, alors que l'île semble dépourvue de cuivre exploitable à l'échelle d'une mine⁸ (Spanakis, 2015)⁹. Les données de minerai crétoises ne sont donc pas prises en compte.
- 21 En se fondant sur les cartes de prospections minières pour le cuivre en Europe (Cassard *et al.*, 2015), il est possible d'isoler les analyses réalisées sur des secteurs ayant un potentiel cuprifère douteux, voire inexistant. Ces données doivent être vérifiées attentivement, et supprimées le cas échéant.

Les données aux valeurs extrêmes

- 22 Afin d'éliminer les valeurs extrêmes, un test de Grubbs a été réalisé. Les échantillons écartés possèdent des valeurs beaucoup plus fortes, ou plus faibles, que le reste des échantillons de leur région. La probabilité qu'ils reflètent une erreur analytique ou d'échantillonnage étant grande, ils sont écartés du corpus.
- 23 La base Oxalid présente une classification des minerais analysés par région (environ 50). Pour chacune de ces régions cuprifères, les cinq ratios formant la signature isotopique du minerai ont été testés¹⁰. Le niveau de signification a été fixé à 20 % (hypothèse alternative bilatérale¹¹), selon un écart à la moyenne supérieur ou inférieur. Environ 7 % des données ont ainsi été identifiées comme valeurs extrêmes (**fig. 2**). En l'absence d'analyses complémentaires (réplica), elles ont été considérées comme aberrantes et donc écartées de l'analyse.

Fig. 2 : Exemple de test de Grubbs, ensemble d'échantillons bulgares, rapport $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$

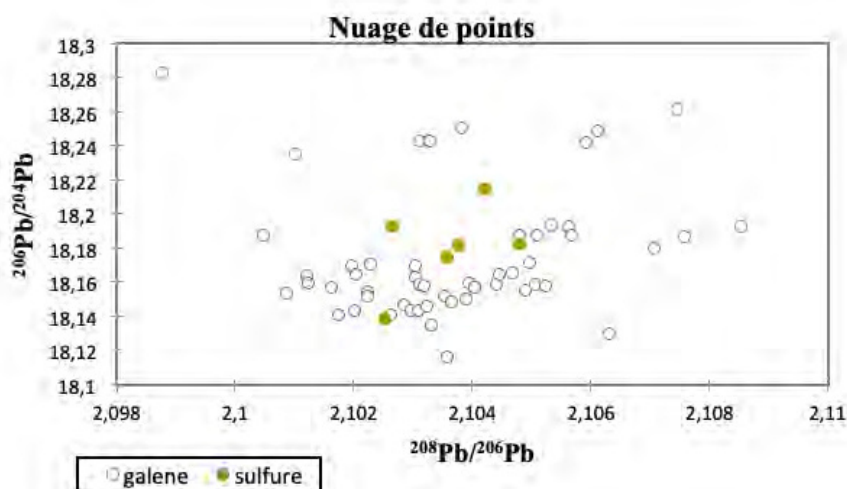


Deux valeurs aberrantes visibles : échantillons 11 et 38 (retirés de la base de données).

Variabilité en fonction du type de minerai et utilisation des minerais de plomb

- 24 La base de données comprend deux types de minerais : des minerais de cuivre (20 % des entrées) et de la galène (minerai de plomb représentant 80 % des analyses). La proximité spatiale entre gisement de plomb et gisement de cuivre permet d'analyser les signatures isotopiques de la galène lors de la détermination des gisements cuprifères. Il est toutefois nécessaire de s'assurer que la signature isotopique est indépendante du type de minerai. Un test de Kruskal Wallis a été réalisé pour les gisements présentant ces deux types de minerai. Ces tests ne montrent pas de différence significative entre la signature isotopique et la nature du minerai. Minerai de cuivre et de galène, issus d'un même gisement, sont porteurs de la même signature isotopique, et leurs ratios isotopiques peuvent être utilisés conjointement pour la caractérisation d'un gisement (fig. 3).

Fig. 3 : Exemple de répartition homogène entre galènes et chalcopryrite (sulfure de cuivre), région de Dyfed

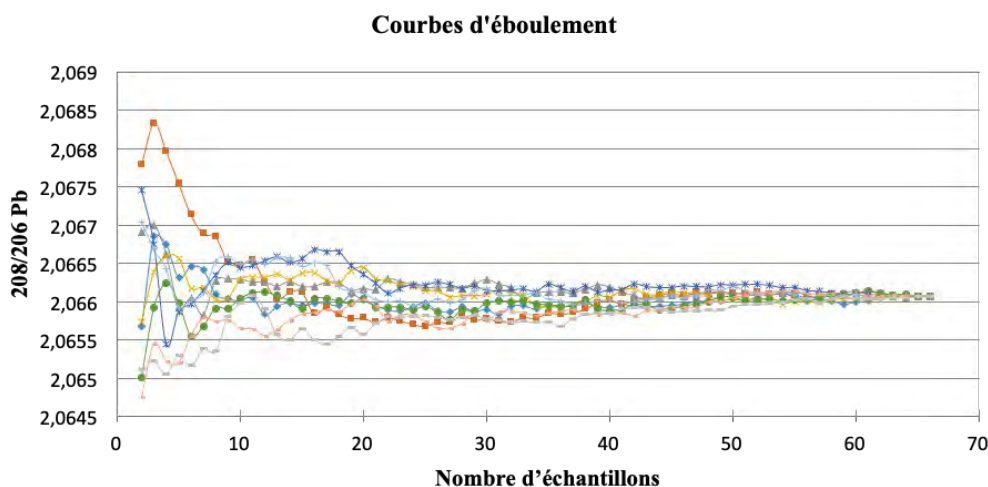


Variabilité isotopique des gisements

- 25 Un paramètre limitant l'intérêt des analyses isotopique pour déterminer la provenance d'un objet est la variabilité isotopique du plomb pouvant exister à l'échelle d'un gisement ou d'un district minier (Milot, 2016).
- 26 Les gisements monogéniques¹² possèdent une très grande homogénéité isotopique, de l'ordre de 2 ‰ (Marcoux, 1986, p. 282-284). Cette homogénéité se situe sous le seuil de détection analytique de $\pm 0.1\%$. Pour ces gisements¹³, il est donc possible, théoriquement, d'obtenir une signature isotopique représentative avec un seul échantillon.
- 27 Les gisements polygéniques¹⁴ se comportent différemment : chaque épisode minéralisateur peut impliquer des phénomènes d'héritages, de remobilisation et d'apport de plomb. Leur assemblage minéralogique est complexe et chaque minéral peut posséder une signature isotopique propre. Il faut alors déterminer si l'on dispose, ou non, de suffisamment de données isotopiques pour avoir une vision représentative de la variabilité propre au gisement cuprifère.

- 28 Afin de déterminer le nombre d'analyses nécessaires pour obtenir une caractérisation statistiquement significative de la signature isotopique d'un gisement cuprifère des courbes d'éboulement ont été générées. Partant des gisements les plus échantillonnés (dix-sept gisements de la base Oxalid bénéficient de plus de quarante analyses), dix tirages aléatoires sans remise ont été réalisés pour chaque gisement et chaque ratio. Les moyennes cumulées ont été calculées pour chaque tirage. Le seuil d'éboulement correspond au nombre d'analyse nécessaire avant l'obtention d'une valeur moyenne stable. À partir de dix analyses, la caractérisation du gisement est correcte, entre vingt et quarante elle est optimale. Au-delà de quarante, le gisement est suréchantillonné (fig. 4).
- 29 Les gisements polygéniques et sous-échantillonnés, doivent être identifiés, car leur caractérisation n'est pas suffisante pour assurer la représentativité de leur signature isotopique. De nouvelles données doivent alors être recherchées¹⁵.

Fig. 4 : Exemple de courbes d'éboulements (pour le ratio $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ de l'île de Kéa)



Les différentes courbes représentent les moyennes obtenues par les différents ensembles de tirages aléatoires. Par lecture graphique, l'éboulement se produit à partir d'un échantillonnage de $n=7$, la précision des mesures est optimale dès que $n=22$ (seuil de « fiabilité »).

- 30 À l'issue du prétraitement de la base Oxalid, les valeurs aberrantes (issues de zones dépourvues de cuivre ou identifiées comme valeurs extrêmes) sont éliminées. De plus, les gisements sous-échantillonnés sont reconnus. Une analyse statistique multivariée peut maintenant être appliquée au corpus de données de caractérisation des minerais.

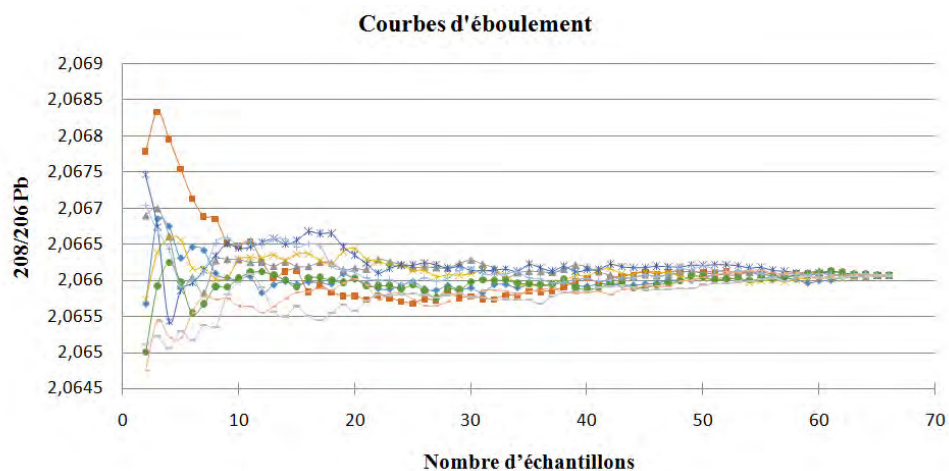
Statistiques multivariées des minerais : signature isotopique et localisation des gisements cuprifères

Les signatures isotopiques

- 31 La détermination de la signature isotopique des minerais se déroule en deux temps. Premièrement, une classification ascendante hiérarchique (CAH) est réalisée (fig. 5) : elle permet d'organiser le corpus des minerais potentiels en fonction de leurs similarités isotopiques. Cette méthode permet de s'affranchir de l'irrégularité de l'échantillonnage en agrégeant les échantillons par ressemblance, sans recourir à un

outil de modélisation. Ainsi, les déséquilibres entre zones sous-échantillonnées et suréchantillonnées sont maîtrisés et ne constituent pas un biais statistique.

Fig. 5 : Dendrogramme pour l'ensemble des données Oxalid et zoom sur un sous-groupe

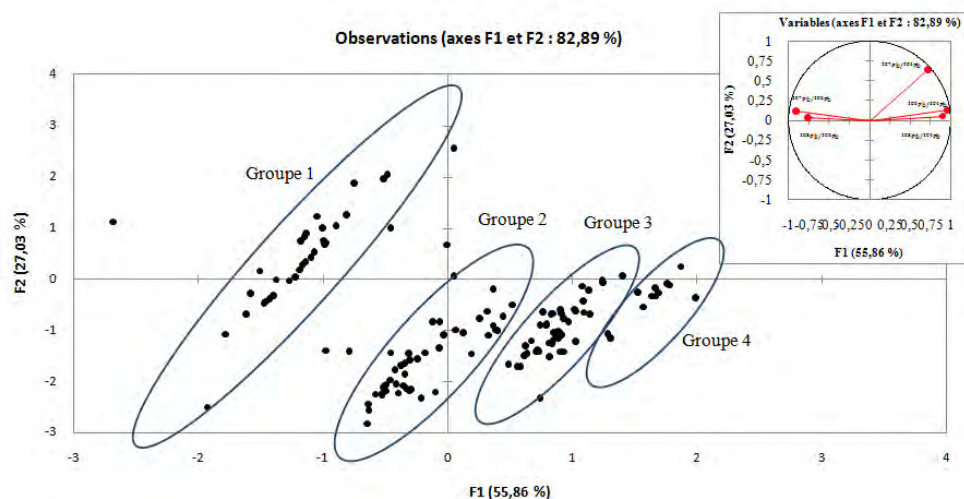


- 32 Les regroupements, ainsi effectués, sont ensuite confrontés aux données géographiques.

Origine géographique des minerais

- 33 Une analyse factorielle discriminante (AFD) est réalisée afin de tester l'association entre les signatures isotopiques des groupes de la CAH et l'origine géographique des roches analysées. La distance au Khi^2 constitue alors l'outil décisionnel permettant d'apprécier la singularité de la signature isotopique du gisement en fonction du toponyme correspondant à sa localisation¹⁶. Une région possédant une forte cohésion de signatures isotopiques (valeurs très similaires) et se différenciant clairement des autres régions, présentera un pourcentage de cohésion important.
- 34 Une mauvaise individualisation des gisements peut s'expliquer par :
- des gisements liés à un même épisode métallogénique de très grande échelle, s'étalant sur plusieurs régions. Les gisements peuvent alors être regroupés (**fig. 6**). Cela limite l'acuité de la démarche isotopique pour la localisation des mines anciennes, mais reste intéressant tant que les regroupements affectent des régions proches ;
 - de multiples épisodes métallogéniques sur un même gisement ayant diversifié sa signature isotopique¹⁷. Le gisement peut dans ce cas, être segmenté en entités plus petites¹⁸.

Fig. 6 : Observation, en AFD, des données de l'ensemble de la Bulgarie : distinction de quatre groupes



Les points situés en dehors des groupes définis se différencient en facteur 3.

- 35 Comme on le voit sur le tableau de résultat (**tableau 1**) correspondant à l'échantillon bulgare¹⁹, certains gisements sont bien identifiés et d'autres sont plus difficiles à caractériser : les groupes 1, 2 et 4, sont très homogènes et donc différenciables entre eux après suppression des données aberrantes (ils possèdent un pourcentage de cohésion de 100 %, permettant de les différencier de toutes les autres (sous) régions présentes dans la base de données, alors que le groupe 3 peut être confondu avec d'autres régions).

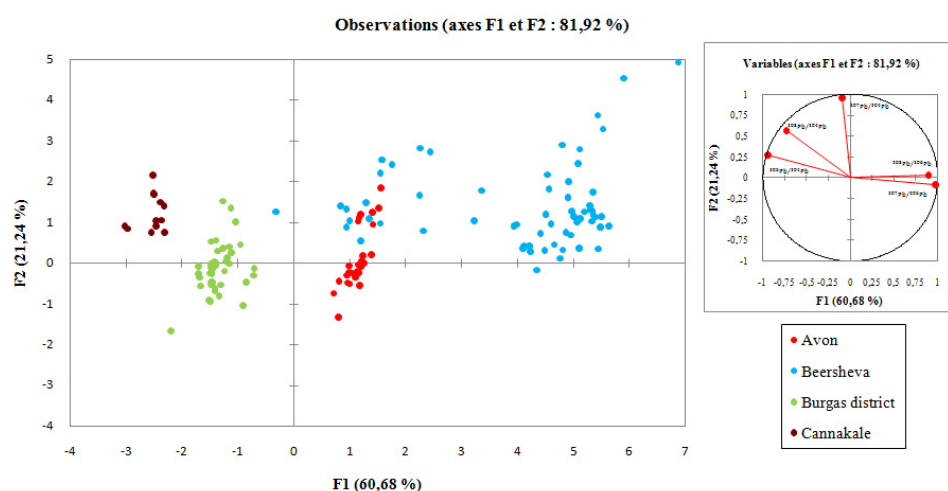
Tableau 1 : Exemple de découpage pour les gisements bulgares

Total	% correct	District minier	Groupe
43	97,67%	Burgas district	Groupe 3
9	100,00%	Central Bulgaria	
11	100,00%	Iskar Vratsa	Groupe 1
12	100,00%	Lesovo	
9	100,00%	North West Bulgaria	
5	100,00%	Panagyurski - Chelopech	Groupe 2
4	100,00%	Panagyurski - Radka	
7	100,00%	South Kardzhali	
14	100,00%	Thracian - AzmaskaMogila	
7	100,00%	Thracian - BereketskaMogila	
3	100,00%	Thracian - Chatalka	
39	100,00%	Rhodope	Groupe 4
170	99,41%	Total	

La combinaison du découpage de certaines zones de gisements différents et le regroupement de gisements proches, en termes de signature isotopique, permet un gain important dans la précision des données.

- 36 Enfin, certains gisements éloignés géographiquement présentent la même signature isotopique (**fig. 7**). Dans ce cas, c'est la distance et la discontinuité géologique qui empêche d'opérer le regroupement des signatures isotopiques. Le choix entre telle ou telle provenance sera discuté en fonction des paramètres archéologiques de prélèvement, d'analyses complémentaires et de la distance relative aux gisements potentiels envisagés.

Fig. 7 : Exemple de signatures isotopiques proches pour des gisements éloignés



Le district de Burgas (en vert) ou encore Cannakale (en marron) s'individualisent parfaitement sur les facteurs 1 et 2 de l'AFD. Cependant, Avon en Angleterre (en rouge) et Beersheva en Israël (en bleu) présentent une signature proche et difficile à distinguer. De plus, un travail de découpage demande à être effectué sur les données de Beersheva dont la dispersion semble indiquer au moins deux populations distinctes (l'une ayant une valeur en facteur 1 moyenne proche de 1 et l'autre entre 4 et 6).

- 37 Le classement des sources cuprifères selon leurs signatures isotopiques est ainsi réalisé. Il est utilisé pour déterminer la provenance des artefacts.

Validation du modèle minéral

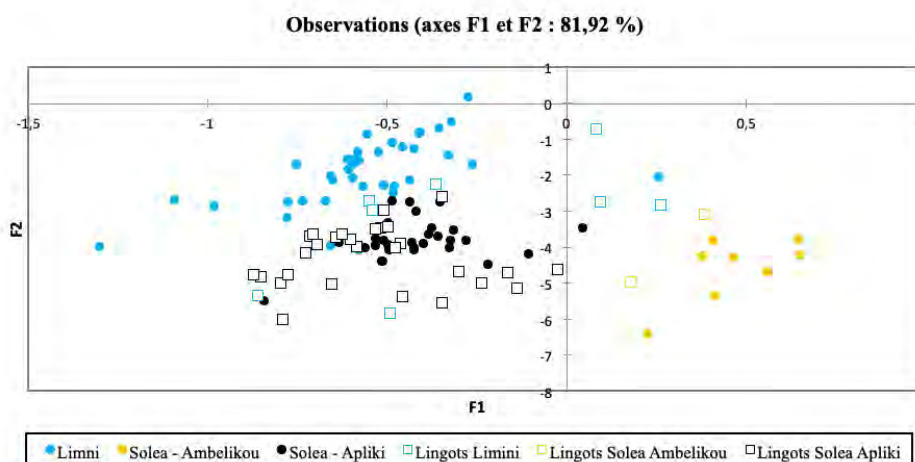
- 38 Aucun prétraitement des signatures isotopiques des artefacts ne peut être réalisé, car pour chaque objet une seule mesure est disponible. Avant de traiter un corpus d'objets usuels, et afin de s'assurer de la robustesse de la méthode, un travail de validation de l'outil a été réalisé sur des lingots de provenance connue.

Le jeu de validation : les lingots

- 39 Les lingots sont utilisés comme échantillonnage de validation du modèle car :
- ils ne sont, a priori, peu soumis aux problèmes de refonte et de mélange des sources de minéral ;
 - ils permettent de vérifier la continuité des signatures isotopiques entre minerais et artefacts ;
 - ils fournissent un ensemble d'artefacts typo-chronologiquement homogènes.
- 40 Les lingots dits « peau de bœuf » possèdent une origine chypriote (Kassianidou, 2013). Plusieurs districts miniers protohistoriques sont supposés à Chypre.

- 41 Les lingots à peau de bœuf sont donc ajoutés à l'AFD, et leur signature isotopique est comparée à celle de l'ensemble des minerais de la base Oxalid²⁰.

Fig. 8 : Les facteurs 1 et 2 de l'AFD présentent une partie des résultats



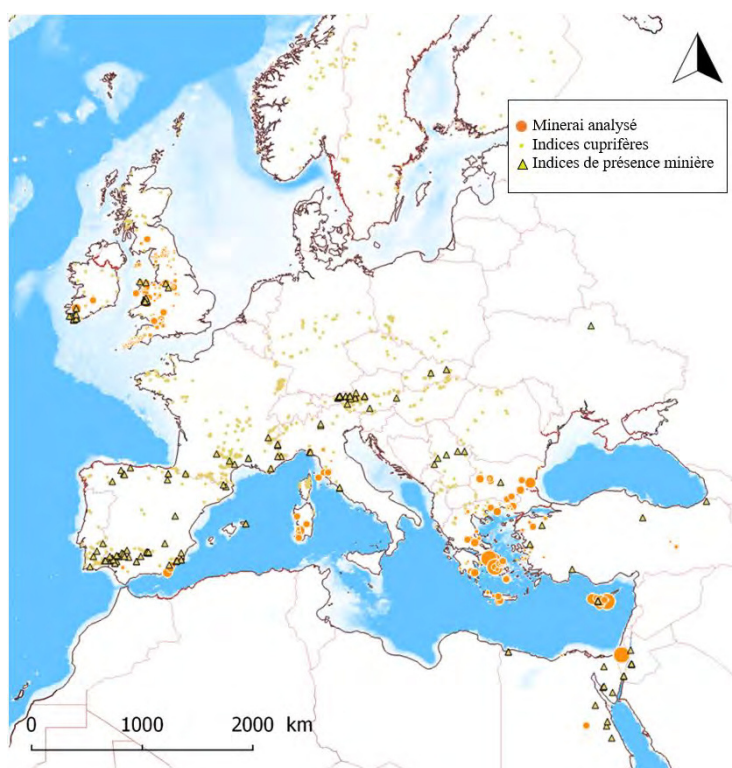
Les lingots chypriotes sont correctement réattribués et leur source est définie par le modèle comme principalement originaire de deux districts miniers chypriotes : Limini et Solea.

- 42 Les résultats de l'AFD montrent une association claire entre la signature isotopique des lingots chypriotes à des districts miniers chypriotes (**fig. 8**): l'AFD associe correctement les lingots à leur origine connue.
- 43 Les tests d'AFD sur produits semi-finis étant concluants, il est alors possible de tester l'ensemble des produits finis. Leur signature est, de la même manière, comparée aux groupes statistiques de minerais précédemment définis.
- 44 Les résultats de prédiction de l'AFD peuvent être interprétés en fonction de la probabilité de leur provenance ainsi fournie. Une probabilité $<0.95^{21}$ peut être questionnée, et une provenance présentant une probabilité $<0.75^{22}$ ne sera pas considérée.
- 45 Les provenances mal définies peuvent s'expliquer par deux éléments principaux :
- leur minerai n'est pas référencé dans Oxalid ;
 - ils sont issus d'un mélange de différentes sources (minerais ou objets recyclés).

Perspectives

- 46 La base Oxalid, bien que très riche, ne couvre pas l'ensemble des zones cuprifères européennes. Ainsi, des mines connues pour avoir été exploitées à l'âge du Bronze et/ou au Néolithique sont absentes de la base de données, et d'éventuelles productions de ces mines ne seront pas reconnues par l'analyse statistique (**fig. 9**). De la même manière, des régions cuprifères entières sont à ajouter dans le modèle, car, sans l'ajout de ces grandes provinces métallogéniques, le modèle reste imprécis.

Fig. 9 : Comparaison entre la localisation des minerais analysés et ceux répertoriés dans la base Oxalid



La localisation des mines datées de la fin du Néolithique et de l'âge du Bronze (triangles jaunes)
(source : Tomczyk, 2017)

– et la localisation des indices cuprifères européens (source : base ProMine, <http://promine.gtk.fi/>).
On constate la présence de nombreuses lacunes : certains sites où du cuivre est présent et parfois même exploité à la Protohistoire ne présentent pas de minerai analysé.

Conclusion

- 47 Le traitement statistique présenté constitue une solution novatrice au problème du traçage de provenance par isotopie du plomb.
- 48 Il présente de nombreux avantages par rapport à la méthode « de diagrammes binaires classiques » : il est plus rapide, permet de prendre en compte plus de variables, et donc d'étudier les provenances en intégrant un plus grand nombre de régions (ce qui est très important pour l'âge du Bronze, période durant laquelle les échanges à grande distance se multiplient (Earle *et al.*, 2015 ; Ling *et al.*, 2014 ; Timberlake, 2017 ; Jones, 2007).
- 49 De plus, un traitement par AFD avec des regroupements statistiques des sources de minerais, ainsi qu'un calcul de provenance comparant sources et produits (semi)-finis, présente l'intérêt de proposer une probabilité d'affectation et permet d'avoir un regard critique sur les résultats.
- 50 La base de données partagée Oxalid a permis d'élaborer un modèle fiable, qui demande à être complété par de nouvelles métadonnées. En effet, pour que le modèle statistique produit soit le plus précis possible, il faudra l'enrichir de nouvelles données sources géologiques. La base de données Oxalid ne regroupant qu'une petite partie des gisements de cuivre en Europe.

- 51 Enfin, un travail de bibliographie (et peut-être d'échantillonnage pour compléter les zones à potentiel cuprifère important encore non analysées) sera effectué dans les mois qui viennent. Ce travail permettra d'intégrer de nouvelles métadonnées venant compléter le modèle existant.

BIBLIOGRAPHIE

- Cassard D., Bertrand G., Billa M. *et al.*, « ProMine Mineral Databases: New Tools to Assess Primary and Secondary Mineral Resources in Europe », dans Weihed P. (dir.), *3D, 4D and Predictive Modelling of Major Mineral Belts in Europe*, Cham, Springer International Publishing, 2015, p. 9-58. DOI : 10.1007/978-3-319-17428-0_2.
- Earle T., Ling J., Uhnér C. *et al.*, « The Political Economy and Metal Trade in Bronze Age Europe: Understanding Regional Variability in Terms of Comparative Advantages and Articulations », *European Journal of Archaeology*, 18, 2015, p. 633-657. DOI : 10.1179/1461957115Y.0000000008.
- Jones M.R., « Oxhide Ingots, Copper Production, and the Mediterranean Trade in Copper and other Metals in the Bronze Age », thèse de doctorat, Texas A&M University, 2007. En ligne : <http://hdl.handle.net/1969.1/5957>.
- Kassianidou V., « The Production and Trade of Cypriot Copper in the Late Bronze Age. An Analysis of the Evidence », *Pasiphae*, VII, 2013, p. 133-146. DOI : 10.1400/212818.
- Ling J., Stos-Gale Z., Grandin L. *et al.*, « Moving metals II: Provenancing Scandinavian Bronze Age Artefacts by Lead Isotope and Elemental Analyses », *Journal of Archaeological Science*, 41, 2014, p. 106-132. DOI : 10.1016/j.jas.2013.07.018.
- Longman J., Veres D., Ersek V. *et al.*, « Quantitative Assessment of Pb Sources in Isotopic Mixtures Using a Bayesian Mixing Model », *Nature, Scientific Reports*, 8, 2018. En ligne : <https://www.nature.com/articles/s41598-018-24474-0>.
- Marcoux É., « Isotopes du plomb et paragenèses métalliques, traceurs de l'histoire des gîtes minéraux. Illustration des concepts de source, d'héritage et de régionalisme dans les gîtes français : applications en recherche minière », thèse de doctorat, université Clermont Ferrand II, *documents du BRGM*, 117, 1986.
- Milot J., « Utilisation des isotopes du fer pour le traçage des métaux anciens : développement méthodologique et applications archéologiques », thèse de doctorat, université de Toulouse, université Toulouse III, 2016. En ligne : <http://thesesups.ups-tlse.fr/3564/>.
- Pernicka E., « Provenance Determination of Archaeological Metal Objects », dans Roberts B. W., Thornton C. P. (dir.), *Archaeometallurgy in Global Perspective*, 2014, p. 239-268. DOI : 10.1007/978-1-4614-9017-3_11.
- Spanakis I., « Μελέτη των ιστορικών μεταλλευτικών δραστηριοτήτων στην Δυτική Κρήτη », mémoire de licence, Technical University of Crete, 2015. En ligne : <https://dias.library.tuc.gr/view/24542>.

Stos-Gale Z.A., Gale N.H., « Metal provenancing using isotopes and the Oxford archaeological lead isotope database (OXALID) » *Archaeological and Anthropological Sciences*, 1/3, 2009, p. 195-213. DOI : 10.1007/s12520-009-0011-6.

Timberlake S., « New Ideas on the Exploitation of Copper, Tin, Gold, and Lead Ores in Bronze Age Britain: The Mining, Smelting, and Movement of Metal », *Materials and Manufacturing Processes*, 32, 2016, p. 709-727. DOI : 10.1080/10426914.2016.1221113.

Tomczyk C. , « Critères de mise en exploitation des gisements de Cu et Sn au Néolithique et à l'âge du Bronze en Europe », mémoire de master 2 dirigé par Christophe Petit et Patrice Brun, université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 2017.

NOTES

1. Ce type de diagramme impose également une limitation quant au nombre de données pouvant être comparées. Les tests ne portent donc que sur des régions sélectionnées par les auteurs.
2. Ce qui nous permettra de vérifier le modèle statistique produit en se basant sur des lingots d'origine connue ou encore, de vérifier que des scories liées à un gisement donné sont bien rattachées statistiquement au gisement en question.
3. Les mines du Laurion, Copa Hill ou encore the Great Orme, par exemple.
4. Un spectromètre de masse VG-38-54-30 à double focus, précision des données constantes à ± 0.1 % ou mieux
5. Seul ratio ^{204}Pb utilisé en archéologie, couramment utilisé en archéologie et en géologie.
6. Cependant le ^{204}Pb possède la plus faible abondance naturelle moyenne : 1,4 % comparativement aux isotopes radioactifs : 52,4 % pour le ^{208}Pb , 22,1 % pour le ^{207}Pb et 24,1 % pour le ^{206}Pb .
7. Certains rapports isotopiques étant calculés à partir d'autres rapports.
8. Seules quelques veinules centimétriques sont connues dans des niveaux de phyllades.
9. À noter que le cas de figure se pose aussi pour certaines parties de l'Angleterre et du Péloponnèse.
10. Les ratios isolés, trop éloignés de la signature régionale, et pouvant être liés à des erreurs analytiques, sont ainsi supprimés afin d'obtenir la vision la plus précise possible de la signature isotopique régionale
11. Il s'agit du test le plus couramment utilisé pour déterminer si un paramètre donné est supérieur ou inférieur à sa valeur moyenne dans la population. Les tests bilatéraux considèrent la population comme homogène alors que des tests unilatéraux prennent en compte de possibles découpages de la population de départ
12. Résultant d'un épisode minéralisateur unique et donc ponctuel à l'échelle des temps géologiques.
13. Amas hydrothermaux-sédimentaires ou volcano-sédimentaires, par exemple.
14. Formés par la superposition d'épisodes minéralisateurs.
15. Une pondération peut également être envisagée dans le traitement statistique multivarié.
16. La distance au Khi^2 correspond à l'écart entre les valeurs théoriques et les valeurs réelles. Cet écart de valeur est mesuré à la fois entre chaque groupe de population et à l'intérieur même du groupe de population (les groupes de population correspondent ici aux régions de la base de données).
17. La signature isotopique étant extrêmement sensible à l'ensemble des processus géologiques.
18. Tant que le nombre d'échantillons définissant le groupe reste suffisant.
19. Il est impossible de présenter la somme des données sur un même tableau. Cet exemple est représentatif du fonctionnement de l'outil statistique.

20. L'AFD offre la possibilité de confronter le modèle obtenu suite au traitement des données minerais à un jeu de validation fourni par les lingots provenant de contextes fouillés.

21. Soit inférieure à plus de 95 % de certitude.

22. Donc inférieur à 75 % de certitude.

RÉSUMÉS

La base de données Oxalid rassemble des analyses isotopiques effectuées tant sur des minerais que des produits (semi) finis datant majoritairement de l'âge du Bronze. Cette étude propose l'application d'un traitement statistique multivarié à cette base de données partagée.

Un prétraitement est effectué dans le but de sélectionner les données de minerais. Cinq ratios isotopiques définissant la signature isotopique de ces minerais sont traités à l'aide des statistiques multivariées (CAH, AFD). Les regroupements effectués d'après les données analytiques sont confrontés à la localisation des échantillons analysés. Une fois la signature isotopique des gisements cuprifères définie, l'outil de détermination de provenance est testé. On utilise pour cela des lingots dont le gisement d'origine est connu. Le lien entre minerais et objets (semi-finis) est ainsi validé. Il devient alors possible de proposer une provenance aux artefacts archéologiques cuivreux pour lesquels la signature isotopique a été déterminée.

The Oxalid database gathers isotopic analyzes on both ores and (semi)finished products dating mainly from the Bronze Age. This study presents the application of multivariate statistical processing to this shared database.

A pre-processing is done first in order to select the ore data on their relevancy. Five isotopic ratios defining the isotopic signature of these ores are processed using multivariate statistics (AHC, DFA). Population groups are made according to the analytical data and confronted with the location of the analyzed samples. Once the isotopic signature of the copper deposits has been defined, the provenance determination tool is tested. Ingots whose ore deposit of origin is known are used for this purpose. (Ingots data are also present in the Oxalid database). The link between minerals and objects (semi-finished) is thus validated. It then becomes possible to propose a provenance to the cuprous archaeological artefacts for which the isotopic signature has been determined.

INDEX

Mots-clés : statistique, isotopie du plomb, protohistoire

Keywords : statistic, lead isotopy, protohistory

AUTEURS

CÉLINE TOMCZYK

Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, ArScAn UMR7041

Thèse sous la direction de Christophe Petit et Patrice Brun : « Formation et caractérisation des

réseaux d'échange de la fin du Néolithique au premier âge du Fer en Europe : contribution de l'étude de l'exploitation des minerais non-ferreux et des productions métalliques »

KÉVIN COSTA

Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, ArScAn UMR7041

Thèse sous la direction de Patrice Brun : « Une ressource cuprifère longtemps débattue : le cuivre de la France Atlantique (Age du Bronze, premier Age du Fer) »

ALAIN GIOSA

Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne, ArScAn UMR7041

Thèse sous la direction de Christophe Petit : « Les agrosystèmes antiques du Châtillonnais : approche archéopédologique de la mémoire des forêts dans les parcellaires reconnus par télédétection LiDAR »