Chapitre 8

La circulation des objets en or

Maria Filomena Guerra
CNRS - UMR 8096 ArchAm, Maison Archéologie & Ethnologie - 21, allée de l'Université, 92023 Nanterre, France

8.1 Introduction

Depuis des millénaires l'or est convoité et transformé de façon à réaliser une infinité d'objets – parures, reliquaires, monnaies, objets funéraires, bijoux, etc. – intrinsèquement liés à différents aspects de la vie d'une société [1].

Le nombre de sources d'or est néanmoins restreint et si le quartz aurifère (or filonien) a été exploité dans le passé, notamment à l'Âge du Fer dans le sud de la France [2], ce sont les gisements détritiques, ou placers, formés après érosion du fond rocheux, qui ont été le plus souvent exploités pour approvisionner les anciens ateliers de production. L'utilisation de ce type de sources d'or a été mise en évidence pour beaucoup d'objets, notamment les parures découvertes lors des fouilles de la nécropole de Varna, datées du V^{e} millénaire av. J.-C. [3]. L'exploitation de placers était en effet plutôt aisée, ce qui ouvrait de nouvelles possibilités métallurgiques. Il suffisait de récupérer par simple orpaillage les pépites et paillettes d'or qui pouvaient ensuite être simplement chauffées et fondues pour fabriquer par martelage des objets de forme simple, mais qui mettaient en valeur celui qui les possédait.

Les caractéristiques des alliages fabriqués par utilisation directe de pépites et paillettes d'or dépendent toutefois de la composition des propres paillettes, c'est-à-dire de la géochimie du gisement exploité. Les pépites et paillettes d'or sont en effet constituées de teneurs variables d'argent et de cuivre, ce dernier généralement présent en-dessous de 2 %. Ainsi, l'or provenant d'un certain placer possède des propriétés mécaniques, chimiques et physiques ainsi qu'optiques (couleur) particulières. Cette variation des propriétés de l'or selon le gisement exploité a ouvert de nouvelles possibilités en ce qui concerne par exemple la polychromie. L'effet polychrome du métal jaune a pu ainsi être obtenu par utilisation d'ors provenant de divers gisements, c'est-à-dire avec différentes teneurs d'argent. Beaucoup d'objets fabriqués en Egypte au II^{e} millénaire av. J.-C. montrent cette variété de sources de métal jaune, comme par exemple le

collier de la figure 8.1 qui appartient à la momie d'un enfant trouvée par Flinders Petrie à Qurnah [4], datée de la XVII^{e} dynastie, dont les teneurs en argent des petites perles en or qui le constituent varient de 17 à 32 % [5]. L'ajout de cuivre aux alliages naturels amplifie le spectre de couleurs, comme pour le collier de Qurnah. Pour celui-ci le cuivre varie de 0,6 à 2,6 %. L'ajout de cet élément permet également de modifier certaines propriétés de l'alliage comme sa dureté (par exemple pour la fabrication de parties plus résistantes, comme des fermoirs) et son point de fusion (par exemple lors de la jonction de divers éléments d'un objet par brasure).

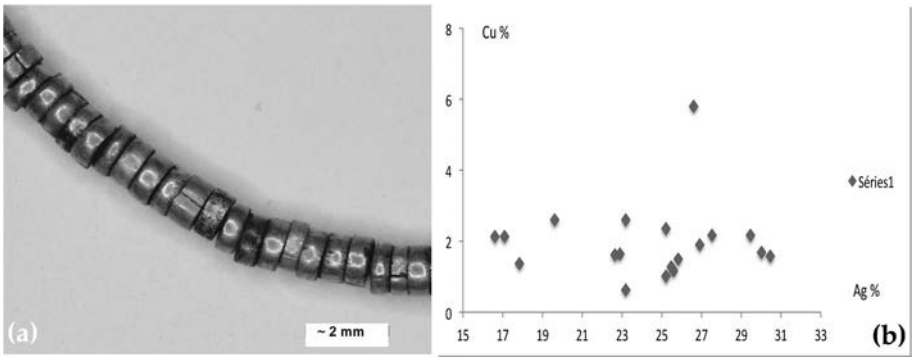


Figure 8.1 – Collier de la momie d'un enfant trouvée à Qurnah par Flinders Petrie et conservée au National Museums Scotland (XVII^{e} dynastie) : (a) détail sous loupe binoculaire montrant la variété des couleurs des alliages (image M. Guerra) et (b) teneurs en Cu et Ag déterminées par MEB-EDS [5].

Si l'on a su rapidement additionner du cuivre à l'or naturel, certainement parce que la technique de coupellation a été utilisée très tôt pour l'affinage (par oxydation) des métaux, ce n'est qu'au I^{er} millénaire av. J.-C. que l'or va être séparé de l'argent par cémentation (par production de sels). Les vestiges archéologiques les plus anciens trouvés pour l'utilisation de cette technique datent du VII^{e} siècle av. J.-C. [6]. Il a enfin été possible à cette époque de produire de l'or « pur » qui pouvait ensuite être allié au cuivre et à l'argent, selon les choix de l'artisan, pour produire, sans avoir besoin d'avoir accès à plusieurs gisements, des alliages avec des compositions précises, donc avec des propriétés particulières et adaptées à la finalité de la pièce et à l'effet optique recherché.

Tout au long de ces opérations métallurgiques beaucoup d'informations sur le métal natif et ainsi sur la localisation de la source d'or sont perdues, ce qui rend difficile, dans la majorité des cas, le lien entre la composition d'un objet d'or fini et la source de matière première. S'il est parfois possible d'attribuer un objet à un atelier de production et même de déceler un changement d'approvisionnement de matière première au sein d'un atelier, la provenance de l'or peut ne pas être identifiée et un objet peut donc ne pas pouvoir être relié à une région géochimique par manque de critères de caractérisation [7]. Cette difficulté augmente à partir du I^{er} millénaire av. J.-C. par la complexité des opérations d'affinage des métaux et la fabrication des alliages. Mais c'est la réutilisation par mélange et refonte, surtout pendant les périodes économiquement défavorables, c'est-à-dire lorsque l'accès aux sources est coupé ou que celles-ci

sont épuisées, qui finit parfois par « brouiller les pistes » et empêcher d'obtenir les bons indices de provenance.

Il est ainsi évident qu'identifier l'origine de l'or et suivre la circulation des productions matérielles n'est pas un exercice aisé, mais dont la complexité varie selon le type d'objet, la période concernée et les sources d'or exploitées [8]. Pour certaines périodes et certains gisements, lors que la stratégie analytique est préalablement bien définie, il est possible de déterminer la provenance de la matière première ou de la production matérielle, mais il faudra toutefois avoir dans certains cas un « œil expert » qui va déceler des indices particuliers d'attribution à une certaine production (tradition d'atelier, main de l'artisan, etc.) comme les traces d'outils. D'autres cas restent complexes, car il s'agit soit des ors dont les caractéristiques sont difficiles à établir ou à suivre, soit des alliages fabriqués par mélange et refonte d'autres alliages et ainsi difficiles à relier à une source originelle. Quelques uns de ces cas sont illustrés dans les paragraphes suivants.

8.2 Provenance et morphologie

8.2.1 Les éléments de décoration

Les études morphologiques basées sur des méthodes d'examen qui permettent d'observer un objet sous diverses lumières et radiations, fournissent des informations essentielles pour la définition des critères d'attribution de certaines technologies et savoir-faire à des traditions géochronologiques d'ateliers de production. Les indices chronologiques concernent très souvent les techniques de décoration dites par ajout d'éléments métalliques, surtout la granulation et le filigrane dont l'ajout implique non seulement l'intervention des techniques de fabrication des éléments ajoutés mais aussi de leur jonction à chaud.

La figure 8.2 illustre quatre types de filigranes dont la morphologie est en général typique de la période de fabrication :

— le filigrane (a) décore une bague trouvée à Harageh, datée de la XVIII^{e} dynastie égyptienne [5] (XV^{e} siècle av. J.-C.). Le fil a été fabriqué en roulant avec peu d'expertise une plaque d'or (à certains endroits des petits bouts se détachent) ; ce fil a été ensuite légèrement étiré/poli dans une matière de type peau qui laisse en plus d'un sillon très irrégulier, des rayures visibles dans les régions protégées de l'usure ;
— le filigrane creux tordu (b) décore une fibule étrusque datée du VI^{e} siècle av. J.-C. [9] ; le fil, de diamètre très fin (qui peut atteindre moins de 150 μm), a été obtenu en roulant avec grande expertise une feuille d'or entre deux plaques constituées d'un matériau rigide, ce qui laisse un sillon régulier visible sur toute la longueur du fil ;
— le filigrane lisse (c) décore une boucle d'oreille moderne fabriquée au XIX^{e} siècle [10] ; ce fil a été obtenu en étirant à l'aide d'une filière moderne un fil plein, de façon à diminuer son diamètre jusqu'à atteindre l'épaisseur souhaitée ; ce procédé laisse des stries visibles sur le fil qui correspondent aux marques du perçage de la filière ;

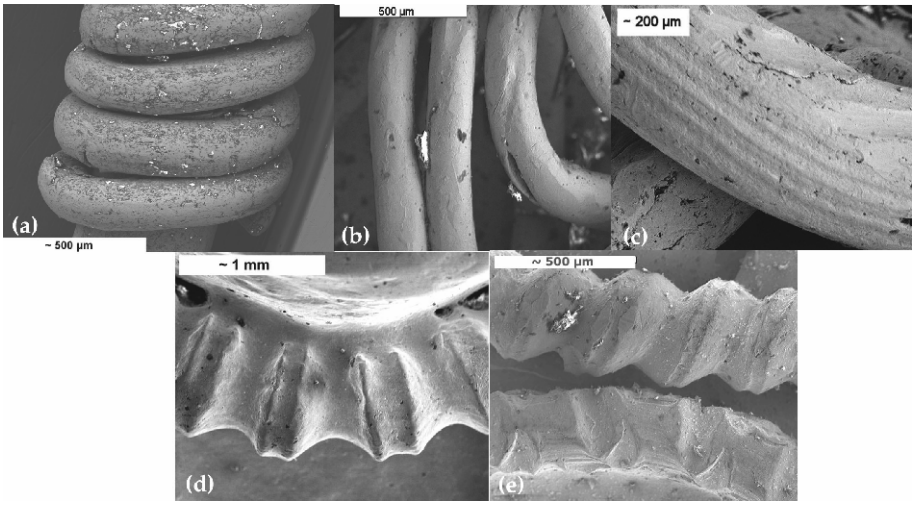


FIGURE 8.2 – Images en électrons secondaires obtenues au MEB (M.F. Guerra) pour des filigranes de décoration d'objets : (a) égyptien, II^{e} millénaire av. J.-C. ; (b) étrusque, VI^{e} siècle av. J.-C. ; (c) moderne, XIX^{e} siècle ; (d) mérovingien, VI^{e} siècle ; (e) restauration moderne avec ajout d'un fil « ciselé ».

— le filigrane perlé (d) décore une bague trouvée dans une tombe mérovingienne datée du VI^{e} siècle de notre ère [11] ; le fil a été obtenu avec un outil proche de l'*organarium* décrit par le moine Théophile page 217 de son traité [12], c'est-à-dire un outil qui « lime » le fil en formant des perles et en laissant des sillons au milieu de la perle [13].

Les filigranes des figures 8.2 (a) à 8.2 (d) sont typiques des périodes indiquées et permettent d'avancer des hypothèses d'attribution sur un objet d'orfèvrerie décoré en motifs filigranés. Ainsi, lorsqu'un filigrane « insolite » est trouvé sur un objet dont la période de fabrication est connue, comme celui de la figure 8.2 (e) – dans ce cas le fil perlé a été imité par ciselure d'un fil lisse – il est alors possible de reconnaître une intervention récente, par exemple de restauration [14].

8.2.2 Les inclusions de platinoïdes

L'exploitation de gisements alluvionnaires par orpaillage de l'or fait que les pépites et paillettes récupérées dans la batée viennent, surtout pour les paillettes très fines, mélangées avec d'autres minéraux dont la densité est la même que celle de l'or. En effet, un placer est constitué de minéraux lourds concentrés par gravité, dont l'or, mais aussi la cassitérite, le mercure, les éléments du groupe du platine ou platinoïdes, etc. Ces minéraux, variables avec la région géochimique, sont introduits avec l'or dans le creuset et, si leur point de fusion n'est pas très inférieur à celui de l'or, des vestiges peuvent être trouvés dans le métal même après affinage. C'est pour cette raison que la présence d'étain et de platinoïdes (normalement un mélange d'éléments plus ou moins lourds) dans l'or est un indice évident d'utilisation d'or alluvionnaire [15]. Ces derniers ont des points de fusion très élevés (le plus bas est celui du palladium à

environ 1553° C) et restent dans l'or sous forme d'inclusions dont les dimensions peuvent être suffisamment élevées pour être visibles à la surface d'un objet à l'œil nu ou à très faible grossissement.

La bague mérovingienne de la figure 8.3 (a) est un cas typique d'attribution de provenance par présence de platinoïdes. Datée du V^{e} siècle de notre ère, cette bague masculine trouvée à Louviers est constituée d'un cartouche gravé rapporté par soudure et d'un anneau circulaire forgé, de section ovalaire, décoré de motifs peltiformes remplis de nielle [16]. L'analyse de ces deux éléments par PIXE avec un faisceau de protons de 3 MeV (dont les conditions expérimentales ont été optimisées pour l'analyse d'objets en or [17]) montre des alliages différents et l'analyse semi-quantitative par MEB-EDS de la région de jonction montre l'utilisation de la technique de brasure avec un alliage aux fortes teneurs en cuivre (tableau 8.1).

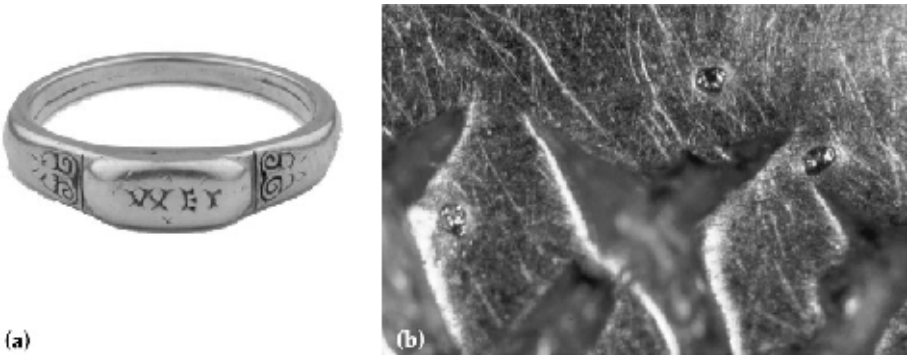


Figure 8.3 – (a) Bague mérovingienne de la tombe S191 de la nécropole de Louviers (photographie D. Bagault) et (b) inclusions de platinoïdes sur le cartouche gravé [16].

Tableau 8.1 – Composition des deux éléments de la bague mérovingienne en or de la figure 8.3 obtenue par PIXE et de la soudure obtenue par MEB-EDS [16]. Le cartouche a été réalisé avec un alliage de couleur jaune alors que l'anneau présente une couleur jaune-rouge [18].

Partie de la bague	Au (%)	Ag (%)	Cu (%)
Anneau	82,7	13,5	3,5
Cartouche	92,4	5,9	1,2
Jonction	86	4	10

Des inclusions de platinoïdes sont visibles à la surface du cartouche (figure 8.3 (b)) alors qu'aucune inclusion n'a pu être décelée à la surface de l'anneau. Ce résultat est suffisant pour affirmer qu'il s'agit d'ors de provenance différente et que celui utilisé pour la fabrication du cartouche est de type alluvionnaire. Pour aller plus loin sur la provenance des ors des deux parties de la bague il faudrait d'une part réussir à mettre en évidence des éléments caractéristiques de l'or de l'anneau et d'autre part faire une étude plus approfondie du cartouche. L'analyse par MEB-EDS de celui-ci révèle en effet des inclusions de platinoïdes de diamètres entre 10 et 150 μm, constituées de

teneurs variables de Ru, Os, Ir et Pt, ce qui nous permet d'avancer l'hypothèse d'une transformation ou d'une réparation de la bague par fonte d'un solidus (la présence de platinoïdes à la surface de solidi a été décélée par divers auteurs, par exemple [19]) sachant que ces monnaies circulaient en Gaule au V^{e} siècle [20]. Cette hypothèse est confortée par la présence sur les deux éléments de la bague de traces d'outils différents, indice d'une fabrication par deux orfèvres distincts [16].

8.3 Les ors avec un élément caractéristique

8.3.1 Changement d'approvisionnement

Les deux éléments de la bague de la figure 8.3 sont réalisés à partir d'ors de provenances différentes. Si la présence d'inclusions de platinoïdes est suffisante pour pouvoir avancer une hypothèse sur l'origine de l'or du cartouche, il reste toutefois à déterminer la provenance de l'or de l'anneau. L'analyse PIXE de la bague a révélé la présence de fortes teneurs en étain : 3200 ppm dans l'anneau et 480 ppm dans le cartouche. La présence de cet élément dans l'or du cartouche est attendue, car il s'agit d'or d'origine alluvionnaire, mais rien ne laissait penser à des fortes teneurs observées pour l'anneau.

Pour vérifier si la présence d'étain était particulière à l'or de la période concernée, neuf perles tubulaires appartenant à une autre sépulture (féminine et datée du IV^{e} - VII^{e} siècle) de la même nécropole ont été analysées par PIXE ainsi que deux bagues en or datées de la fin du V^{e} siècle, trouvées dans la nécropole mérovingienne de Chasseneuil-sur-Bonnieure [21]. L'analyse a révélé pour tous ces objets la présence de fortes teneurs d'étain dans l'alliage d'or. La figure 8.4 montre le rapport entre les concentrations en Sn et Au pour les objets de Louviers et de Chasseneuil-sur-Bonnieure. Sur le graphique de la figure 8.4 ont été ajoutés les résultats publiés par d'autres auteurs pour des objets mérovingiens en or : les bagues de St. Denis et de Jouy-le-Comte publiées par Périn et collaborateurs [22], le trésor de Séviac publié par Labrousse et Lafaurie [23] et des monnaies frappées dans différents ateliers publiées par Blet-Lemarquand et collaborateurs [24]. Il est clair que la plupart des objets possède des teneurs en Sn inférieures à 500 ppm. Néanmoins, cet élément peut dépasser les 3000 ppm soit pour les objets d'orfèvrerie soit pour les monnaies.

La présence de fortes teneurs en étain n'étant pas décelée dans les productions romaines, ce phénomène semble caractéristique de l'or de la période mérovingienne. À cette caractéristique vient s'ajouter l'absence d'inclusions de platinoïdes, typiques à l'époque d'un or de provenance plus « orientale ». Néanmoins, la provenance du métal jaune reste à établir. Sachant les difficultés économiques de l'époque, nous pouvons envisager des refontes courantes et systématiques d'orfèvrerie et monnaies dans les ateliers mérovingiens. Lors de ces opérations de recyclage de métal jaune, quelques bronzes dorés ont pu être fondus (peut-être par erreur ?) avec les objets en or.

8.3.2 Origine et circulation

L'exploitation de sources d'or dont les caractéristiques géochimiques sont très particulières permet de relier un objet fini aux sources de matière première par détermination soit simplement des éléments majeurs des alliages soit des teneurs d'un seul élément

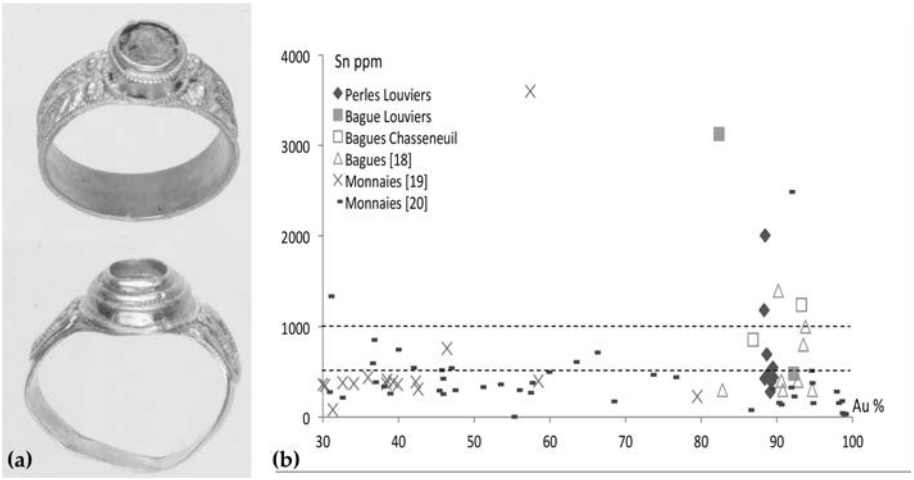


FIGURE 8.4 – (a) Les deux bagues de Chasseneuil-sur-Bonnieure (photographie D. Bagault). (b) Concentrations en or et étain des bagues et perles de Louviers et Chasseneuil-sur-Bonnieure comparées aux teneurs publiées par d'autres auteurs soit pour de l'orfèvrerie [22] soit pour de la monnaie [23,24] mérovingienne.

caractéristique. Les métaux sud-américains sont un exemple incontestable de cette situation favorable dans le cas des études de provenance, qu'il s'agisse des gisements d'or [11] ou d'argent [24].

Il suffit de rappeler les objets de la culture préhispanique La Tolita-Tumaco [26] dont l'analyse a montré que les teneurs en platine, or et argent [27] ainsi qu'en fer [28] dans les alliages sont caractéristiques des alluvions de la région côtière de Colombie-Équateur, ce qui permet d'attribuer à cette civilisation des objets trouvés même en dehors de son aire géoculturelle [29]. Par ailleurs, la forte présence de palladium est caractéristique des ors provenant du Brésil [30] et est facilement décelée dans les lingots provenant des différents ateliers brésiliens au XIX^{e} siècle [31]. La figure 8.5 compare les concentrations en palladium et platine pour des lingots d'or brésiliens publiés par Guerra [32] avec des objets en or de la civilisation La Tolita-Tumaco publiés par Bouchard et Guerra [29] et Barrandon et collaborateurs [33] et les sépare par la provenance.

8.4 Provenance, analyse et bases de données

8.4.1 Les difficultés liées à la méthode d'analyse

Si les méthodes d'analyse isotopique peuvent dans certains cas particuliers être utilisées pour mener des études sur la provenance de l'or – cas des minerais [34] ou d'objets fabriqués par exploitation de certains types de gisement [35] – en général, quand il s'agit de petits objets, ces études doivent être réalisées à l'aide de méthodes d'analyse élémentaire non destructives qui possèdent des bonnes sensibilité et résolution spatiale. Parfois les méthodes existantes ne possédant pas les caractéristiques requises, il faut alors développer méthodes et protocoles appropriés pour résoudre des questions

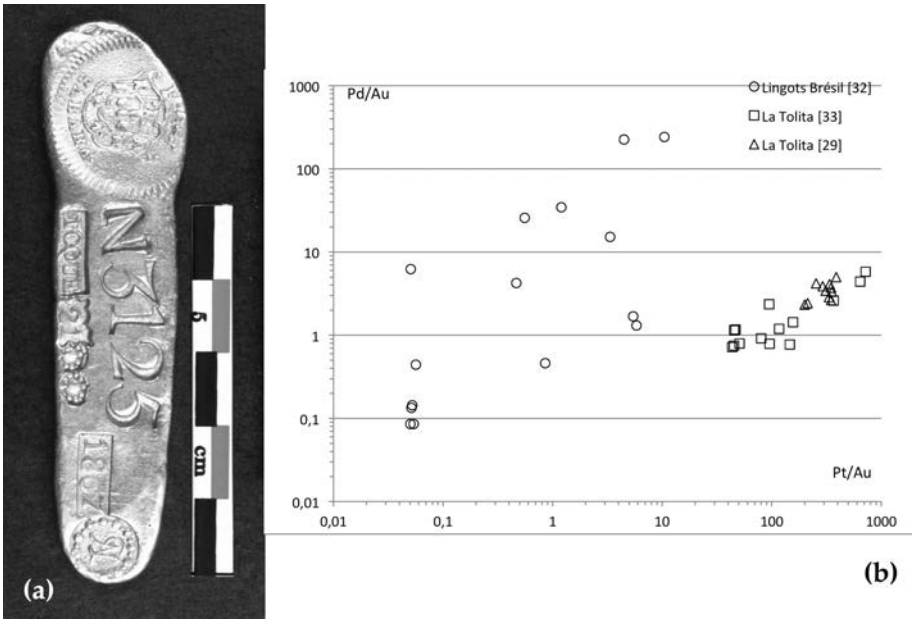


Figure 8.5 – (a) Lingot d'or brésilien datant de 1867 (photographie M.F. Guerra). (b) Concentrations en platine et palladium, normalisées à la teneur en or, déterminées pour des objets en or de la civilisation La Tolita-Tumaco (région côtière, Colombie-Équateur actuelle) [29,33] et pour des lingots en or produits dans des ateliers brésiliens [32].

particulières. La détermination de la provenance des ors livrés par les fouilles de la nécropole Xiongnu de Gol Mod (située à 450 km à l'ouest d'Oulan-Bator), menées par la Mission française d'archéologie en Mongolie, est un exemple typique de cette situation.

Le mobilier des tombes de Gol Mod met en évidence les rapports entre la confédération Xiongnu (qui a dominé un très large territoire au II^{e} siècle av. J.-C.) et la Chine des Hans. Néanmoins, d'une part en Chine les parures en or demeurent très rares, le jade et le bronze constituant jusqu'à la dynastie Han les principaux symboles de statut et de richesse [36], et d'autre part les sites Xiongnu majeurs, dont Gol Mod, Noyon Uul, Boroo Gol, Ivolga, etc., sont tous situés proches de lits de rivières où les placers sont exploités pour leur or. L'analyse par PIXE de feuilles d'or, clous et fragments d'objets d'orfèvrerie trouvés à Gol Mod (figure 8.6 (a)) a révélé des alliages variés, dont la composition est l'attendue pour des ors alluvionnaires et dont la qualité n'est pas en rapport avec l'importance sociale de l'individu enterré (figure 8.6 (b)). L'identification d'un grain de cassitérite dans une des feuilles de la tombe princière (T1) témoigne, du moins pour cette feuille, de la quasi-absence de traitement métallurgique d'un or alluvionnaire [37].

L'analyse de rares objets chinois en or de la même époque révèle des métaux avec un rapport Ag/Au différent et des teneurs en cuivre plus élevées. En effet, les ors de Gol Mod ont une composition proche des ors natifs (placers et quartz aurifères) de

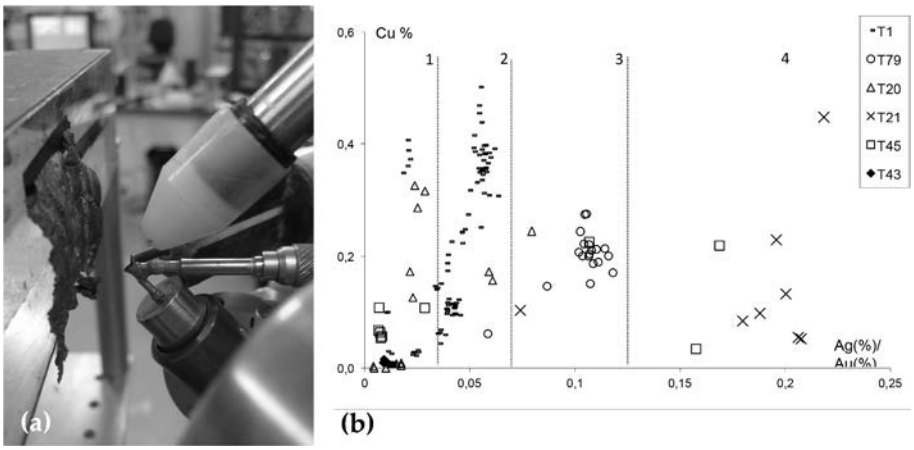


FIGURE 8.6 – (a) Analyse par la méthode PIXE avec faisceau externe d'une des feuilles de la nécropole de Gol Mod (photographie M.F. Guerra). (b) Concentrations en cuivre en fonction du rapport Ag/Au des objets en or livrés par des tombes de Gol Mod de différente importance sociale : princière (T1), aristocratiques (T21 et T79) et satellites (T21, T43 et T45), ces dernières ayant livré une quantité réduite de fragments d'or.

gisements exploités actuellement à proximité, à Zaamar, Boroo et rivière Selenga. Le plus surprenant est que les ors livrés par les fouilles de la nécropole Xiongnu d'Egiin Gol, proche de Gol Mod, possèdent les mêmes caractéristiques, alors que les ors livrés par les fouilles de nécropoles Xiongnu situées dans le Gobi-Altaï sont de composition différente mais proche de la composition des ors natifs (placers et quartz aurifères) des gisements exploités dans l'Altaï mongolien.

Pour vérifier l'hypothèse d'utilisation d'ors alluvionnaires d'origine locale et non des ors ou des objets d'importation chinoise, nous avons cherché, sans succès, des inclusions de platinoïdes car feuilles et fragments d'objets étaient bien trop petits et/ou fins (parfois jusqu'à 30 μm d'épaisseur) pour une mesure du platine par PIXE-XRF [38]. Ainsi nous avons développé un protocole d'analyse XRF basé sur la radiation synchrotron. En utilisant une énergie d'excitation de 11,58 keV et un détecteur de type SDD et en développant une méthode de calcul par Monte Carlo basée sur l'utilisation d'étalons monoélémentaires, nous avons pu atteindre une limite de détection de 3 μg/g pour le Pt [39]. La figure 8.7 montre les teneurs en Pt et Sn dans les ors provenant de quatre tombes de la nécropole de Gol Mod, confirmant par leur présence notre hypothèse d'utilisation d'or alluvionnaire local.

8.4.2 Les difficultés liées aux bases de données de référence

Si nous avons jusqu'ici présenté des cas pour lesquels il a été possible d'avancer des hypothèses sur les changements de sources d'approvisionnement et sur les provenances de l'or, la localisation de la région exploitée ne peut, dans la plus grande partie des cas, être identifiée sans la détermination d'un ensemble d'éléments caractéristiques de l'or, dont les teneurs forment un « patron » spécifique de chaque région. Lorsque ce « patron » est obtenu, pour vérifier la provenance d'un or il suffit de comparer

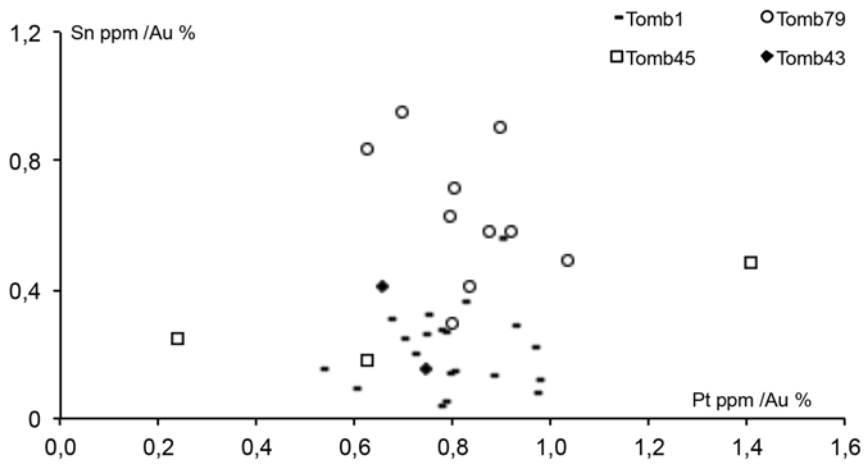


Figure 8.7 – Concentrations en Sn et en Pt normalisées à la teneur en Au pour les objets de quatre tombes de la nécropole de Gol Mod déterminées par SR-XRF [39].

les résultats obtenus avec une base de données, a priori sous forme géochronologique. Ces bases de données peuvent être construites à partir de l'analyse de paillettes et pépites d'or modernes ainsi que d'objets anciens dont le contexte de découverte est parfaitement défini et qui peuvent ainsi être datés et attribués à des régions/ateliers de production.

C'est grâce à une base de données construite à partir de l'analyse d'ors monétaires de la période islamique en Méditerranée [40,41] qu'il a été possible d'attribuer des moules trouvées au Mali pour la fabrication de monnaies d'or [42] et de proposer un lieu de provenance pour monnaies, bijoux et lingots trouvés dans l'épave de Salcombe (Devon, Angleterre), conservés actuellement au British Museum [43]. Ce trésor contient des bijoux cassés et des lingots d'or et quatre cents dinars dont certains appartiennent au règne de Sharif al-Walid (1631-1636). Il a été supposé que les monnaies et les bijoux avaient été fondus pour fabriquer les lingots. L'analyse par ICP-MS en mode liquide [44] d'une sélection de huit lingots, cinq bijoux et huit monnaies a montré que les objets de l'épave de Salcombe forment un groupe chimique unique, qui correspond aux dinars et pépites d'or d'Afrique de l'Ouest analysés auparavant. Ceci nous a permis d'avancer l'hypothèse de refonte de monnaies et bijoux pour le transport de l'or sous forme de lingots et de proposer l'Afrique de l'Ouest comme origine de l'or du trésor de Salcombe.

L'utilisation de bases de données construites à partir d'analyse de monnaies permet de résoudre une partie des questions posées par les études de provenance des ors anciens. Toutefois cette procédure peut être plus complexe à mettre en œuvre pour des périodes de grande instabilité et mouvements de peuples ainsi que pour des objets d'orfèvrerie qui ne dépendent pas d'un « pouvoir » mais des choix techniques et esthétiques des orfèvres. Pour des objets d'orfèvrerie en or décorés avec d'autres matériaux – émaux, gemmes, etc. – la provenance de l'ensemble de ces matières premières pré-

cieuses permet de donner une vision générale des routes de circulation et d'échange, apportant des indices fondamentaux sur la diffusion des savoir-faire et la situation socio-économique d'une région, comme nous l'avons démontré dans le cas du trésor visigotique trouvé dans le village espagnol de Guarrazar [45].

8.5 Conclusion

Le développement de protocoles qui combinent les techniques d'examen aux techniques d'analyse non destructives permettent d'aborder les questions de provenance et circulation tant de l'or que des productions matérielles fabriquées à partir de ce métal.

Les différentes étapes métallurgiques par lesquelles passe le minerai, puis le métal jusqu'à l'obtention d'un objet fini (chaîne opératoire), mènent à la perte d'information sur la source originelle de matière première. Ainsi, dans certains cas, il est possible de déceler un changement d'approvisionnement au sein d'un atelier, ou à une certaine période, ou dans une certaine région, sans que la localisation des gisements exploités puisse être identifiée.

En ce qui concerne les objets d'orfèvrerie il faudra néanmoins remarquer l'importance des techniques de fabrication. En effet, il est toujours envisageable d'obtenir des critères discriminatoires liés tout simplement à certaines techniques, dont l'assemblage par soudure ou la décoration par apport de métal, typiques de certaines aires géoculturelles.

Si pour certaines périodes, ou pour certains types de gisements, les études de provenance et circulation peuvent s'avérer moins complexes, en général il est nécessaire de déterminer un ensemble d'éléments caractéristiques de la géochimie du gisement exploité, dans le cas de l'or au moyen de techniques non destructives. Ainsi, il peut s'avérer dans certains cas nécessaire de développer des techniques analytiques particulières, parfois autour de grands instruments comme le synchrotron, dont les limites de détection et la résolution spatiale donnent accès à la mesure de ces éléments. Mais il faudra prendre en ligne de compte deux difficultés : le fait que l'or est toujours recyclé, souvent par mélange avec des ors d'autres origines, ce qui induit une perte d'information sur le métal originel, et l'absence d'information sur les gisements exploités dans le passé, c'est-à-dire le manque de données de référence qui permettent par comparaison d'avancer des hypothèses sur la localisation des sources d'approvisionnement.

8.6 Bibliographie

[1] M.F. Guerra, I. Tissot, The role of nuclear microprobes in the study and conservation of gold and silver cultural heritage items : an overview. Nucl. Instrum. Meth. B. 306, 227-231, 2013.

[2] B. Cauuet, Les mines d'or antiques d'Europe hors péninsule Ibérique. État des connaissances et travaux récents. Pallas. 67, 241-249, 2005.

[3] C. Eluère, C.J. Raub, « New investigations on early gold foil manufacturing » dans Archaeometry' 90, Ed. Birkhäuser, Berlin. p. 45-54, 1991.

[4] W.M.F. Petrie, Qurneh, British School of Archaeology in Egypt, Pub. 16, London, 1909.

[5] L.G. Troalen, M.F. Guerra, J. Tate, B. Manley, Technological study of gold jewellery pieces dating from the Middle Kingdom to the New Kingdom in Egypt. ArchéoSciences. 33, 111-119, 2009.

[6] P.T. Craddock, M.R. Cowell, M.F. Guerra, Controlling the composition of gold and the invention of gold refining in Lydian. Der Anschnitt. 18, 67-77, 2005.

[7] M.F. Guerra, « Authenticity verification of jewellery and coinages » dans Nuclear Techniques for Cultural Heritage Research, IAEA Radiation Technology Reports, Series 2, Vienna. p. 93-120, 2011.

[8] M.F. Guerra, « The circulation of gold in the Portuguese area from the 5th to the 18th century » dans Ancient gold technology : America and Europe, Anejos de Aesp A XXXII, CSIC, Madrid. p. 423-431, 2005.

[9] M.F. Guerra, « Examen et analyse élémentaire de bijoux étrusques de la collection Campana » dans Les bijoux de la collection Campana : de l'antique au pastiche, Ed. École du Louvre, Paris. p. 145-177, 2007.

[10] M.J. Oliveira, T. Maranhas, A.I. Seruya, F.A. Magro, T. Borel, M.F. Guerra, The jewellery from the casket of Maria Pia of Savoy, Queen of Portugal, produced at Castellani's workshop. ArchéoSciences. 33, 265-270, 2009.

[11] M.F. Guerra, An overview on the ancient goldsmith's skill and the circulation of gold in the past : the role of X-ray based techniques. X-ray Spectrom. 37, 317-327, 2008.

[12] Theophilus Priest and Monk, An Essay upon various Arts, traduit par R. Hendrie, Eds. J. Murray, London, 1847.

[13] N. Whitfield, « More like the work of fairies than of human beings » : the filigree on the « Tara » brooch, a masterpiece of late Celtic metalwork. ArchéoSciences. 33, 235-241, 2009.

[14] M.F. Guerra, « Bijoux étrusques en or : une recherche de faux et pastiches par des méthodes physico-chimiques » dans La parure de Cro-Magnon à Clovis « Il n'y a pas d'Âge(s) pour se faire beau », Ed. CEDARC, Treignes. p. 99-107, 2012.

[15] M.F. Guerra, T. Rehren, In-situ exam and analysis of the gold jewellery from the Phoenician tomb of Kition (Cyprus). ArcheoSciences. 33, 151-159, 2009.

[16] C. Esquès, M.F. Guerra, E. Plé, F. Stutz, Techniques de décoration sans apport de matière par mesure optique sans contact de l'état de surface : première approche aux bijoux mérovingiens. ArchéoSciences. 32, 71-81, 2008.

[17] M.F. Guerra, Fingerprinting ancient gold with proton beams of different energy. Nucl. Instrum. and Meth. B. 226, 185-198, 2004.

[18] R.W. Rapson, The metallurgy of coloured carat gold alloys. Gold Bull. 23, 128-133, 1990.

[19] P.T. Craddock, M.R. Cowell, D. Hook, M. Hughes, S. La Niece, Change and stasis : the technology of Dark Age metalwork from the Carpathian Basin. British Museum Techn. Res. Bull. 4, 55-65, 2010.

[20] J. Lafaurie, Trésor de monnaies d'or du V
textsuperscripte siècle trouvé en 1803 à Combertault (Côte-d'Or). Rev. Numismatique. 26, 145-160, 1984.

[21] M.F. Guerra, Role of radiation physics in the study and authentication of ancient gold work. Radiation Physics and Chemistry. 95, 356-361, 2014.

[22] P. Périn, T. Calligaro, L. Buchet, J.J. Cassiman, Y. Darton, V. Gallien, J.P. Poirot, A. Rast, C. Rücker, F. Vallet, La tombe d'Arégonde. Nouvelles analyses en laboratoire du mobilier métallique et des restes organiques de la défunte du sarcophage 49 de la basilique de Saint-Denis. Antiquités Nationales. 37, 181-206, 2005.

[23] M. Labrousse, J. Lafaurie, Trésor de monnaies mérovingiennes du VII^{e} siècle trouvé à Montréal (Gers) lors des fouilles de la villa de Séviac. Bull. Soc. Fran. Numism. 6, 222-227, 1987.

[24] M. Blet-Lemarquand, M. Bompaire, C. Morrisson, Platine et plomb dans les monnaies d'or mérovingiennes : nouvelles perspectives analytique. Rev. Numismatique. 166, 175-198, 2010.

[25] M.F. Guerra, « The mines of Potosi : a silver Eldorado for the European economy » dans Ion beam study of art and archaeological objects, Ed. DGRI, European Commission, p. 88-94, 2000.

[26] J.F. Bouchard, P. Usselmann, Trois millénaires de civilisation entre Colombie et Équateur. La région Tumaco La Tolita. Ed. CNRS, Paris, 154 pages, 2003.

[27] D.A. Scott, W. Bray, « Pre-Hispanic platinum alloys : their composition and use in Ecuador and Colombia» dans Archaeometry of Pre-Columbian Sites and Artefacts, The Getty Conservation Institute, Los Angeles. p. 285-322, 1994.

[28] D.A. Scott, Technical examination of ancient South American metals : some examples from Colombia, Peru and Argentina. Boletín Museo del Oro. 44-45, 79-115, 1998.

[29] J.F. Bouchard, M.F. Guerra, Archéologie précolombienne et analyses scientifiques. La figurine d'El Angel, une œuvre composite d'orfèvrerie de la culture La Tolita-Tumaco (Équateur-Colombie). ArchéoSciecces. 33, 273-279, 2009.

[30] J. Jedwab, J. Cassedane, Historical observations on oxygen-bearing compounds of platinum and palladium in Minas Gerais, Brazil. The Canadian Mineralogist. 36, 887-93, 1998.

[31] M.F. Guerra, T. Calligaro, Gold cultural heritage objects : a review of studies of provenance and manufacturing technologies. Meas. Sci. Technol. 14, 1527-1537, 2003.

[32] J.N. Barrandon, F. Valdéz, P. Estevéz, « Identificación mineralógica de las fuentes del oro precolombino en la metalurgia prehispánica del Ecuador» dans Tecnología del oro antiguo : Europa y América. Ed. Anejos de AESPA XXXII, CSIS, Madrid. p. 403-416, 2004.

[33] M.F. Guerra, The circulation of South American precious metals in Brazil at the end of the 17th century. J. Archaeol. Science. 31, 1225-1236, 2004.

[34] S. Baron, C.G. Tamas, B. Cauuet, M. Munoz, Lead isotopes of gold - silver ores from Rosia Montana (Romania) : a first step of metal filiation study of Roman mining activity in Alburnus Maior (Roman Dacia). J. Archaeol. Science. 38, 1090-1100, 2011.

[35] S.A. Junk, E. Pernicka, An assessment of osmium isotope ratios as a new tool to determine the provenance of gold with platinum group metal inclusions. Archaeometry. 45, 313-331, 2003.

[36] E.C. Bunker, Gold in the ancient Chinese world. A cultural puzzle. Artibus Asiae. 53, 27-50, 1993.

[37] M.F. Guerra, « Trace elements fingerprinting using accelerators and ICP-MS : circulation of gold from the 6th century BC to the 12th century AD » dans Cultural Heritage Conservation and Environmental Impact Assessment by Non-Destructive Testing and Micro-Analysis, Ed. Balkema, Taylor and Francis group, London. p. 223-244, 2005.

[38] M.F. Guerra, T. Calligaro, J.C. Dran, C. Moulherat, J. Salomon, Development of a PIXE, PIGE and PIXE-XRF combination for the analysis of the gold from the First Empire of the Steppes. Geoarcheolog. Bioarchaeolog. Studies. 3, 343-346, 2005.

[39] M. Radtke, I. Reiche, U. Reinholz, H. Riesemeier, M.F. Guerra, Beyond the Great Wall : gold of the silk roads and the first empire of the steppes. Anal. Chem. 85, 1650-1656, 2013.

[40] A. Gondonneau, M.F. Guerra, The circulation of precious metals in the Arabic Empire : the case of the Near and the Middle East. Archaeometry. 44, 573-599, 2002.

[41] C. Roux, M.F. Guerra, La monnaie almoravide : de l'Afrique à l'Espagne. Rev. d'Archéométrie. 24, 39-52, 2000.

[42] S. Nixon, T. Rehren, M.F. Guerra, New light on the early Islamic West African gold trade : coin moulds from Tadmekka, Mali. Antiquity. 85, 1353-1368, 2012.

[49] M.F. Guerra, Sur les traces de l'or antique : analyse élémentaire de bijoux et monnaies. L'Actualité Chimique. 312-313, 61-64, 2007.

[44] A. Gondonneau, M.F. Guerra, M.R. Cowell, « Searching for the provenance of gold. The methodology of gold analysis by ICP-MS : first developments » dans Proceedings of the 32nd International Symposium on Archaeometry, Eds. P. Bautista, L. Barba, UNAM, Mexico City, CD-ROM IIA, 2001.

[45] M.F. Guerra, T. Calligaro, A. Perea, The treasure of Guarrazar. Tracing the gold supplies in the Visigothic Iberian peninsula. Archeometry. 49, 53-74, 2007.