



HAL
open science

Quantités et contrôle de l'or produit à l'âge du Fer en Gaule du Centre-Ouest

Béatrice Cauuet, Călin Gabriel Tămaș, Matthieu Boussicault, Marguerite
Munoz

► **To cite this version:**

Béatrice Cauuet, Călin Gabriel Tămaș, Matthieu Boussicault, Marguerite Munoz. Quantités et contrôle de l'or produit à l'âge du Fer en Gaule du Centre-Ouest. Mélanges de la Casa de Velázquez, 2018, 10.4000/mcv.8174 . hal-01936951

HAL Id: hal-01936951

<https://hal.science/hal-01936951>

Submitted on 27 Nov 2018

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.

Mélanges de la Casa de Velázquez

Nouvelle série

48-1 | 2018 (numéro ouvert) :

Los metales preciosos: de la extracción a la acuñación (Antigüedad - Edad Media)

Dossier. Los metales preciosos: de la extracción a la acuñación (Antigüedad - Edad Media)

Quantités et contrôle de l'or produit à l'âge du fer en Gaule du Centre-Ouest

Estimaciones cuantitativas y control del oro producido en la Edad del Hierro en la Galia centro-oriental

Quantitative estimations and control of gold production in west-central Gaul in the Iron Age

BÉATRICE CAUET, CĂLIN GABRIEL TĂMAȘ, MATTHIEU BOUSSICAULT ET MARGUERITE MUNOZ

p. 13-42

Résumés

Français Español English

En Limousin et au nord-est de la Dordogne, les gisements d'or en roche ont été exploités à ciel ouvert dans plus de 250 mines, approfondies en souterrain au cours des siècles. Cette activité minière initiée à l'âge du bronze s'est inscrite sur tout le deuxième âge du fer (début ^{ve} à fin ^{1er} s. av. J.-C.). L'ensemble de la chaîne opératoire a pu être documenté, de l'extraction à la métallurgie de l'or. Des expérimentations ont été menées pour produire de l'or selon la chaîne opératoire restituée par l'archéologie et des analyses faites sur les matériaux produits. Partant de

l'inventaire des fosses et des données fournies par les expérimentations, une modélisation volumétrique des vestiges miniers a été conduite. La teneur moyenne en or connue des gîtes exploités a permis une estimation du tonnage de métal produit à l'âge du fer. L'ensemble des données techniques tirées de l'étude des mines, celles fournies par les expérimentations et des vestiges remarquables comme une pierre de touche, des creusets et un poids, permettent d'évoquer la qualité et le contrôle de la production de cet or, ainsi que d'ouvrir des perspectives de voies d'échange du métal précieux vers les mondes méditerranéens anciens.

En el Limosín y el nordeste del departamento de la Dordoña, los yacimientos primarios de oro fueron explotados en más de 250 minas a cielo abierto, excavadas mediante labores subterráneas a lo largo de los siglos. Esta actividad minera, iniciada en la Edad del Bronce, se desarrolló durante toda la segunda Edad del Hierro (inicios del siglo v a finales del s. I a.C.). La cadena operativa se ha documentado arqueológicamente en su totalidad, desde la extracción hasta la metalurgia del oro. Se han llevado a cabo experimentaciones para obtener oro siguiendo la cadena operativa reconstruida gracias a la arqueología y a los análisis efectuados en los productos finales. A partir del inventario de los vaciados mineros y de los datos experimentales, se ha procedido a una modelización volumétrica de las labores. La ley media de oro de los yacimientos explotados permite una estimación del tonelaje de metal producido en la Edad del Hierro. El conjunto de los datos técnicos proporcionados por el estudio de las minas, los aportados por las experimentaciones y restos destacados, como una piedra de toque, crisoles y una pesa, permiten reflexionar sobre la calidad y el control de la producción del oro, al mismo tiempo que abren nuevas perspectivas sobre las vías de intercambio del metal precioso hacia el Mediterráneo antiguo.

In Limousin and the north-east of the Dordogne Department, gold deposits were originally mined in over 250 open-cast workings, which were extended underground over the centuries. This mining activity, which commenced in the Bronze Age, was carried on throughout the second Iron Age (early 5th to late 1st centuries BCE). The entire process has been documented, from extraction to metallurgy. Experiments have been run to produce gold following the processes reconstructed from archaeological remains and analyses of the materials produced. An inventory of mine workings and experimental data have been used to build a volumetric model of the remains. From the average gold content of the worked deposits it is possible to estimate the tonnage of metal produced in the Iron Age. All the technical data provided by the study of mines, the data from experiments and particular remains, such as a touchstone, crucibles or a weight, provide a basis for discussion of the quality and production control of gold, and also open up new areas of enquiry into routes of gold and silver trading with the Mediterranean.

Entrées d'index

Mots clés : contrôle de la production, Limousin, métallurgie de l'or et de l'argent, mines d'or gauloises, poids et pesée, quantification de la production

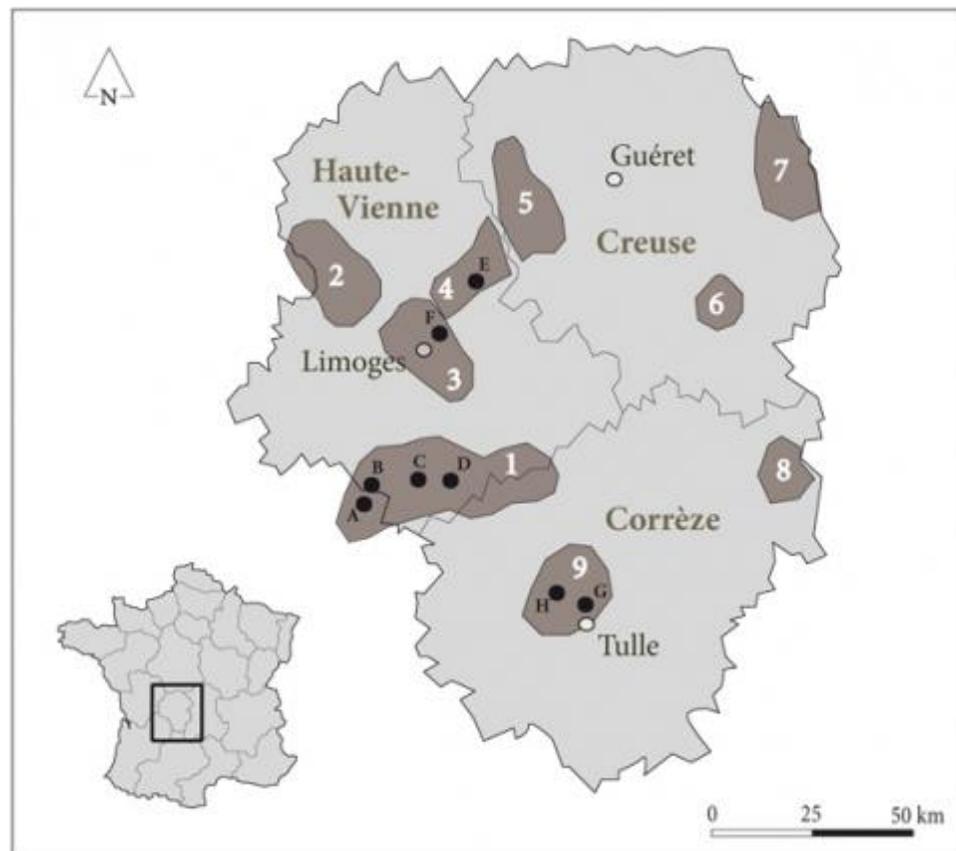
Palabras clave : control de la producción, cuantificación de la producción, Limosín, minas de oro galas, metalurgia del oro y de la plata, peso y pesaje

Texte intégral

- ¹ Le Centre-Ouest, comprenant le Limousin et le nord-est du Périgord, est vraisemblablement la région aurifère la plus riche de la Gaule. Elle est marquée par un grand nombre de vestiges miniers à ciel ouvert que l'on a regroupé en neuf districts aurifères qui se distribuent entre Haute-Vienne et Corrèze (carte 1). Seule l'archéologie a pu documenter ces vestiges, car on ne connaissait aucune mention textuelle ni aucune inscription épigraphique relative à l'activité minière de cette région, tant pour l'âge du fer que pour l'époque romaine. Le travail d'inventaire et de prospection mené de 1984 à 1997 par B. Cauuet, puis de 1998 à 2004 par M. Boussicault, a permis de recenser plus de 250 sites miniers, caractérisés par des excavations ouvertes dans des gisements d'or en roche¹. Elles sont aujourd'hui partiellement comblées, mais encore bien visibles dans le relief. Ces mines datées de l'âge du fer correspondent à des regroupements de plus de 1500 fosses allongées, parfois circulaires ou en croissant, et

d'une taille variant de 10 à plus de 100 m de longueur, de 5 à 30 m de largeur, pour une profondeur visible de 2 à 15 m. Elles sont bordées par des tertres de déblais (haldes) de 3 à 5 m de hauteur². Les fouilles menées en Limousin pendant plus de quinze années sur huit de ces sites dans le cadre de ré-exploitations modernes en carrière³, de fouilles programmées⁴ ou de grands travaux autoroutiers⁵ ont permis d'identifier les techniques minières de l'âge du fer en associant des recherches programmées, des fouilles préventives et des reconstitutions par expérimentation⁶.

CARTE. 1. — Les neuf districts miniers aurifères des Lémovices et localisation des sites évoqués



1.- Saint-Yrieix-la-Perche ; 2.- Monts de Blond ; 3.- Beaufort-les-Mines ; 4.- Monts d'Ambazac ; 5.- Bénévent-l'Abbaye ; 6.- Aubusson ; 7.- Les Combrailles ; 8.- Ussel ; 9.- Tulle.

DAO : B. Cauuet.

- 2 Dès l'âge du bronze, la présence de mineurs est attestée sur certaines mines d'or comme aux Fouilloux où a été trouvé un maillet à rainure pour l'abattage du minerai (un galet en quartz), associé à quelques tessons de grands vases de stockage décorés de cordons digités. De même, à la mine de Cros Gallet-Nord, d'autres tessons du même type ont été retrouvés, ainsi qu'un vase décoré de cercles estampés de la Culture des Duffaits, daté du Bronze moyen (XIV^e-XIII^e s. av. J.-C.)⁷, et un bord d'écuelle à marli facetté, peinte à l'hématite du Bronze final IIIb (XIII^e-IX^e s. av. J.-C.)⁸. L'activité minière reprend à la charnière Hallstatt D2/D3

et La Tène A ancien. Lors de cette deuxième phase qui va se maintenir jusqu'au début du III^e s. av. J.-C., l'extraction minière se développe en petites fosses, ne dépassant pas 10 m de profondeur, ouvertes de loin en loin sur les filons affleurants et décapés des sols humiques⁹. Le minerai extrait est traité entre les fosses d'extraction, et l'or métal est enrichi et fondu sur place (présence de creusets avec billes d'or)¹⁰. Les mineurs vivent sur le lieu d'extraction, des fonds de constructions en terre et en bois associés à un abondant mobilier céramique domestique ayant été trouvés à quelques mètres des aires de travail sur cette même mine de Cros Gallet-Nord¹¹.

- 3 À partir du milieu du III^e s. av. J.-C., on constate un accroissement de la production, en lien avec une plus forte demande en or (apparition des premiers monnayages en or) et des innovations techniques introduites dans la chaîne opératoire de traitement du minerai. Ces changements ont permis de traiter plus de minerais, parfois plus sulfurés, dans des fosses très vastes et profondes (plus de 250 m de long, et jusqu'à 40 m de largeur et 20 m de profondeur). Elles seront travaillées en continu jusqu'à la fin du I^{er} s. av. J.-C. et la fin de l'activité minière dans cette région du Limousin¹². Entre le III^e et le milieu du II^e s. av. J.-C., les mineurs sont passés à des travaux souterrains et l'extraction s'est approfondie à La Tène finale pour se prolonger en chantiers souterrains jusqu'à 30 m de profondeur aux Fouilloux et 40 m à la mine de La Fagassière-Est (Château-Chervix, Haute-Vienne). Les chantiers verticaux ou inclinés sont boisés par des assemblages complexes à tenon et à mortaise. L'exhaure est pratiquée par galerie en travers-banc et par machinerie en bois, du type vis sans fin¹³. La chaîne de traitement du minerai s'enrichit du grillage et du broyage en moulin, des techniques qui sont introduites dans les ateliers installés près des excavations dès le milieu du III^e s. av. J.-C¹⁴.

Nature minéralogique des minerais archéologiques étudiés

- 4 L'étude des minerais exploités avec l'hypothèse d'une production mixte d'or et d'argent en sous-produit, et la restitution par l'archéologie et par l'expérimentation¹⁵ des étapes de la chaîne opératoire de l'or¹⁶ fournissent des paramètres utiles pour construire une méthode de quantification, principalement appuyée sur le nombre de mines repérées sur le terrain. Jusque-là, ce travail de quantification avait été laissé aux ingénieurs et géologues miniers dont les estimations orientées vers une vision globale potentielle des gisements ne tenaient pas compte des réalités archéologiques¹⁷.
- 5 Dans un premier temps, notre stratégie analytique consiste en une étude minéralogique détaillée des différents minerais issus des mines étudiées afin de déterminer sous quelle forme se trouve l'or et à quels métaux ou minéraux il est associé. L'observation au microscope polarisant en réflexion sert à une identification préliminaire des diverses phases minérales. Le microscope électronique à balayage (MEB) permet une observation plus détaillée des différents composés métalliques, ainsi qu'une mise en évidence de la présence de certains minéraux indécélables au microscope optique. Enfin, la microsonde électronique permet d'effectuer des analyses chimiques ponctuelles des différentes phases, de calculer leur formule structurale et ainsi de les identifier précisément.
- 6 Les publications géologiques mentionnent toujours le caractère aurifère des gisements du Limousin, mais négligent la part de l'argent¹⁸. Cependant, les analyses de teneurs faites sur les échantillons géo- et chrono-référencés de la mine des Fouilloux montrent clairement la présence de l'argent associé à l'or (tab. 1). De même, nos études minéralogiques menées sur les minerais des mines de Laurières et de Cros Gallet ont permis la mise en évidence de la composition minéralogique des minerais exploités par les Gaulois et la composition chimique des minéraux porteurs de l'or et de l'argent¹⁹.

TABLEAU 1. — Teneurs du minerai (en g/t) de la mine gauloise des Fouilloux (analyses faites par le laboratoire Als de Séville, Espagne)

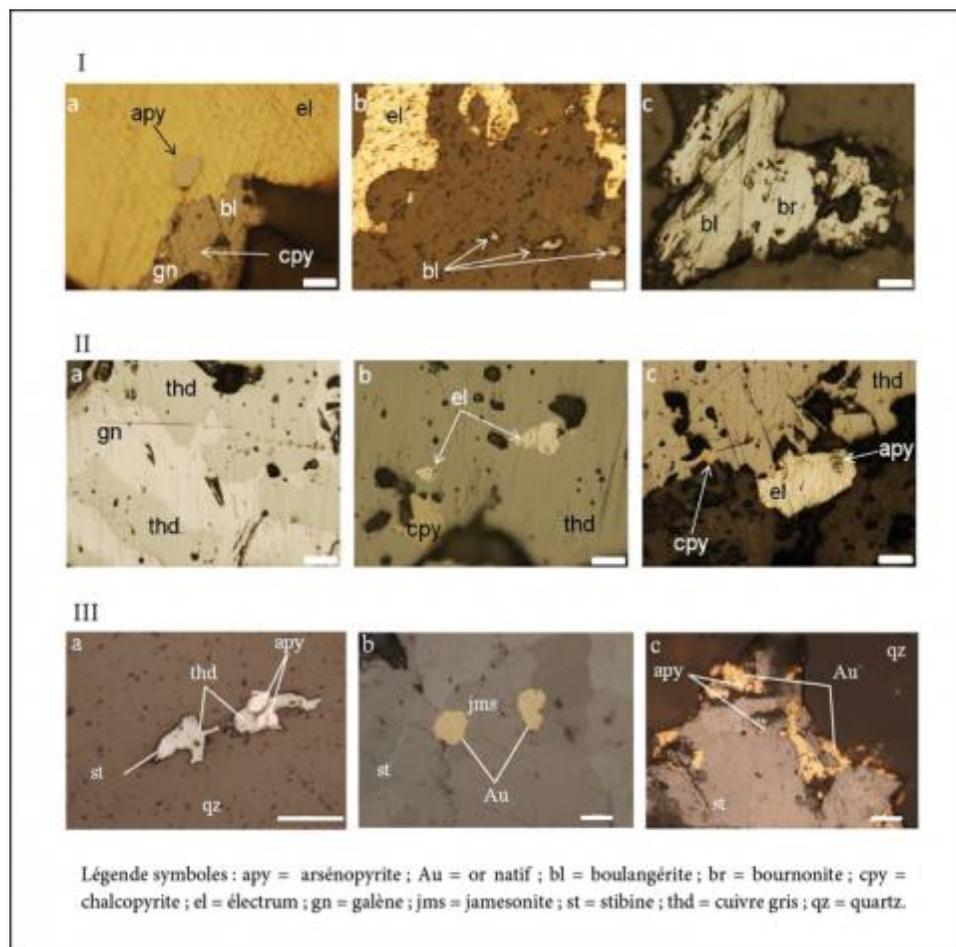
Ech.	Ag	Cu	Pb	Zn	Au	Sb	As	Bi
4300	6	18	233	7	30,6	>250	>250	0,51
4301	11,5	21	156	6	56,4	>250	>250	0,33
4302	9,3	34	148	6	80,6	>250	>250	0,19
4303	28,3	66	2890	44	39,9	>250	>250	5,21
4306	9,4	53	401	18	94,0	>250	79	10,2

Le minerai de la mine de Laurières

- 7 Le minerai de Laurières est représenté par du quartz gris imprégné de sulfures. Les métaux précieux sont exprimés minéralogiquement par l'électrum, soit l'alliage naturel Au-Ag. Les grains d'électrum sont souvent visibles à l'œil nu. L'examen minéralogique d'un grand nombre d'échantillons nous a permis d'obtenir une image complexe sur le minerai exploité à Laurières, dont nous faisons ici une synthèse. Il existe deux grandes associations minéralogiques porteuses des métaux précieux : a) électrum dans un quartz gris blanc et b) électrum associé aux nids/poches de sulfures et de sulfosels.
- 8 Concernant la première association minéralogique des métaux précieux, l'électrum est encaissé dans le quartz gris-blanc car sa déposition a été contrôlée par le système de fissures et par les cavités présentes dans le quartz. Les grains d'électrum contiennent fréquemment des inclusions d'arsénopyrite idiomorphe (fig. 1-Ia)²⁰. Sur les bords de ces grains, il y a souvent des bordures de galène, parfois contenant de la chalcopryrite, ainsi que de la boulangérite (fig. 1-Ia). Les sulfosels, de type boulangérite, jamesonite ou bournonite apparaissent aussi libres dans le quartz car ils sont systématiquement associés à l'électrum (fig. 1-Ib). Ces sulfosels se présentent généralement sous forme de grains monominéraux irréguliers, parfois idiomorphes. Mais il y a aussi des grains de composition mixte, de type boulangérite-bournonite (fig. 1-Ic). Une série de 90 analyses à la microsonde électronique sur différents grains d'électrum ont montré une composition assez homogène (maximum 5 % d'écart) de l'alliage Au-Ag naturel, à savoir une composition chimique moyenne Au/Ag = 85,5/89 (en % de poids).
- 9 L'association minéralogique électrum - sulfures et sulfosels est bien exprimée et signale une relation génétique étroite entre les métaux précieux et les sulfosels. Les nids de sulfures visibles à l'œil nu correspondent, comme l'examen microscopique l'a montré, à des zones composées majoritairement de cuivre gris avec une faible participation des sulfures communs, par exemple : galène, sphalérite, chalcopryrite (fig. 1-IIa)²¹ et, rarement, pyrite. L'électrum est toujours contenu dans le cuivre gris (fig. 1-IIb) et dans les sulfures communs, mais il a aussi des inclusions d'arsénopyrite (fig. 1-IIc). La pyrite, hors des inclusions d'électrum, montre très souvent des inclusions monominérales de cuivre gris argentifère et de galène, ainsi que des inclusions polyminérales de galène-freibergite et de galène-cuivre gris argentifère.
- 10 Les particularités minéralogiques de cette association minérale ont pu être détaillées suite aux analyses chimiques quantitatives faites à la microsonde électronique. L'analyse systématique de grains d'électrum a confirmé qu'il présente une composition plus équilibrée entre l'or et l'argent, située entre les limites Au/Ag = 49/52 à 58/42 %, donc une variation d'environ 10 % de poids. Le cuivre gris possède un caractère très argentifère. Les analyses à la microsonde électronique indiquent un pourcentage très élevé en argent pour ce minéral, situé entre 17 et 19,7 % de poids d'Ag. Quelques analyses ont mis en évidence

de la freibergite, correspondant au pôle argentifère du cuivre gris, pour laquelle la teneur en Ag dépasse 20 % de poids. La freibergite est présente surtout sous forme d'inclusions dans la pyrite.

FIG. 1. — Images au microscope en réflexion utilisant un filtre polariseur du minerai aurifère et argentifère de Laurières (I et II) et des Fouilloux (III)



© C. Tămaş.

Le minerai de la mine des Fouilloux

- 11 Le corps de minerai exploité aux Fouilloux consiste en un filon de quartz riche en sulfures. L'étude minéralogique a montré que la stibine est le minéral le plus fréquent à l'échelle du gisement ; elle est associée à la pyrite, l'arsénopyrite, le cuivre gris et l'électrum (fig. 1-IIIa)²². La stibine est souvent liée à la pyrite et à l'arsénopyrite, mais elle apparaît également sous forme de

grandes plages encaissées dans le quartz. Rarement associées à la stibine, on trouve de la chalcopryrite, de la galène, de la sphalérite et du cuivre gris. Les analyses à la microsonde ont confirmé la présence de la berthiérinite et de la jamesonite dans la stibine (fig. 1-IIIb). L'or a été observé dans la stibine et dans le quartz (fig. 1-IIIc). Les analyses à la microsonde électronique ont confirmé sa composition chimique pauvre en argent, entre 13 et 20 % du poids.

- 12 Les études sur les minerais de Laurières et des Fouilloux ont mis en évidence leur nature minéralogique et leurs particularités. L'or se présente sous forme d'électrum et d'or natif, contenant moins de 20 % de poids d'Ag. Pour le site de Laurières, il existe une très forte variation de la composition chimique de l'électrum. Si à l'échelle d'un grain la variation ne dépasse pas 10 % du poids, à l'échelle du gisement, il existe une forte variation du rapport Au/Ag, entre environ 80/20 et 50/50. En revanche, pour le site des Fouilloux, la composition de l'électrum est plus homogène, les teneurs en Ag varient entre 13 et 20 % de poids seulement. En plus de l'argent contenu dans les grains d'électrum, une quantité plus importante d'argent se trouve dans les sulfosels associés, notamment dans le cuivre gris et dans la freibergite. S'appuyant sur des analyses chimiques quantitatives très précises, l'étude minéralogique indique clairement le caractère polymétallique Au-Ag des minerais exploités par les Gaulois à Laurières et aux Fouilloux, comme d'ailleurs pour d'autres sites miniers anciens étudiés (Cros Gallet, Les Lanvers à Ambazac, etc.).

Chaîne opératoire de l'or restituée par l'archéologie et l'expérimentation

- 13 Dans les ateliers de traitement du minerai gaulois ont été retrouvés les sluices, bassins, foyers et l'outillage en pierre (broyons, mortiers, meules) nécessaires aux différentes étapes du travail. Le traitement commence par le concassage, puis le grillage et le broyage, ensuite vient l'enrichissement par lavage, avant de passer à la fusion et à la coulée d'un lingot. Mais certaines précisions techniques et le détail des manipulations ont été retrouvés par la pratique de l'archéologie expérimentale²³.

L'atelier expérimental restitué

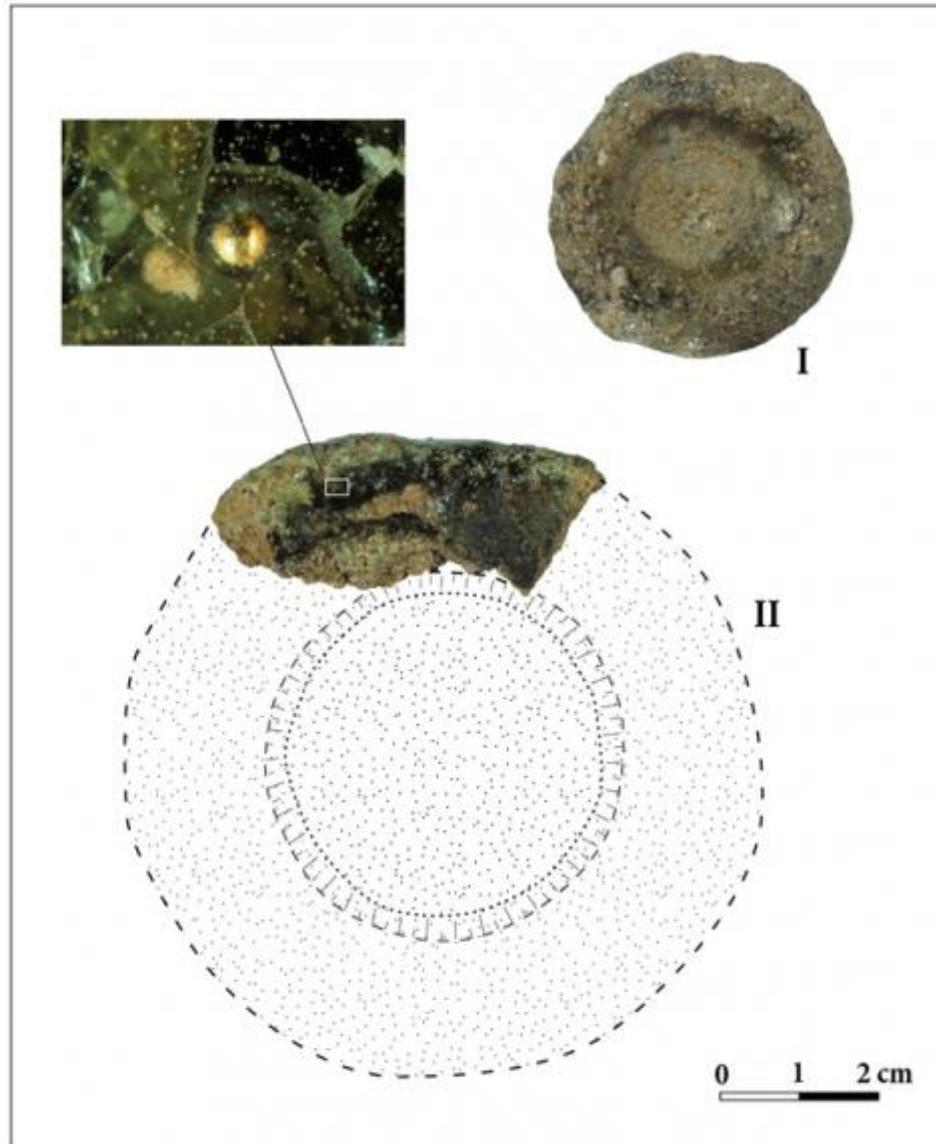
- 14 À partir des données archéologiques, plusieurs opérations ont été organisées entre 1998 et 2003, dans un atelier reconstruit pour permettre des expérimentations, pour reproduire l'ensemble de la chaîne de traitement de l'or, telle qu'elle se pratiquait à partir du III^e s. av. J.-C. : concassage, grillage, broyage avec reconstitution d'un moulin en granite, concentration par courant d'eau dans un sluice et à la batée, jusqu'à la coulée de petits lingots d'or par fusion scorifiante et affinage²⁴.
- 15 Pour pouvoir restituer un tel atelier, nous avons bénéficié du soutien de la SMB²⁵ qui, en tant que partenaire de l'opération, nous a gracieusement fourni près d'une tonne de minerai riche (tiré du fond de la mine de Laurières), à une teneur moyenne annoncée d'environ 40 g d'or/tonne. Compte tenu des masses de minerai à traiter à la main (concassage, grillage, broyage) et du peu de temps dont nous disposions, nous avons fait broyer industriellement les trois quarts du minerai à traiter, le reste ayant été fait selon le mode opératoire attesté par l'archéologie. Cependant, c'est le minerai bien grillé puis broyé dans le moulin qui a donné les meilleurs résultats, en termes de séparation, lors du passage au fourneau.

- 16 Le quartz concassé a été ensuite grillé en meule, par petits tas d'un mètre de diamètre environ où alternaient morceaux de bois sec et fragments de minerai. Ce travail a montré qu'il était aisé de traiter des minerais très sulfurés que l'on croyait, à tort, négligés par les Anciens²⁶. Le minerai grillé a été ensuite à nouveau concassé à une maille plus fine, entre 0,5 et 1 cm de diamètre, puis passé dans un moulin en granite pour atteindre la granulométrie d'une farine²⁷. L'utilisation du moulin a révélé qu'il était nécessaire de lubrifier régulièrement les meules d'un apport d'eau par le trou central du moulin pour faciliter le broyage et la rotation de la meule supérieure.
- 17 Pour la concentration par lavage, nous avons utilisé un sluice en bois, monté sur pieds pour permettre de travailler confortablement debout, dont le fond a été équipé de tasseaux amovibles (calés en force en travers du canal) qui maintenaient un habillage en moquette synthétique. Une fois l'opération de lavage et d'enrichissement du concentré aurifère assez aboutie après plusieurs lavages des mêmes poudres dans le dispositif, la moquette mise au fond du canal a été lavée dans un bac pour en retirer les paillettes d'or piégées.

Métallurgie de l'or

- 18 Comme les deux creusets découverts à Cros Gallet-Nord avaient subi une forte chauffe sur le dessus (fig. 2-I et 2-II), nous avons opté pour une ventilation venant d'une seule tuyère coudée, installée dans un bas foyer du type de celui trouvé aux Fouilloux. La tuyère avait pu fonctionner comme un chalumeau placé au-dessus du creuset, lui-même inséré dans un foyer de charbons de bois en combustion. Le système de soufflerie retenu s'est inspiré des structures de fusion des bronziers avec deux soufflets-outres.

FIG. 2. — Creusets trouvés à Cros Gallet-Nord



I. – petit creuset d'essai ; II. – fragment d'un creuset pour fusion scorifiante ; détail de la paroi vitrifiée du grand creuset incomplet contenant des petites billes d'or.

© B. Cauuet.

- 19 Le concentré aurifère placé dans un creuset similaire au creuset incomplet (fig. 2-II) trouvé à Cros Gallet-Nord a été chauffé dans le foyer pour obtenir une première masse métallique. Cela a donné une séparation entre le métal et une masse noirâtre, plus légère, la scorie, qui correspond à un verre formé par les sables quartzeux fondus et une part des oxydes et des sulfures

résiduels encore présents dans le minerai. Les essais ont été conduits sans ajout de produit dans le creuset autre que le minerai enrichi. Une première séparation est ainsi obtenue par fusion scorifiante.

20 En alternant l'oxydation du bain par une poussée de la ventilation dans la tuyère coudée, puis le perchage en agitant le bain avec une baguette de bois vert pour réduire les oxydes formés, on a pu favoriser par oxydation/réduction une concentration du métal avec une séparation efficace de la scorie de l'or métal. Une fois le point de fusion de l'or atteint (1 064 °C), le creuset a été retiré du foyer et la matière en fusion versée dans une petite lingotière (ici un morceau de bois creusé au feu). Lorsque l'opération a été correctement menée, l'or déjà bien épuré occupe la partie inférieure du lingot, car il a été séparé des principales impuretés, amalgamées dans une scorie noire, plus légère, qui s'est déposée à la partie supérieure. Il est alors facile de séparer d'un coup de marteau les deux parties de la masse métallique.

21 Lors des premières expérimentations conduites en 1998, près de 600 kg de quartz aurifère d'un minerai estimé à 40 g/t²⁸ ont été traités par la chaîne opératoire complète. Ces opérations ont permis de produire environ 20 g d'or en six opérations métallurgiques. Pour un minerai estimé à 40 g/t d'or, 600 kg de minerai traité auraient pu potentiellement donner 24 g d'or. Notre mode opératoire ayant produit seulement 20 g d'or, nous estimons notre perte en or à environ 17 % pour un rendement de 83 %. Notre démarche a été ici plus ethno-archéologique qu'analytique et nous ne nous sommes pas attachés à mesurer très précisément les températures atteintes dans le fourneau, ni le temps des opérations, car il s'agissait dans cette première approche de maîtriser en pratique l'enchaînement des étapes de la chaîne opératoire, déduite des données de l'archéologie. Nous allons donner ici nos premières observations tirées d'analyses au MEB et à la microsonde²⁹.

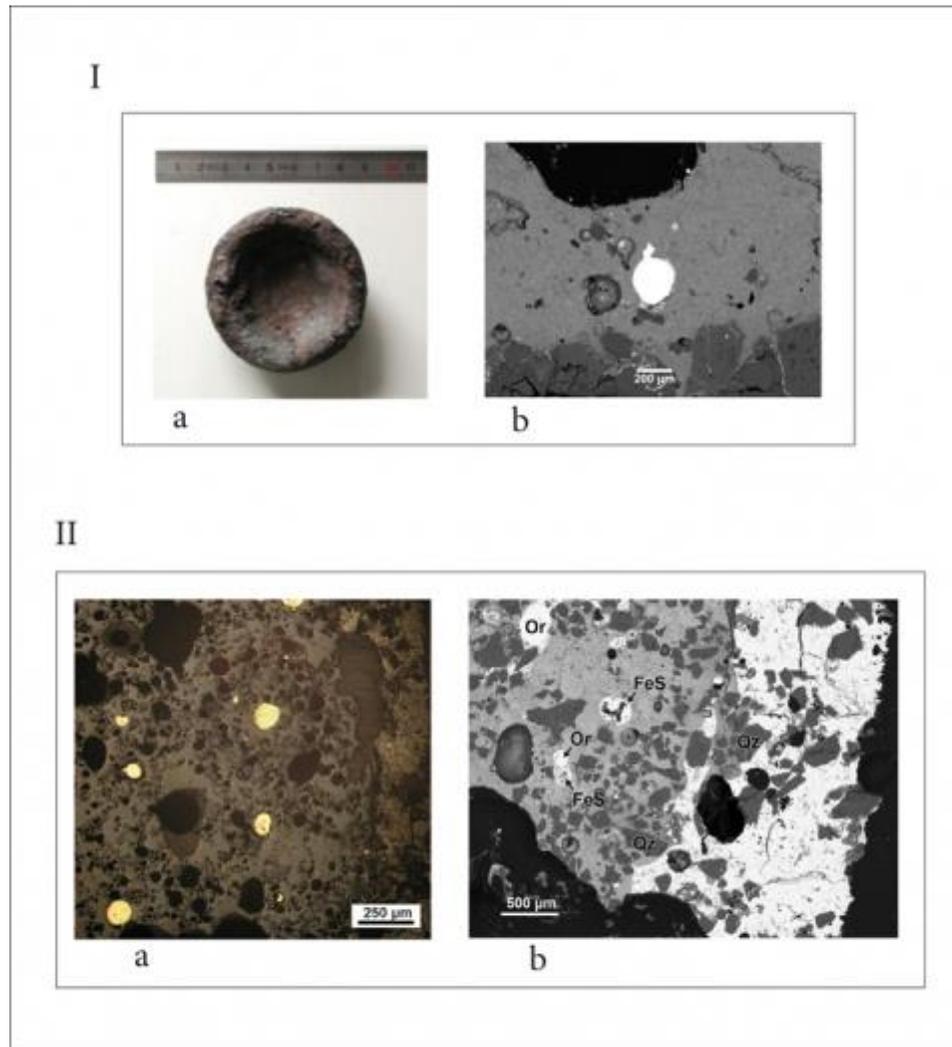
Analyses des matériaux issus des expérimentations

22 Le minerai utilisé lors des expérimentations provenait de la mine de Laurièras. Comme nous venons de le voir, l'or y est exprimé sous forme d'électrum avec une teneur en argent du gisement variant dans un rapport Au/Ag de 80/20 à 50/50. Les produits d'expérimentation ont fait l'objet d'une étude et certains ont été observés et analysés au MEB-EDS³⁰. Les scories étudiées provenaient toutes d'une fusion réalisée à partir d'un minerai non grillé, ce qui a révélé la présence d'une importante quantité d'or dans la scorie. Mais cet or que l'on a pu observer est libéré des sulfures, ce qui montre que la fusion a eu tout de même un effet sur le minerai.

Traitement métallurgique du concentré

23 Lors des expérimentations, le concentré obtenu a été mis à fondre en creuset dans le foyer ouvert. Après 20 à 30 minutes et une montée en température d'environ 1 064 °C, le produit de fusion a été coulé en une fois dans une lingotière. Le creuset présentait après la fusion une couche vitrifiée millimétrique dans laquelle ont été identifiées des billes d'or (en blanc dans l'image MEB) [fig. 3-I]. Lorsque le minerai est bien préparé (grillé et broyé), on doit obtenir d'un côté une scorie noirâtre et de l'autre une masse d'or (fig. 4-I). Une des scories produites a été passée au microscope et au MEB. On observe dans la scorie la présence de billes d'or de taille importante, ainsi que du quartz non fondu (fig. 3-II).

FIG. 3. — Creuset expérimental

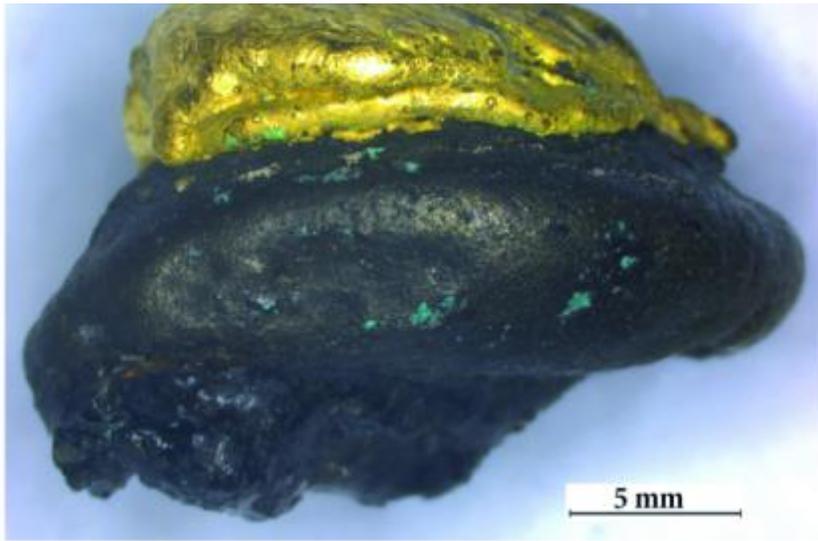


I. — a.- vue générale ; b.- couche vitrifiée millimétrique du creuset après fusion (billes d'or en blanc dans l'image MEB).

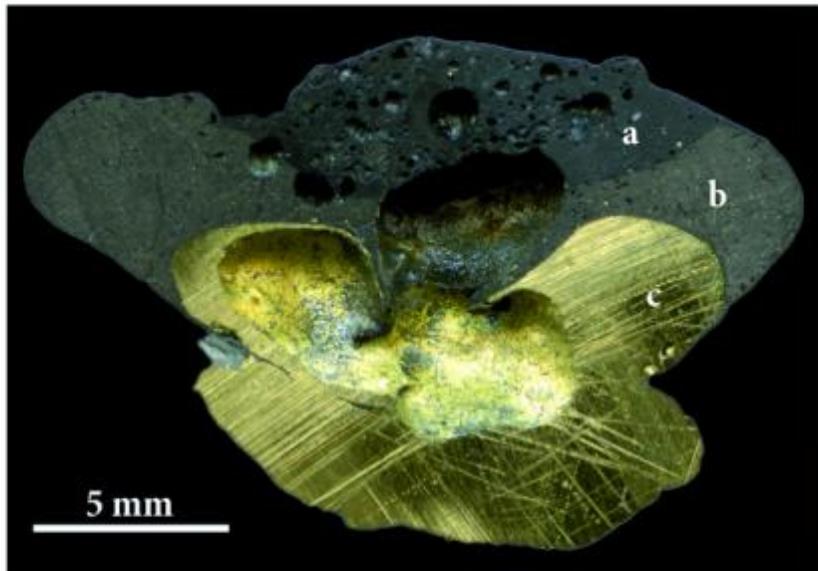
© M. Munoz.

FIG. 4. — Exemple d'or coulé accolé aux scories ferreuses et siliceuses





II



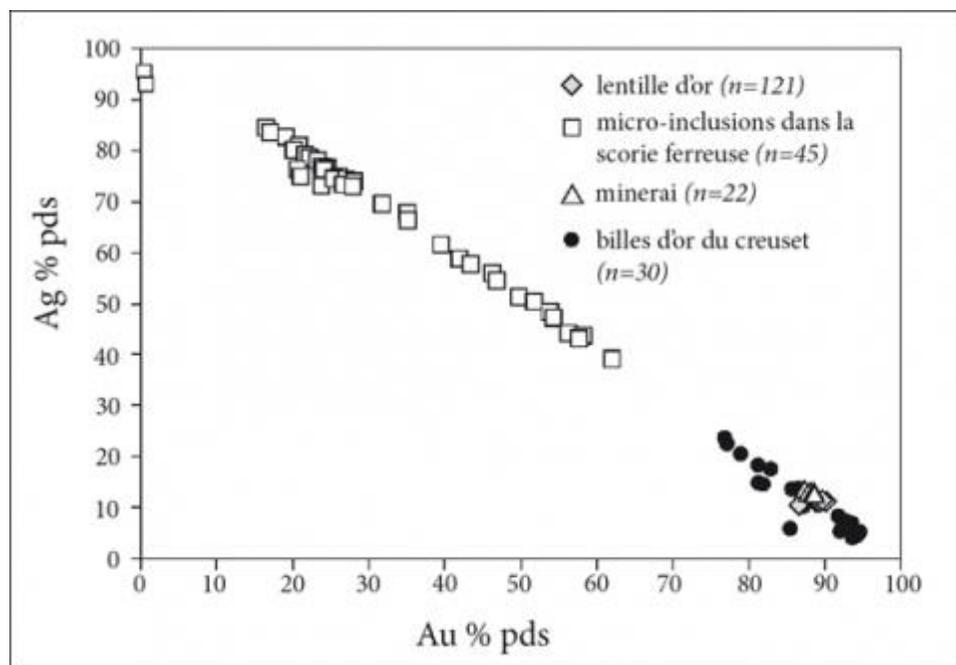
- a. - scorie noire bulleuse siliceuse
- b. - scorie grise ferreuse
- c. - lentille d'or métal

I.- vue générale ; II.- produit de fusion vu en section.

Composition des matériaux (creuset, scories et métal) produits par expérimentation

- 24 Le produit de fusion s'est stratifié par différence de densité avec deux niveaux supérieurs de scories et un niveau inférieur composé d'or (fig. 4-II). La lentille d'or produite présente une composition très homogène, entre 86,6 et 90,4 % d'or. Sa teneur en argent, entre 10,7 et 11,4 %, est plus faible que celle du minerai, entre 12,7 et 13,5 %.
- 25 La composition des inclusions métalliques présentes dans la scorie ferreuse est beaucoup plus riche en argent, entre 39,1 et 95,3 %, par rapport à l'or coulé. La teneur en or des billes incluses dans la couche vitrifiée du creuset varie entre 76,8 et 94,6 % (fig. 5). Cette hétérogénéité est probablement liée aux différents essais réalisés dans ce même creuset.

FIG. 5. — Composition de l'or métal produit, des inclusions métalliques résiduelles dans les scories, dans le creuset et or du minerai



Observations

- 26 Les résultats obtenus valident la chaîne opératoire expérimentée en ce qui concerne la séparation de l'or de la gangue. La composition de l'or résiduel dans la couche vitrifiée du creuset reflète mieux celle de l'or produit que les inclusions présentes dans la scorie. La présence de plages pluri-millimétriques riches en argent dans la scorie indiquerait également que ce mode opératoire contribue à concentrer l'argent présent dans les sulfures du minerai (hors électrum).
- 27 Il sera possible de poursuivre nos investigations par le broyage de la scorie noirâtre (riche en Ag) et de repasser cette poudre au creuset en y ajoutant du plomb pour attirer l'argent. C'est peut-être ce qui a été testé dans le petit creuset d'essai riche en plomb et en argent, trouvé entier à Cros Gallet-Nord (fig. 2-I)³¹. Les deux creusets trouvés à Cros Gallet-Nord, de nature différente, témoignent de deux types au moins d'opérations métallurgiques liées à l'or sur le site : de la fusion de métal non épuré (creuset fragmentaire) et un possible affinage/épuration par cémentation avec ajout de plomb (petit creuset entier). La cémentation a peut-être été pratiquée sur ce site et aurait permis de produire aussi de l'argent en sous-produit d'un minerai aurifère de type Limousin.

Quantification de la production d'or en Limousin à l'âge du fer

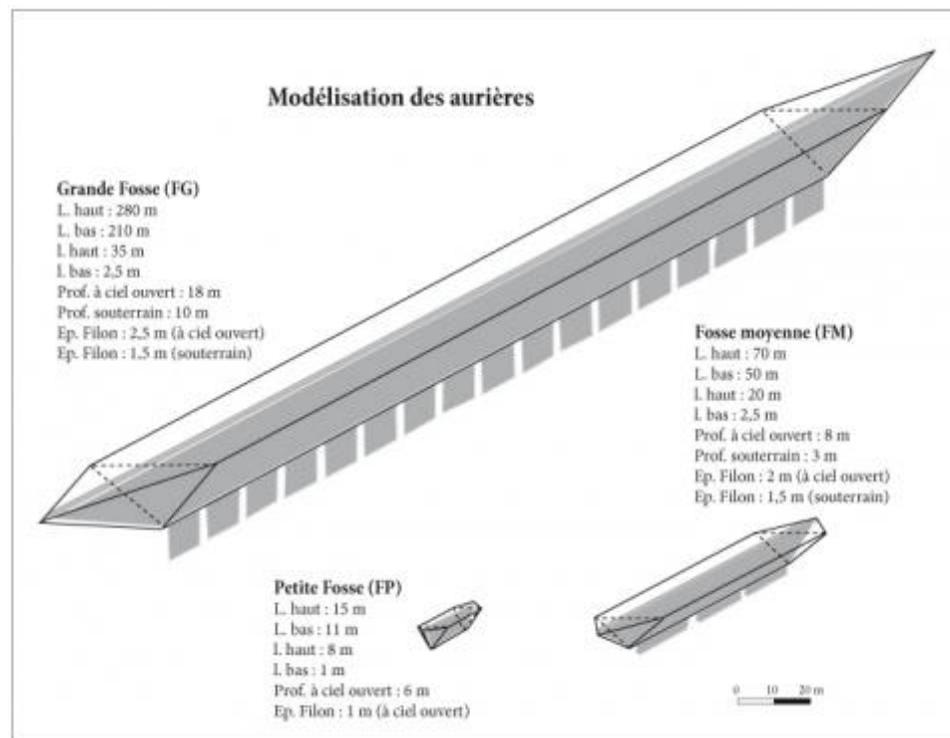
- 28 En partant des données de terrain (études des archives, dont minières, prospection toponymique, aérienne et pédestre) accumulées, nous avons commencé par constituer une base de données des sites connus dans huit des neuf districts miniers du Limousin (carte 1). Le district des Combrailles déborde largement côté Auvergne sur le département du Puy-de-Dôme, mais comme il reste encore mal connu côté Limousin, nous ne l'avons pas intégré dans notre base de données.

Modélisation des mines d'or anciennes du Limousin

- 29 L'exploitation minière a été menée à ciel ouvert sur des gisements filoniens ou des stockwerks affleurants. Les mines souvent disposées en chapelet les unes à la suite des autres le long des corps de minerai, ont des dimensions très variables selon la taille du gisement, mais aussi selon la période à laquelle elles appartiennent. La modélisation des chantiers miniers consiste dans la transformation des fosses et des chantiers souterrains qui les prolongent en des formes géométriques idéales, à savoir des parallélépipèdes et des prismes triangulaires (fig. 6). Cela a donné trois types de formes : une grande fosse (ou FG), une fosse moyenne (ou FM) et une petite fosse (ou FP)³².
- 30 Nous avons appliqué cette standardisation des exploitations à toutes les fosses inventoriées dans la base de données de manière à pouvoir les répartir entre les trois grands types de fosses et les chantiers souterrains principaux, en excluant les galeries, les petits chantiers de recherche et les ouvrages d'assistance comme les galeries d'exhaure, car ces petits ouvrages souterrains étaient généralement peu nombreux sur les grands sites et représentaient des petits volumes. Nous avons ensuite appliqué à ces données la méthode de calcul des réserves géologiques en sections, compte tenu de la morphologie filonienne des gisements du Limousin. Cela permet d'établir des volumes géométriques réguliers de corps de minerai que l'on convertit en tonnage grâce à la masse volumique moyenne connue, d'une part, de la roche encaissante stérile (gneiss, micaschistes ou granites) et, d'autre part, du minerai exploité (quartz aurifère). On peut alors quantifier le tonnage des terrains encaissants

stériles et des filons minéralisés exploités par les anciens mineurs dans la partie travaillée à ciel ouvert d'une mine donnée, ainsi que le tonnage de la seule caisse filonienne extraite dans les travaux souterrains.

FIG. 6. — Modélisation des fosses et des panneaux de minerai aurifère (exploités en grandes, moyennes et petites fosses)



DAO : B. Cauuet.

Méthode de calcul

- 31 Dans les calculs de la rentabilité économique d'une activité minière moderne, il faut établir les réserves estimées du gisement, leurs coûts de production corrélés au prix actualisé du métal et démontrer que ce coût de production sera inférieur au prix de vente du métal. Pour ces raisons, les activités minières actuelles démarrent toujours par un calcul de réserves, c'est-à-dire l'estimation du volume de minerai, la teneur moyenne, la teneur limite d'exploitation, les taux de dilution³³, le rendement de la récupération du minerai, du traitement, la quantité de(s) métal(taux), etc. Dans l'industrie minière, on a recours à différentes méthodes d'estimation du volume/quantité du minerai d'un gisement (méthode des sections, des blocs, des triangles, etc.). Mais chaque méthode doit établir le volume du corps de minerai, la teneur moyenne et la masse volumique moyenne. Une fois ces paramètres acquis, il est possible d'estimer la quantité de métal d'un gisement. Par extension, la suite du calcul économique prend en compte le rendement de l'exploitation et du traitement pour proposer ensuite une estimation de la quantité de métal pur qui pourra être obtenue jusqu'à la fin de l'exploitation, c'est-à-dire l'épuisement du gisement.

- 32 La quantification de la production de l'or en Limousin à l'âge du fer part des réalités géologiques et minières, et en simplifiant l'approche mathématique (teneur moyenne pondérée, zone d'influence, etc.), propose de prendre en compte plusieurs valeurs moyennes. Dans le développement de la quantification nous avons intégré les mêmes éléments que ceux des géologues dans les projets miniers actuels, c'est-à-dire : l'évaluation du volume de minerai/stérile, la teneur moyenne, la masse volumique moyenne du minerai et celle du stérile et le rendement de la chaîne opératoire.
- 33 En ce qui concerne le volume du minerai extrait, ce paramètre a été calculé en fonction de la réalité des vestiges miniers, à savoir des fosses de plus ou moins grande taille, les plus grandes étant prolongées par des chantiers souterrains. L'évaluation du volume de chaque type d'ouvrage minier est faite par une modélisation géométrique de la forme de ces chantiers (fosse à ciel ouvert et travaux souterrains). Un grand nombre d'analyses de teneurs et de leurs teneurs moyennes sont connues pour les gisements d'or du Limousin³⁴. De même, l'expérience des géologues miniers de la Société des Mines du Bourneix (aujourd'hui fermée), nous a guidés pour le choix des valeurs moyennes à retenir pour les paramètres nécessaires aux calculs de la valeur moyenne de la teneur du minerai et de la masse volumique moyenne du minerai et du stérile.

Calcul de la réserve de minerai et de la quantité de roche encaissante stérile exploitée

- 34 Le calcul de la réserve de minerai extrait par type de chantier nécessite d'abord le calcul du volume du minerai extrait et ensuite, en utilisant la masse volumique du minerai, s'obtient le tonnage, soit la réserve totale de minerai. Ces calculs ont été faits par type de chantier (FG, FM et FP) et les résultats sont réunis dans le tableau 2. Le volume du minerai d'une grande fosse et d'une fosse moyenne consiste en une partie à ciel ouvert et une partie souterraine. Dans le modèle de petite fosse, il n'y a que les volumes d'une partie à ciel ouvert. La valeur moyenne de la masse volumique du minerai aurifère du Limousin, le quartz aurifère imprégné de sulfures est d'environ $\gamma_{\text{min}} = 2,8 \text{ t/m}^3$. Selon nos calculs, on trouvera dans le tableau ci-dessous (Tab. 2) les résultats estimés des différents volumes permettant la quantification.
- 35 Dans la partie à ciel ouvert des fosses modélisées, nous considérons que le corps de minerai a été exploité sur toute son épaisseur, car on ne rencontre que rarement du minerai exploitable sur les fronts de taille. La modélisation des fosses nous permet de calculer le volume du stérile par la somme des volumes de chaque corps géométrique contigu, entre le corps de minerai, les fronts de tailles et les parois des fosses. Cette approche est à appliquer pour les trois types de chantiers miniers : fosse grande, fosse moyenne et fosse petite.
- 36 La valeur moyenne de la masse volumique de la roche encaissante du minerai aurifère du Limousin, c'est-à-dire le stérile, est d'environ $\gamma_{\text{stérile}} = 2,7 \text{ t/m}^3$ (gneiss). La quantité de stérile enlevée au cours de l'exploitation dans chacun des cas (FG, FM et FP) est présentée dans le tableau 2.

TABLEAU 2. — Volume et quantité de minerai (réserve) et de stérile pour chaque type de modèle de chantier minier (FG, FM et FP)

PARAMÈTRES	FG	FM	FP
Volume minerai	13 575 m ³	1 380 m ³	78 m ³
Volume stérile	63 000 m ³	3 400 m ³	222 m ³
Quantité minerai (réserve)	38 010 t	3 864 t	218,40 t
Quantité stérile	170 100 t	9 180 t	599,40 t

Calcul de la quantité potentielle de métal dans la masse de minerai et celle obtenue lors de l'exploitation

37 Une fois obtenue la valeur de la quantité du minerai extrait (Q_{minerai}) pour chaque type de chantier minier et la valeur moyenne de la teneur (T) du minerai aurifère, la valeur potentielle de métal contenu dans le minerai extrait des chantiers ($Q_{\text{métal pot}}$) est donnée par la relation suivante : $Q_{\text{métal pot}} \text{ (kg)} = Q_{\text{minerai}} \text{ (t)} \times T \text{ (g/t)} \times 10^{-3}$.

38 Entre la quantité de métal potentiel d'un minerai/gisement et la quantité de métal obtenu à la fin de la chaîne opératoire il y a toujours des différences. Les pertes durant l'exploitation, le transport et le traitement du minerai jusqu'à la coulée du lingot d'or sont responsables d'une diminution de la quantité de métal obtenue. En général, cette différence est en faveur de la quantité potentielle. En Limousin, compte tenu de la richesse du minerai primaire, du phénomène d'enrichissement supergène, du mode d'abattage et d'un tri manuel pratiqué par les anciens mineurs, le taux de dilution devait être faible.

39 Par ailleurs, la reconstitution de la chaîne opératoire de l'or par expérimentation a montré que sans l'expérience et le savoir-faire acquis par les métallurgistes gaulois au cours des siècles, nous obtenions un rendement de 83 %. Nous estimons donc qu'un rendement de 90 % pour les mineurs/métallurgistes gaulois reste dans une marge acceptable et pour cette raison nous envisageons une perte de métal lors de la chaîne opératoire de seulement 10 %.

40 L'expérience géologique et minière du ^{xxe} siècle y compris les résultats des fouilles archéologiques minières montre que pour les gisements aurifères du Limousin il existe une fourchette de teneurs qui varient entre 20 et 80 g/t d'or. Dans ce cas, nous proposons pour la suite de la quantification de la production de l'or, trois valeurs de teneurs : minimum - $T_{\text{min}} = 20 \text{ g/t}$, moyenne - $T_{\text{moy}} = 50 \text{ g/t}$ et maximum - $T_{\text{max}} = 80 \text{ g/t}$.

41 Les données disponibles nous permettent de continuer la suite de la quantification pour les trois types de chantiers miniers modélisés (FG, FM et FP). Les valeurs de métal obtenu, avec un rendement de $\eta = 90 \%$, valeur argumentée plus haut, sont détaillées plus bas. En tenant compte de la fourchette des valeurs des teneurs (T_{min} , T_{moy} et T_{max}) et du rendement de traitement de 90 %, dans le tableau 3 sont synthétisées les valeurs minimum, moyenne et maximum des quantités de métal obtenu pour chaque type de chantiers FG, FM et FP.

TABLEAU 3. — Les tonnages de métal obtenu dans les trois types de chantiers miniers (FG, FM et FP) en fonction de la teneur en métal (T_{min} , T_{moy} et T_{max})

	FG			FM			FP		
	T_{min} (20 g/t)	T_{moy} (50 g/t)	T_{max} (80 g/t)	T_{min} (20 g/t)	T_{moy} (50 g/t)	T_{max} (80 g/t)	T_{min} (20 g/t)	T_{moy} (50 g/t)	T_{max} (80 g/t)
Teneur en métal (kg)	684,18	1 710,45	2 736,72	69,55	173,88	278,21	3,93	9,83	15,72

42 Par extension, ces résultats peuvent être extrapolés à l'échelle du territoire dans lequel les prospections de surface ont mis en évidence des sites miniers. L'intégralité des sites identifiés a été décomposée selon leurs dimensions dans les trois grands types de chantiers miniers : FG, FM et FP. La réalisation d'une base de données³⁵ pour la région du Limousin nous a permis de modéliser et de redistribuer, dans les trois types de modèles de fosses, les 287 sites miniers connus³⁶, correspondant à

71 grandes fosses (FG), 329 fosses moyennes (FM) et 745 petites fosses (FP) dont le détail par districts est présenté dans le tableau 4.

TABLEAU 4. — Décompte des fosses de type FG, FM et FP normalisées sur 8 des 9 districts miniers aurifères du Limousin

DISTRICTS MINIER DU LIMOUSIN	Total FG	Total FM	Total FP
Saint-Yrieix-la-Perche (Haute-Vienne, Corrèze, Dordogne)	33	221	613
Monts de Blond (Haute-Vienne)	1	4	36
Beaune-les-Mines (Haute-Vienne)	16	25	15
Monts d'Ambazac (Haute-Vienne)	8	37	32
Bénévent-L'Abbaye (Creuse)	6	21	4
Aubusson (Creuse)	2	-	-
Ussel (Corrèze, Puy-de-Dôme)	2	10	24
Tulle (Corrèze)	3	11	21
TOTAL FOSSES	71	329	745

43 Concernant le volume et la quantité de roche stérile abattue, les valeurs sont présentées dans le tableau 5. Cette quantité de roches stériles a dû être enlevée lors de l'exploitation pour accéder au minerai aurifère. Pour avoir une image de l'envergure de l'exploitation minière, nous proposons ensuite les valeurs du volume et de la quantité du minerai extrait à ciel ouvert et en souterrain à la recherche de l'or (tab. 5).

TABLEAU 5. — Quantification du volume et de la quantité de minerai exploité pour l'or en Limousin à l'âge du fer, par type de chantier minier (FG, FM et FP)

PARAMÈTRES	FG	FM	FP	PRODUCTION TOTALE
Volume stérile extrait (m ³)	4 473 000 m ³	1 118 600 m ³	165 390 m ³	5 756 990 m ³
Quantité stérile extrait (t)	12 077 100 t	3 020 220 t	446 553 t	15 543 873 t
Volume minerai extrait (m ³)	963 825 m ³	454 020 m ³	58 110 m ³	1 475 955 m ³
Quantité minerai extrait (t)	2 698 710 t	1 271 256 t	162 708 t	4 132 674 t

44 L'extrapolation des résultats obtenus pour les trois types de chantiers miniers modélisés à partir de la base de données nous a permis de proposer une quantité de métal jaune obtenu à l'échelle du territoire des Lémovices à l'âge du fer pour l'exploitation des gisements d'or. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 6.

TABLEAU 6. — Quantification de la production d'or en Limousin à l'âge du fer (en tonnes) par type de chantier minier (FG, FM et FP), en fonction de teneurs potentielles différentes du minerai (T_{\min} , T_{moy} et T_{\max})

PARAMÈTRES	FG	FM	FP	PRODUCTION TOTALE
$T_{\min} = 20 \text{ g/t d'or}$	48,576 t	22,882 t	2,928 t	74,386 t
$T_{\text{moy}} = 50 \text{ g/t d'or}$	121,441 t	57,206 t	7,321 t	185,968 t
$T_{\max} = 80 \text{ g/t d'or}$	194,307 t	91,530 t	11,714 t	297,551 t

45 Les vestiges miniers anciens du Limousin amènent donc à une estimation d'une production potentielle variant entre 74 et 297 t d'or à partir respectivement d'une teneur basse de 20 g/t et d'une teneur haute de 80 g/t d'or dans le minerai. Cette

estimation concerne toute la période de production documentée par l'archéologie, du ^{vi}e à la fin du ⁱer s. av. J.-C., en restant sur la seule production de l'or en roche et sans inclure l'or alluvial potentiellement récolté par ailleurs par orpillage³⁷. La production d'or chez les Celtes du Limousin a donc correspondu à une activité économique majeure sur le temps long, d'au moins 74 t d'or. Cette activité a dû apporter des richesses à ce territoire par un commerce à courte et à longue distance, compte tenu de la forte valeur marchande de ce métal précieux.

Un contrôle de la production

- ⁴⁶ Les recherches archéologiques ont permis de mettre en évidence le haut niveau technique des mineurs gaulois, mais également certaines pratiques d'encadrement dans la gestion des exploitations.

Des élites dans l'encadrement technique des mines

- ⁴⁷ Dès le début de la période laténienne ancienne, les mineurs font preuve de connaissances géologiques empiriques leur permettant de repérer et de commencer à travailler la plupart des gîtes en roche affleurant, par une exploration du gisement en sondages et tranchées³⁸. On observe aussi une rationalisation de l'espace minier et du travail dans la mine, vraisemblablement mise au point par un encadrement de spécialistes, de type « ingénieurs », mettant en place de manière assez systématique certains dispositifs techniques considérés comme indispensables.
- ⁴⁸ Ainsi, le soutènement du souterrain a demandé des activités spécialisées, mais aussi coordonnées. Les équipements en bois placés en grande quantité dans les chantiers ont mobilisé un corps de travailleurs pour abattre les arbres en forêt, les transporter près des mines par un ravitaillement régulier pour éviter de retarder les travaux. Ces troncs étaient ensuite préparés par des boiseurs (spécialistes du débit des bois) qui débitaient les différentes pièces sur place : assemblage à tenon et à mortaise des pièces ; débit sur dosses des étais et débit en rayons des planches du coffrage³⁹. Autre exemple, à La Fagassière et dès l'ouverture d'une nouvelle excavation, un dispositif d'exhaure (galerie, canal) a été aménagé, même si par la suite il devait servir peu du fait d'un abandon rapide des travaux sur un filon stérile en profondeur⁴⁰. Apparaît là une volonté d'équiper de manière préventive la future zone d'extraction de structures de drainage, alors même qu'il n'est pas encore assuré que ces équipements serviront sur la longue durée et malgré les travaux générés (creusement d'une galerie, percement d'un canal).
- ⁴⁹ On a noté aussi la volonté de regrouper les structures de traitement du minerai près des excavations avec le creusement de petites citernes pour stocker de l'eau sur place pour les unités de lavage, alors que des ruisseaux coulaient à proximité. Cela montre le besoin de garder sous contrôle cette étape décisive de la préparation du minerai qui permet de passer du minerai au lingot d'or, en installant les ateliers de traitement à côté des chantiers miniers. Le contrôle de la production était renforcé et le vol de minerai ou de métal précieux limité, l'or récupéré en fin de traitement étant fondu en petit lingot directement sur place. Cette production pouvait être ainsi contrôlée de près, comme le métal lui-même, par des tests de qualité. La découverte d'une pierre de touche marquée par de fines traces d'or a montré la présence d'un spécialiste en métaux précieux, capable de tester le titre de l'or produit et, sans doute, de maintenir une même qualité d'or (fig. 7).

FIG. 7. — Pierre de touche trouvée dans un foyer de grillage aux Fouilloux



© B. Cauuet.

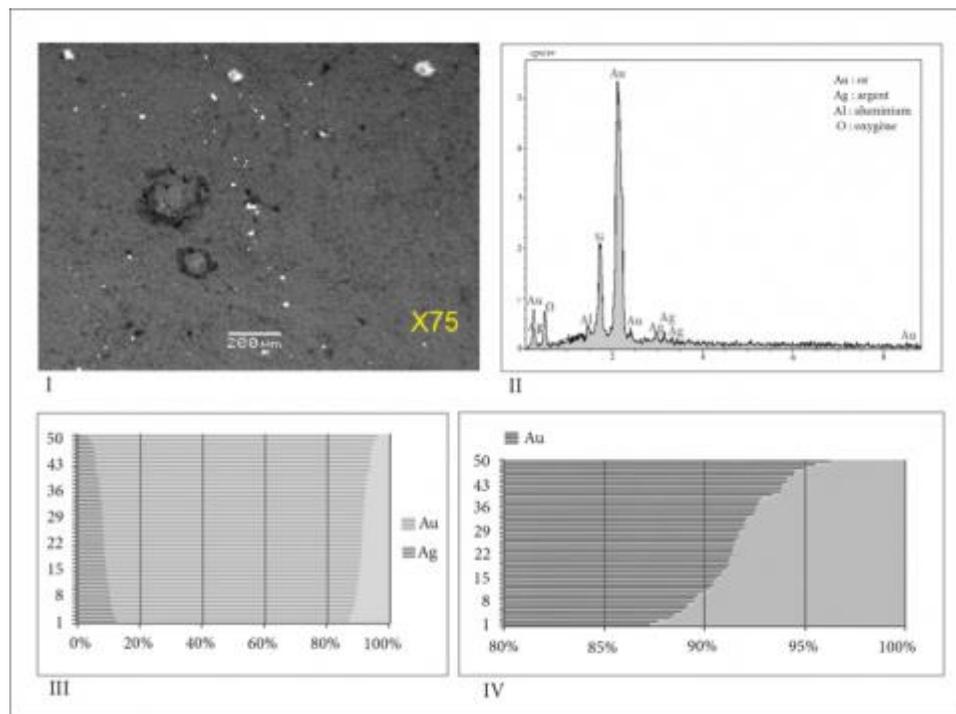
Une pierre de touche pour tester l'or produit

⁵⁰ Sur le dessus d'un foyer de grillage aux Fouilloux, une pierre de touche a été trouvée⁴¹. À l'observation au MEB, de fines particules d'or sont apparues sur la surface de l'objet et ont pu être analysées par MEB-EDS qui a donné des teneurs semi-quantitatives. Il s'agit d'un or assez pur contenant un faible pourcentage d'argent. Cette pierre de touche apparaît comme un petit galet plat⁴², de couleur noire, microporeuse et correspond à une lydienne, une sorte de jaspe (fig. 7). Il s'agit d'un outil servant de surface de test (surface micro-abrasive) par frottement et par comparaison visuelle à des métaux précieux diversement alliés en teneurs connues. Un spécialiste (orfèvre) sait estimer par ce test comparatif la teneur approximative recherchée d'un métal ou d'un alliage en métaux précieux. Ce type de pierre est encore utilisé couramment par les orfèvres. L'idée de contrôle a été renforcée par le fait d'avoir découvert cette pierre de touche portant des traces d'or. Le spécialiste qui l'a utilisée savait reconnaître le bon alliage par comparaison avec des traces d'alliages connus. Cette pièce du petit outillage d'un spécialiste en métaux précieux (souvent un orfèvre) a servi à tester le titre de l'or produit. On peut donc en conclure que, dans ces mines, on produisait de l'or épuré en petits lingots, dont le titre était contrôlé.

⁵¹ Nous avons analysé au MEB-EDS les microtraces d'or conservées sur la pierre de touche des Fouilloux (fig. 8-I et II). Sur la cinquantaine de traces analysées, il s'agit toujours d'un « doré⁴³ », un alliage d'or et d'argent produit par le métallurgiste avant un affinage plus poussé, dont les teneurs en or varient, mais qui sont toutes au moins supérieures à 87 % (fig. 8-III). En répartissant les différentes teneurs observées en tableau, on constate que sur 50 traces mesurées, on trouve : 10 traces avec un

or compris entre 87,25 et 90 % de l'alliage Au/Ag et 40 traces avec un alliage dont l'or titre entre 90 et 96,23 % (fig. 8-IV). C'est peut-être dans la tranche autour de 96,23 % qu'il faut placer le titre le plus fin de l'or produit et potentiellement mesurable par l'expertise du spécialiste/métallurgiste qui travaillait à la mine gauloise des Fouilloux.

FIG. 8. — Teneurs en or de la pierre de touche des Fouilloux



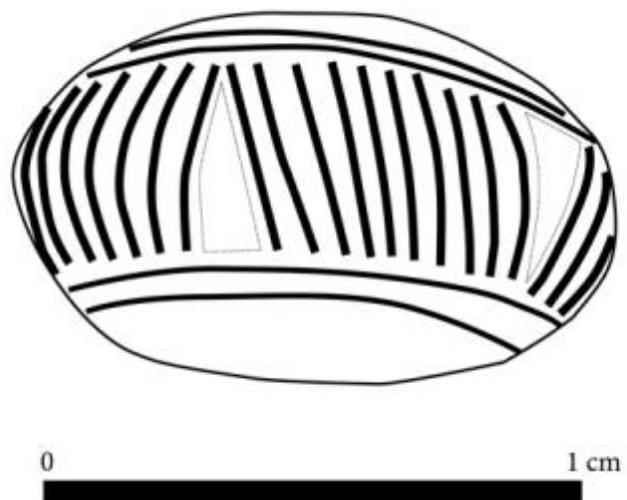
I.- image de la surface, prise au MEB, révélant de fines traces d'or incrusté dans la roche ; II.- teneurs Au/Ag détectées par le MEB-EDS d'une des traces d'or conservée ; III.- tableau des % en Au/Ag de 50 traces analysées ; IV.- tableau des % d'or au sein des 50 traces analysées

© B. Cauuet.

Un poids de petite taille en bronze trouvé en mine

52 En 2003, au sein du district minier de Tulle en Corrèze, une aurière (excavation pour or) de taille moyenne (27 x 34 m ; 6 m de profondeur environ), partie prenante d'un petit complexe minier au lieu-dit Le Chazal (commune de Saint-Clément), a fait l'objet d'une opération de sondage conduite par M. Boussicault⁴⁴. À quelques mètres du bord de la fosse étudiée, la fouille a mis au jour un petit poids en bronze (alliage en base cuivre), retrouvé dans un niveau stratigraphique daté par des charbons de bois des IV^e-III^e s. av. J.-C⁴⁵. Le poids de forme discoïdale, plat sur ses deux faces, est décoré de fines incisions obliques et parallèles sur le bombé de sa circonférence. Ces hachures sont disposées alternativement vers la droite, puis vers la gauche, et dessinent ainsi un motif de triangle entre chaque lot de hachures. Ce poids est très petit (diamètre 1,05 cm ; ép. 0,54 cm) et pèse 1,8 g (fig. 9).

FIG. 9. — Poids en bronze décoré d'incisions obliques, trouvé au bord d'une aurière datée des III^e-II^e s. av. J.-C. à la mine d'or du Chazal (Saint-Clément, Corrèze)



© / DAO : B. Cauuet.

- 53 Il n'existe pas à ce jour de poids comparable en France pour l'âge du fer. En revanche, par sa forme et son poids, il s'apparente à des poids similaires en bronze trouvés dans des habitats de l'âge du bronze au Portugal et dans le Sud-Ouest de l'Espagne, par ailleurs liés à un commerce lointain avec les Phéniciens⁴⁶. Ce type de poids entre dans la métrologie du poids étalon d'un shekel, du type shekel syrien (du site d'Ougarit). Parmi les nombreux types de poids retrouvés dans la cargaison marchande de l'épave d'Uluburun au large de la Turquie⁴⁷, qui a été datée de l'âge du bronze (xive s. av. J.-C.), un ensemble de poids du système du shekel syrien d'Ougarit a également été trouvé⁴⁸. Dans les sites portugais, on rencontre plusieurs poids correspondant à différentes subdivisions de ce type de shekel, d'un poids moyen de 9,3 g selon Raquel Vilaça⁴⁹.
- 54 Le poids trouvé à la mine d'or du Chazal pourrait donc correspondre à 1/5 de ce shekel syrien et en serait la plus petite division. Les poids les plus petits d'un tel système métrologique devaient être difficiles à fabriquer car ils devaient reproduire un poids parfaitement standardisé. Aussi, le fait que le poids du Chazal ne corresponde qu'à un étalon de 9 g reste d'une norme acceptable selon les spécialistes⁵⁰. Par ailleurs, ce type de poids, très petit, était généralement réservé pour la pesée de matières rares et précieuses, comme l'or. La pesée avec poids et balance n'est pas inconnue à l'âge du bronze dans cette partie de la France où de fins fléaux de balance en os ont été découverts dans des sépultures, notamment en Charente⁵¹. Par ailleurs, nous rappelons qu'un début de l'exploitation des gisements d'or en roche du Limousin à l'âge du bronze moyen, voire au Bronze final, est attesté par la présence de céramiques à Cros Gallet-Nord, ainsi qu'aux Fouilloux en association avec un outil en pierre de mineur (maillet à rainure).

Interprétations et conclusion

- 55 À Cros Gallet-Nord et dès La Tène ancienne, le regroupement des installations de traitement (concassage, broyage, lavage) à proximité immédiate des excavations minières et le stockage d'eau dans les zones de travail devaient permettre un meilleur contrôle de la production d'or, alors que l'ensemble du site est bordé côté nord par le ruisseau Gallet près duquel on aurait pu penser que se déplaçaient les opérations de lavage. De même au Puy des Angles et pour la période de La Tène moyenne, une laverie centralisée a été installée ce qui montre une organisation du travail minier déjà très évoluée à cette période et, là aussi, sous contrôle à proximité immédiate des excavations minières. Cette organisation va de pair avec l'amélioration des techniques déjà évoquées dans la phase précédente du traitement minéralurgique au travers de l'introduction du grillage du minerai et du moulin rotatif documentée aux Fouilloux dans la deuxième moitié du III^e s. av. J.-C.
- 56 Nos premiers résultats analytiques évoquent l'hypothèse de l'utilisation d'un creuset ou d'une coupelle (le petit creuset d'essai trouvé à Cros Gallet-Nord) qui aurait pu servir à la purification de l'or (extraction de l'argent) par cémentation. Au cours de cette opération, l'argent aurait diffusé dans le creuset et, justement, on note un enrichissement en argent dans ce dernier⁵². La présence d'une pierre de touche pour tester l'or sur une mine gauloise indique qu'une métallurgie de l'or s'est pratiquée sur cette mine des Fouilloux, et qu'il y avait un orfèvre spécialiste de la fusion de l'or qui travaillait sur le site.
- 57 Par toutes ces découvertes et les interprétations et résultats qui en découlent, comme l'important tonnage d'or obtenu par nos calculs, on peut apprécier l'apport de l'archéologie minière dans l'estimation des productions en métaux frais et plus généralement dans la connaissance des économies liées aux métaux et à leur commerce dans les sociétés anciennes. On voit ici que par une quantification conduite au plus près des vestiges archéologiques encore existants et riches de données historiques et techniques, on peut apporter des éléments relativement précis sur la part économique que représentait cette activité d'extraction et de production d'or. Les mines sont des espaces de production où des données tangibles sont encore bien

conservées. Elles permettent une approche directe de la quantification des productions en métaux, plus réaliste que l'estimation de cette production par une quantification des objets fabriqués dont la part conservée est toute relative, notamment par le fait des refontes importantes à toutes les époques.

58 L'exploitation de l'or, et peut-être de l'argent en sous-produit, à l'âge du fer en Limousin vient d'une longue tradition minière, vraisemblablement héritée de l'âge du bronze. Elle a permis de produire sur environ cinq siècles d'activité, plus ou moins continue et avec une intensité variable selon les périodes à l'âge du fer, plus de 74 t d'or pour une estimation basse d'un minerai à 20 g/t. Les débuts de l'activité minière à l'âge du bronze et la présence d'un poids (métrologie du shekel syrien d'Ougarit) en bronze pour peser les lingots d'or produits dès cette époque sont une première indication pour de possibles liens commerciaux à longue distance vers les sociétés méditerranéennes. Plus précisément, on peut penser à des contacts avec des marchands phéniciens venus du Levant pour faire du commerce sur les côtes du Midi de la France avec les populations indigènes de l'intérieur du territoire. Sachant que très peu d'or a été à ce jour trouvé dans les sanctuaires et les nécropoles de l'âge du fer chez les Lémovices, on est tenté de penser que des contacts méditerranéens intervenus très tôt dans l'histoire auraient offert un débouché pour cet or frais, directement sorti des mines⁵³.

Bibliographie

BONVILLE, Laurène, CAUJET, Béatrice, MUNOZ, Marguerite, TĂMAȘ, Călin Gabriel (2014), « Production d'or affiné à l'époque gauloise en Limousin. Analyses des produits de la chaîne opératoire restituée par l'expérimentation », *24^e Réunion des Sciences de la Terre, RST (Pau, 27-31 oct. 2014)*, Paris, p. 348.

BOUCHOT, Vincent, MILÉSI, Jean-Pierre, LESCUYER, Jean-Luc, LEDRU, Patrick (1997), « Les minéralisations aurifères de la France dans leur cadre géologique autour de 300 Ma », *Chronique Recherche Minière*, 528, pp. 13-62.

BOUSSICAULT, Matthieu (2003), « Une aurière gauloise à Saint-Clément (Le Chazal, Corrèze) », *Bilan Scientifique Régional Limousin*, pp. 21-22.

CAUJET, Béatrice (1989), « Aurières du Limousin : état de la recherche dans le district minier de St Yrieix-la-Perche (Haute-Vienne) », dans *Mines et métallurgies antiques et médiévales de la France méridionale, Actes des Journées de Perpignan (21-22 fév. 1987)*, Perpignan, pp. 53-72.

CAUJET, Béatrice (1999), « L'exploitation de l'or en Gaule à l'âge du fer », dans Béatrice CAUJET (éd.), *L'Or dans l'Antiquité de la mine à l'objet*, Supplément n° 9 de *Aquitania*, pp. 31-86.

CAUJET, Béatrice (2004), *L'or des Celtes du Limousin*, Limoges, Culture et Patrimoine en Limousin.

CAUJET, Béatrice (2008), « Équipements en bois dans les mines d'or protohistoriques et antiques (Gaule et Dacie romaine) », dans Marie-Christine BAILLY-MATRE, Colette JOURDAIN-ANNEQUIN, Magdeleine CLERMONT-JOLY (éd.), *Archéologie et paysages des mines anciennes. De la fouille au musée*, Paris, Picard, pp. 57-73.

CAUJET, Béatrice, DOMERGUE, Claude, GOMEZ, José, HAUTENAUE, Hélène, MORET, Pierre (2001), *L'Or de Tolosa*, catalogue d'exposition (Toulouse, Musée Saint-Raymond, 17 octobre 2001 au 20 janvier 2002), éd. d'Évelyne UGAGLIA, Toulouse, Odyssee.

CAUJET, Béatrice, TOLLON, Francis (1999), « Problèmes posés par le traitement des minerais et la récupération de l'or dans les mines gauloises du Limousin », dans Béatrice CAUJET (éd.), *L'Or dans l'Antiquité de la mine à l'objet*, Supplément n° 9 de *Aquitania*, pp. 185-198.

GOMEZ DE SOTO, José (1995), *Le Bronze moyen en Occident*, Paris, Picard.

GRATUZE, Bernard, BARRANDON, Jean-Noël (1999), « Apports des analyses dans l'étude de creusets liés à la métallurgie de l'or : étude d'un creuset et de quatre fragments de creusets provenant du site de Cros Gallet (Le Chalard, Haute-Vienne) », dans Béatrice CAUJET (éd.), *L'Or dans l'Antiquité de la mine à l'objet*, Supplément n° 9 de *Aquitania*, Bordeaux, pp. 205-212.

PEAKE, Rébecca, SÉGUIER, Jean-Marc, GOMEZ DE SOTO, José (1999), « Fléaux de balances en os de l'âge du bronze », *Bulletin de la Société Préhistorique Française*, 96 (4), pp. 643-644.

PULAK, Cemal (1998), « The Uluburun shipwreck: an overview », *The International Journal of Nautical Archaeology*, pp. 188-224.

TĂMAȘ, Călin Gabriel, CAUJET, Béatrice, MILOT, Jean (2014), « Mineralogy of precious metals ore from Les Fouilloux Gaul mine, Limousin (France) from metals traceability perspective », *Romanian Journal of Mineral Deposits*, 87 (1), pp. 95-98.

TOLEDO I MUR, Assumpcio, VACCA-GOUTOULLI, Mireille, MILOR, Frédéric (2005), « Une mine d'or protohistorique : le Puy des Angles aux Angles-sur-Corrèze (Corrèze) », *Gallia*, 62, pp. 171-214.

VILAÇA, Raquel (2011), « Ponderais do Bronze final-Ferro inicial do Occidente Peninsular: novos dados e questões em aberto », dans María Paz GARCÍA-BELLIDO, Laurent CALLEGARIN, Alicia JIMÉNEZ DíEZ (éd.), *Barter, Money and Coinage in the Ancient Mediterranean (10th-1st c. BC)*, Madrid, pp. 139-167.

Notes

1 CAUJET, 1989, pp. 53-72 ; EAD., 1999, pp. 31-70. Le travail d'inventaire inédit de M. Boussicault mené dans le cadre d'une thèse, restée inachevée, a été consigné dans des rapports annuels conservés au Service régional de l'archéologie du Limousin et a été rapporté annuellement dans les bulletins scientifiques régionaux du Limousin de 1998 à 2003.

2 EAD., 2004, pp. 20-21.

3 Fouilles préventives conduites par B. Caujet aux mines d'or des Fouilloux (Jumilhac-le-Grand, Dordogne), de Cros Gallet-Nord et de Cros Gallet-Sud (Le Chalard, Haute-Vienne) ; de Laurières (Saint-Yrieix-la-Perche, Haute-Vienne) et de La Fagassière (Château-Chervix, Haute-Vienne).

4 Fouilles programmées et menées par B. Caujet à la mine de La Forge de Tindeix (Jumilhac-le-Grand, Dordogne) et par M. Boussicault à la mine du Chazal (Saint-Clément, Corrèze).

5 Fouilles préventives intervenues sur la mine du Puy des Angles (Angles-sur-Corrèze, Corrèze) dans le cadre de la construction de l'autoroute A89 et dirigées par A. Toledo i Mur de l'INRAP. TOLEDO I MUR, VACCA-GOUTOULLI, MILOR, 2005, pp. 171-214.

6 CAUJET, 1999, pp. 31-70 ; CAUJET *et alii*, 2001 ; CAUJET, 2004.

7 GOMEZ DE SOTO, 1995, pp. 62-68.

8 CAUJET, 1999, pp. 37-38 ; EAD., 2001, pp. 98, 102-103.

9 EAD, 2004, pp. 40-41.

10 *Ibid.*, pp. 70-79.

11 *Ibid.*, pp. 81-88.

12 CAUJET, 1999, pp. 42-48.

13 EAD., 2004, pp. 29-79.

14 CAUJET, TOLLON, 1999, pp. 185-198.

15 Dans ce dossier, nous donnerons les premiers résultats d'analyses en cours sur les matériaux produits par nos expérimentations.

16 Cette chaîne opératoire de l'or a permis de passer d'un minerai à de l'or coulé en lingot.

17 BOUCHOT *et alii*, 1997, pp. 13-62.

18 *Ibid.*, pp. 13-62.

19 TĂMAȘ, CAUJET, MILOT, 2014, pp. 95-98.

20 Compléments à la légende de la fig. 1–I : a.- association minéralogique électrum et quartz gris blanc, inclusions d'arsénopyrite dans l'électrum et de galène-chalcopyrite-boulangérite déposée sur grain d'électrum ; b.- association électrum-boulangérite dans quartz ; c.- grain mixte de boulangérite-bournonite dans quartz. Barre échelle : 50 microns pour a et c ; 200 microns pour b.

21 Compléments à la légende de la fig. 1–II : a.- plages de galène à Bi dans le cuivre gris argentifère ; b.- électrum et chalcopyrite dans les fissures et les cavités du cuivre gris argentifère ; c.- gros grain d'électrum à inclusion d'arsénopyrite, situé sur le bord du cuivre gris argentifère. Barre échelle : 50 microns pour a et c ; 20 microns pour b.

22 Compléments à la légende de la fig. 1–III : a.- association arsénopyrite-stibine-cuivre gris dans une cavité du quartz ; b.- deux grains d'or natif dans la stibine en contact avec un grain de jamesonite ; c.- or natif remplissant les cavités le long du contact stibine-quartz. Barre échelle : 100 microns pour a ; 20 microns pour c et 10 microns pour b.

23 CAUJET *et alii*, 2001, pp. 59-61 ; CAUJET, 2004, pp. 105-108.

24 Avec la collaboration de Jacques Happ⁺ (paléométallurgiste).

25 Société des Mines du Bourneix, filiale de la COGEMA, fermée en 2001.

26 CAUJET, TOLLON, 1999, pp. 185-198.

27 À partir des différents éléments de meules retrouvés, une réplique de moulin en granite a été commandée à un tailleur de pierre, M. Carivenc, de Saint-Salvy-de-la-Balme dans le Sidobre (Tarn).

28 Donnée fournie par la Société des Mines du Bourneix.

29 Ce programme en cours est partie prenante du projet d'ANR MINEMET qui a été financé par l'Agence nationale de la recherche de 2012 à 2015.

30 BONVILLE *et alii*, 2014, p. 348.

31 GRATUZE, BARRANDON, 1999, p. 207.

32 Les formes et les dimensions de chaque type de chantiers miniers modélisés sont présentées à la figure 6.

33 La dilution est la baisse de la teneur moyenne d'une exploitation par rapport aux potentialités d'un gisement lorsque l'on doit extraire trop de roche stérile pour accéder au minerai riche, comme c'est le cas dans les grandes mines à ciel ouvert aujourd'hui.

34 BOUCHOT *et alii*, 1997.

35 Le détail des fosses repérées sur le terrain, site par site, figurant dans cette base de données est à paraître dans un article prochainement.

36 Le nombre de ces trois types de fosses ici présenté ne correspond pas au nombre réel de fosses existant sur le terrain, car nous avons dû faire des regroupements d'excavations pour qu'elles rentrent bien dans nos modèles de base.

37 Dans un article en préparation, nous allons tenter de distinguer les travaux anciens, plus superficiels correspondant à la première phase d'exploitation artisanale (du VI^e au milieu du III^e s. av. J.-C.), des travaux plus récents (de la deuxième moitié du III^e à la fin du I^{er} s. av. J.-C.) correspondant à une production intensive.

38 CAUJET, 2004, pp. 37-40.

39 EAD., 2008, pp. 57-73.

40 EAD., 1997, pp. 197-218.

41 CAUJET, TOLLON, 1999, p. 190.

42 Caractéristiques de la pierre de touche des Fouilloux : L. 5,6 cm ; l. 2 cm ; Pds 40 g.

43 Aujourd'hui, dans les installations d'enrichissement de l'or en roche (toujours un électrum), le doré correspond à l'alliage or/argent obtenu en première fusion de l'or après traitement et avant l'affinage qui permettra de séparer l'or de l'argent par cémentation.

44 BOUSSICAULT, 2003, pp. 21-22.

45 Datation radiocarbone de charbons de bois présents dans le niveau : date calibrée 401-204 cal BC (IntCal 13 ; réf. ARC 2338 : 2260 +/- 45 BP).

46 VILAÇA, 2011, pp. 139-167.

47 Dans cette cargaison, 240 poids en pierre et en métal ont été retrouvés.

48 PULAK, 1998, pp. 209-210.

49 Le shekel (ou sicle) est un poids étalon (en poids ou en monnaie) du Levant. Il correspondait, à l'origine, à une unité de poids et à une monnaie utilisées en Mésopotamie depuis le III^e millénaire jusqu'au 1^{er} siècle av. J.-C. Il a été véhiculé par le commerce phénicien dans toute la Méditerranée et est une subdivision de la mine ; 1 mine (465 g) = 50 shekels (9,3 g x 50). Dans la Méditerranée orientale, plusieurs systèmes de valeur de shekel ont coexisté (variabilité de 9 à 9,9 g, voire plus) ; voir VILAÇA, 2011, pp. 139-167.

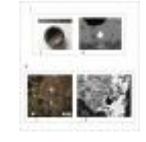
50 *Ibid.*, pp. 139-167.

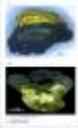
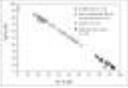
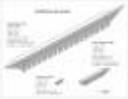
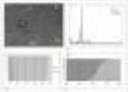
51 PEAKE, SÉGUIER, GOMEZ DE SOTO, 1999, pp. 643-644.

52 GRATUZE, BARRANDON, 1999, p. 208.

53 Ce programme en cours est partie prenante du projet d'ANR MINEMET « Production et provenance d'or et d'étain dans l'Occident protohistorique et antique » qui a été soutenu et financé par l'Agence nationale de la recherche française, de 2012 à 2016.

Table des illustrations

	<p>Titre Carte. 1. — Les neuf districts miniers aurifères des Lémovices et localisation des sites évoqués</p> <p>Légende 1.- Saint-Yrieix-la-Perche ; 2.- Monts de Blond ; 3.- Beaune-les-Mines ; 4.- Monts d'Ambazac ; 5.- Bénévent-l'Abbaye ; 6.- Aubusson ; 7.- Les Combrailles ; 8.- Ussel ; 9.- Tulle.</p> <p>Crédits DAO : B. Cauuet.</p> <p>URL http://journals.openedition.org/mcv/docannexe/image/8174/img-1.jpg</p> <p>Fichier image/jpeg, 115k</p>
	<p>Titre Fig. 1. — Images au microscope en réflexion utilisant un filtre polariseur du minerai aurifère et argentifère de Laurières (I et II) et des Fouilloux (III)</p> <p>Crédits © C. Tămaș.</p> <p>URL http://journals.openedition.org/mcv/docannexe/image/8174/img-2.jpg</p> <p>Fichier image/jpeg, 319k</p>
	<p>Titre Fig. 2. — Creusets trouvés à Cros Gallet-Nord</p> <p>Légende I. — petit creuset d'essai ; II. — fragment d'un creuset pour fusion scorifiante ; détail de la paroi vitrifiée du grand creuset incomplet contenant des petites billes d'or.</p> <p>Crédits © B. Cauuet.</p> <p>URL http://journals.openedition.org/mcv/docannexe/image/8174/img-3.jpg</p> <p>Fichier image/jpeg, 245k</p>
	<p>Titre Fig. 3. — Creuset expérimental</p> <p>Légende I. — a.- vue générale ; b.- couche vitrifiée millimétrique du creuset après fusion (billes d'or en blanc dans l'image MEB).</p> <p>Crédits © M. Munoz.</p>

	URL	http://journals.openedition.org/mcv/docannexe/image/8174/img-4.jpg
	Fichier	image/jpeg, 248k
	Titre	Fig. 4. — Exemple d'or coulé accolé aux scories ferreuses et siliceuses
	Légende	I.- vue générale ; II.- produit de fusion vu en section.
	Crédits	© B. Cauuet, M. Munoz.
	URL	http://journals.openedition.org/mcv/docannexe/image/8174/img-5.jpg
	Fichier	image/jpeg, 1,4M
	Titre	Fig. 5. — Composition de l'or métal produit, des inclusions métalliques résiduelles dans les scories, dans le creuset et or du minerai
	Crédits	© M. Munoz.
	URL	http://journals.openedition.org/mcv/docannexe/image/8174/img-6.jpg
	Fichier	image/jpeg, 71k
	Titre	Fig. 6. — Modélisation des fosses et des panneaux de minerai aurifère (exploités en grandes, moyennes et petites fosses)
	Crédits	DAO : B. Cauuet.
	URL	http://journals.openedition.org/mcv/docannexe/image/8174/img-7.jpg
	Fichier	image/jpeg, 125k
	Titre	Fig. 7. — Pierre de touche trouvée dans un foyer de grillage aux Fouilloux
	Crédits	© B. Cauuet.
	URL	http://journals.openedition.org/mcv/docannexe/image/8174/img-8.jpg
	Fichier	image/jpeg, 98k
	Titre	Fig. 8. — Teneurs en or de la pierre de touche des Fouilloux
	Légende	I.- image de la surface, prise au MEB, révélant de fines traces d'or incrusté dans la roche ; II.- teneurs Au/Ag détectées par le MEB-EDS d'une des traces d'or conservée ; III.- tableau des % en Au/Ag de 50 traces analysées ; IV.- tableau des % d'or au sein des 50 traces analysées
	Crédits	© B. Cauuet.
	URL	http://journals.openedition.org/mcv/docannexe/image/8174/img-9.jpg
	Fichier	image/jpeg, 147k
	Titre	Fig. 9. — Poids en bronze décoré d'incisions obliques, trouvé au bord d'une aurière datée des iii ^e -ii ^e s. av. J.-C. à la mine d'or du Chazal (Saint-Clément, Corrèze)
	Crédits	© / DAO : B. Cauuet.
	URL	http://journals.openedition.org/mcv/docannexe/image/8174/img-10.jpg
	Fichier	image/jpeg, 316k

Pour citer cet article

Référence papier

Béatrice Cauuet, Călin Gabriel Tămaş, Matthieu Boussicault et Marguerite Munoz, « Quantités et contrôle de l'or produit à l'âge du fer en Gaule du Centre-Ouest », *Mélanges de la Casa de Velázquez*, 48-1 | 2018, 13-42.

Référence électronique

Béatrice Cauuet, Călin Gabriel Tămaş, Matthieu Boussicault et Marguerite Munoz, « Quantités et contrôle de l'or produit à l'âge du fer en Gaule du Centre-Ouest », *Mélanges de la Casa de Velázquez* [En ligne], 48-1 | 2018, mis en ligne le 16 avril 2018, consulté le 23 avril 2018.

URL : <http://journals.openedition.org/mcv/8174>

Auteurs

Béatrice Cauuet

Université Toulouse - Jean Jaurès (Traces, UMR 5608)

Călin Gabriel Tămaş

Université Babeş-Bolyai, Cluj-Napoca, Roumanie

Matthieu Boussicault

Université Toulouse - Jean Jaurès (Traces, UMR 5608)

Marguerite Munoz

Université Toulouse 3 - Paul Sabatier (Get, UMR 5563)

Droits d'auteur

© Casa de Velázquez