

L'OR DANS L'ANTIQUITÉ

DE LA MINE À L'OBJET

Sous la direction de Béatrice Cauuet

AQUITANIA
Supplément 9

CET OUVRAGE A ÉTÉ PUBLIÉ AVEC LE CONCOURS FINANCIER
du Ministère de la Culture et de la Communication,
Direction du Patrimoine, Sous-Direction de l'Archéologie
de la Région Limousin,
de la Région Midi-Pyrénées,
de la COGEMA,
de la Communauté Européenne PDZR,
de l'Unité Toulousaine d'Archéologie et d'Histoire (UMR 5608)

COUVERTURE

PHOTO DU HAUT : *Détail de la maquette de la mine d'or des Fouilloux
(Jumilhac, Dordogne, France), exploitée à la Tène finale.*

Conception B. Cauuet, réalisation P. Maillard de MAD Entreprise (cliché : Studio 77).

PHOTO DU BAS : *Extrémité d'un collier d'or datant du Bronze final, Gleninsheen, Co. Clare, Irlande
(cliché National Museum of Ireland).*

DOS DE COUVERTURE

PHOTO DU HAUT : *Bouloun-Djounga (Niger) : mine d'or ouverte dans la latérite (cliché G. Jobkes).*

PHOTO DU BAS : *Femme Fulbe (Mali) parée de boucles d'oreilles massives à lobes effilés (cliché B. Armbruster).*

La publication de cet ouvrage
a été préparée par Béatrice Cauuet,

assistée de

Claude Domergue,
Martine Fabioux,
Jean-Michel Lassure,
Maurice Montabrut et
Jean-Marie Pailler

qui ont assuré les relectures, des traductions pour certains
et parfois quelques remaniements des textes,

ainsi que de

Patrice Arcelin
pour les cartes informatisées.

MAQUETTE

Teddy Bélier (Toulouse)

IMPRESSION

Achever d'imprimer en octobre 1999

Imprimerie Lienhart à Aubenas d'Arèche

Dépôt légal octobre 1999 - N° d'imprimeur : 1716

Printed in France

ISBN : 2-910763-03-X

A Richard Boudet,

Sommaire

page 9 Robert SAVY, *Président du Conseil Régional du Limousin*,
Préface

page 10 Martine FABILOUX,
Avant - propos

page 11 Béatrice CAUJET,
Introduction

Aux origines de l'or : géologie - aires - techniques

page 17 Marie-Christine BOIRON et Michel CATHELINÉAU,
Les gisements aurifères, théories anciennes et nouvelles, or visible et invisible : exemples des gisements d'Europe de l'Ouest

page 31 Béatrice CAUJET,
avec des annexes de Béatrice SZEPERTYSKI et Marie-Françoise DIOT,
L'exploitation de l'or en Gaule à l'Age du Fer

page 87 Filippo GAMBARI,
Premières données sur les *aurifodinae* (mines d'or) protohistoriques du Piémont (Italie)

page 93 Claude DOMERGUE et Gérard HERAIL,
Conditions de gisement et exploitation antique à Las Médulas (León, Espagne)

page 117 Volker WOLLMANN,
Contribution à la connaissance de la topographie archéologique d'*Alburnus Maior* (Roşia Montană) et à l'histoire des techniques d'exploitation romaine en Dacie

page 131 Georges CASTEL et Georges POUIT,
Les exploitations pharaoniques, romaines et arabes de cuivre, fer et or. L'exemple du ouadi Dara (désert oriental d'Egypte)

Ethno-archéologie comparative

page 147 Georg JOBKES,
La production artisanale de l'or au Niger dans son contexte socio-économique

page 163 Barbara ARMBRUSTER,
Production traditionnelle de l'or au Mali

Traitement des minerais, techniques métallurgiques

page 185 Béatrice CAUJET et Francis TOLLON,
Problèmes posés par le traitement des minerais et la récupération de l'or dans les mines gauloises du Limousin

page 199 Jiri WALDHAUSER,
Des objets celtes en or très pur à l'affinage de l'or en Bohême en relation avec la technique minière dite "soft-mining"

page 205 Bernard GRATUZE et Jean-Noël BARRANDON,
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)

page 213 Jean-Noël BARRANDON,
Du minerai aux monnaies gauloises en or de l'ouest : purification et altération

page 217 Rupert GEBHARD, Gerhard LEHRBERGER, Giulio MORTEANI, Ch. RAUB,
Ute STEFFGEN, Ute WAGNER,
Production techniques of Celtic Gold Coins in Central Europe

Fabrication et diffusion de la joaillerie

page 237 Barbara ARMBRUSTER,
Techniques d'orfèvrerie préhistorique des tôles d'or en Europe atlantique des origines à l'introduction du fer

page 251 Peter NORTHOVER,
Bronze Age gold in Britain

page 267 Mary CAHILL,
Later Bronze Age Goldwork from Ireland - Form and Function

page 277 Gilbert KAENEL,
L'or à l'Age du Fer sur le Plateau suisse : parure-insigne

page 291 Giovanna BERGONZI et Paola PIANA AGOSTINETTI,
L'or dans la Protohistoire italienne

page 307 Alicia PEREA,
L'archéologie de l'or en Espagne : tendances et perspectives

page 315 Hélène GUIRAUD,
Bijoux d'or de l'époque romaine en France

Or, économie et symbolique dans les sociétés celtiques

page 331 Christian GOUDINEAU,
Les Celtes, les Gaulois et l'or d'après les auteurs anciens

page 337 José GOMEZ DE SOTO,
Habitats et nécropoles des âges des métaux en Centre-Ouest et en Aquitaine : la question de l'or absent

Jean-Michel BEAUSOLEIL,
Mobilier funéraire et identification du pouvoir territorial à l'Age du Fer sur la bordure occidentale du Massif Central

page 357 Serge LEWUILLON,
En attendant la monnaie. Torques d'or en Gaule

Production et circulation des monnayages d'or

page 401 Kamen DIMITROV,
Monnaies et objets d'or sur le territoire d'un Etat en Thrace du Nord-Est pendant la période haute-hellénistique

page 409 Gérard AUBIN,
Le monnayage de l'or en Armorique : territoires, peuples, problèmes d'attribution

page 417 Richard BOUDET, Katherine GRUEL, Vincent GUICHARD, Fernand MALACHER,
L'or monnayé en Gaule à l'Age du Fer. Essai de cartographie quantitative

Or, économie et symbolique dans le monde antique

page 429 Raymond DESCAT,
Approche d'une histoire économique de l'or dans le monde grec aux époques archaïque et classique

page 441 Michel CHRISTOL,
L'or de Rome en Gaule. Réflexions sur les origines du phénomène

page 449 Jean-Marie PAILLER,
De l'or pour le Capitole (Tacite, Histoires, IV, 53-54)

page 457 Claire FEUVRIER-PREVOTAT,
L'or à la fin de la République Romaine. Représentations, valeur symbolique, valeur

page 470 Claude DOMERGUE,
Conclusion

page 474 Glossaire

page 482 Index

An aerial photograph of a gold mine in a rural landscape. The mine is a large, deep, rectangular excavation with a wooden structure on the left side. The surrounding area is a mix of green grass and brown earth. In the background, there are several traditional huts with thatched roofs and some trees. The sky is a pale, overcast blue.

*Aux origines de l'or :
géologie,
aires, techniques*

Marie-Christine BOIRON et Michel CATHELINÉAU

Centre de Recherches
sur la Géologie des
Matières Premières
Minérales et Énergétiques
CREGU et UMR 7566,
Vandœuvre-les-Nancy,
France

Les gisements aurifères, théories anciennes et nouvelles, or visible et invisible : exemples des gisements d'Europe de l'Ouest

Résumé

Les concentrations filoniennes des socles cristallins hercyniens ont fait l'objet de recherches minières importantes depuis l'Antiquité en Europe de l'Ouest (Espagne, Portugal, France, République Tchèque), parallèlement à l'exploitation des concentrations alluvionnaires anciennes et récentes. Ces minéralisations présentent une métallogenèse tardi-hercynienne polyphasée et l'existence systématique de liaisons spatiales évidentes mais pas nécessairement génétiques entre l'arsénopyrite et l'or. Les études réalisées ces dernières années ont montré l'importance du polyphasage des circulations de fluides au sein de zones dites "de cisaillement", entraînant des séries de dépôts : paragenèses à sulfures précoces (pyrite-arsénopyrite), puis à sulfures-sulfosels-or natif. L'analyse des mécanismes à l'origine des concentrations permet d'expliquer les caractéristiques des gisements (teneurs, or visible ou invisible, or métallique ou réfractaire). Ces caractéristiques sont à l'origine de modes d'exploitation fort différents au cours des âges. Il y a donc des relations entre les mécanismes de genèse des minéralisations et l'histoire minière.

Abstract

In Western Europe (Spain, Portugal, France, Czech Republic), vein type deposits constitute the most prospected type of deposits since Antiquity, alongside the exploitation of old and recent placers. These ore deposits present similar features : a late-hercynian multistage metallogenesis, a complex structural evolution of the ore veins from ductile to brittle stages, the systematic spatial but not necessarily genetic relationships between the presence of arsenopyrite, sometimes bearing gold as a trace element in its crystalline network, and native gold, supergene alteration (oxydation), followed by erosion at the origin of alluvial placers. Recent studies have emphasized the multistage feature of the fluid flows in the so-called "shear zones" and the subsequent metal deposition : early sulphides (pyrite-arsenopyrite), followed by sulfosalts-sulphides-native gold. Processes at the origin of the metal deposition explain most of the features of the deposits - low (<1 ppm) to high (several tens of ppm) grades -, shape of the ore bodies (veins or disseminated ores), mechanical features of the ores controlling the ability to grinding, visible or invisible gold, metallic or refractory gold (possibility of cyanidation). These features yield to distinct ore beneficiation processes through the ages. Thus, there are close relations between ore genesis and mining history.

En Europe de l'Ouest (Espagne, Portugal, France) (fig. 1), ce sont principalement les concentrations filoniennes de socles cristallins hercyniens qui ont fait l'objet des recherches minières les plus intenses depuis l'Antiquité (fig. 2 et 3). Ces minéralisations présentent des caractéristiques communes : une métallogénèse tardi-hercynienne polyphasée, une évolution structurale complexe des zones filoniennes (stades ductiles, puis cassants), l'existence systématique de liaisons spatiales évidentes¹ et des altérations supergènes (oxydation). A ce type très répandu, il faut ajouter les minéralisations associées très étroitement au volcanisme tertiaire circum-méditerranéen (sud-est de l'Espagne, par exemple). Les concentrations de type placer (ancien ou récent) résultent de la dégradation en surface (érosion, transport par les eaux de ruissellement et les rivières) de ces (pré) concentrations.

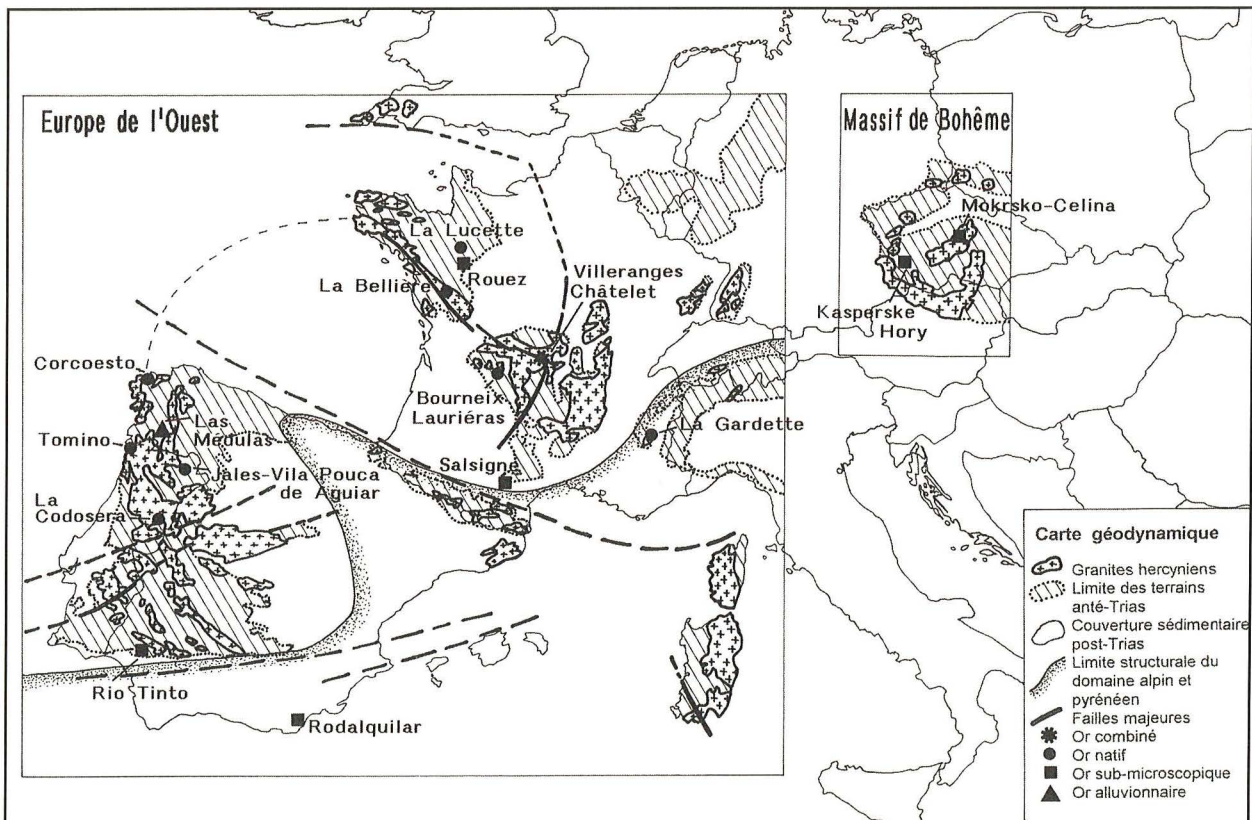
L'analyse des mécanismes à l'origine des concentrations permet d'expliquer les caractéris-

tiques des gisements², la nature du volume minéralisé (filon ou dissémination), les caractéristiques mécaniques des minerais (facilité de broyage), or visible ou invisible, or métallique ou réfractaire (or accessible ou non à la cyanuration). Ces paramètres ont conditionné des modes d'exploitation fort différents au cours des âges. Il y a donc des relations entre les mécanismes de genèse des minéralisations et l'histoire minière.

Les nombreuses études réalisées dans les dix dernières années sur les veines de quartz aurifère de la chaîne varisque ont largement modifié les concepts métallogéniques. Les approches multidisciplinaires mettant en relation les stades de circulations fluides, les réseaux de microfissuration, les paragenèses métalliques et d'altération ont permis une meilleure compréhension des différentes étapes de la formation des gisements. Les différents aspects de ces études intégrées sont présentés ci-après ainsi qu'une discussion de l'évolution des modèles métallogéniques

1. Mais ces liaisons ne sont pas nécessairement génétiques entre l'arsénopyrite (FeAsS), plus ou moins riche en or combiné, et l'or natif.
2. Teneurs faibles (autour de 1 ppm) à très fortes (> plusieurs dizaines de ppm en moyenne à quelques centaines très localement).

Fig. 1
Localisation des principaux gisements et indices aurifères d'Europe de l'Ouest et du massif de Bohême.





2 | 3

Fig. 2

Anciens travaux miniers romains, Tres Minas, District de Vila Pouca de Aguiar (Portugal).

**Fig. 3**

Anciens travaux miniers romains, Penedono (centre Portugal).

Or visible ou invisible : influence sur le mode d'exploitation

Dans la grande majorité des filons de socles hercyniens, l'or natif est localisé dans du quartz, au sein de réseaux de microfissures, ou de zones recristallisées qui affectent des quartz d'origine précoce, ou encore dans des sulfures (inclusions, ou remplissage de microfissures). L'or combiné³ dans le réseau des sulfures arséniés (pyrite), ou sulfoarséniures (arsénopyrite), est associé à des stades spécifiques de cristallisation de ces sulfures, qui sont localisés soit au sein des veines de quartz, soit au sein des roches encaissantes.

La mise au point d'une méthodologie analytique pour caractériser la localisation, la teneur, et la distribution de l'or natif ou combiné a été réalisée dans les années 1987-1989. L'application d'analyse ponctuelle à la microsonde électronique, couplée à l'imagerie de la microscopie électronique à balayage⁴ a permis d'obtenir une répartition sommaire des teneurs fortes⁵ en or en fonction des zones de croissance, dans le cas de l'arsénopyrite. Ces tech-

niques ont ensuite été complétées par l'emploi de la microsonde ionique, qui est la seule technique permettant d'obtenir des images de répartition ionique à haute résolution spatiale (μm^2), et ainsi la cartographie de l'or dans les cristaux⁶. Cette approche a également été couplée à la spectrométrie Mössbauer qui permet de définir l'état de l'or (métallique ou combiné) à l'échelle d'une population de cristaux⁷.

Etat de l'or dans les minerais

La spectroscopie Mössbauer permet de connaître l'état de liaison de l'or dans les sulfures. Elle permet notamment de reconnaître si Au est présent à l'état métallique ou bien lié chimiquement à d'autres éléments⁸.

L'environnement atomique des atomes d'or est étudié par spectroscopie Mössbauer en utilisant

3. Probablement à l'arsenic (As) ; Marion, 1988.
 4. Boiron, 1987 ; Marion, 1988 ; Marcoux *et al.*, 1989 ; Johan *et al.*, 1989.
 5. Teneurs en or supérieures à 500 ppm environ.
 6. Cathelineau *et al.*, 1989 ; Marion *et al.*, 1991 ; Boiron *et al.*, 1993a.
 7. Marion *et al.*, 1986 ; Marion, 1988 ; Cathelineau *et al.*, 1989.
 8. Marion *et al.*, 1986 ; Wagner *et al.*, 1986.

^{197}Pt (obtenu par irradiation de ^{196}Pt métal) comme source de l'isotope ^{197}Au à l'état excité. Les spectres Mössbauer d'arsénopyrites du Châtelet et de Villeranges montrent un large pic d'absorption reproductible. Ce pic s'explique par l'existence d'une liaison Au-As qui peut être attribuée soit à de l'or en solution solide dans le réseau de l'arsénopyrite, soit à des inclusions solides d'or combiné de trop petite taille pour être détectées par les méthodes couramment utilisées.

Dans le cas de minerais mixtes où l'or natif et l'or combiné coexistent, les spectres Mössbauer montrent deux pics d'absorption typiques des deux états de l'or. Il est alors possible de calculer les quantités relatives des deux espèces d'or dans le minerai. La proportion d'argent allié à l'or peut être également calculée grâce à la variation de la position du pic relatif à l'or natif.

La spectrométrie Mössbauer permet donc de déterminer quantitativement, sur des produits naturels ou en cours de traitement, le rapport or natif/or combiné et d'estimer la proportion d'or lié, non directement cyanurable dans un minerai. Elle renseigne également sur la proportion d'argent dans les alliages Au-Ag. Par extension, cette méthode permet de suivre le comportement de l'or et sa

libération au cours des différentes phases de traitement. Elle permet également de connaître l'état du fer et de l'antimoine dans les minéraux et donne ainsi des indications sur la forme minéralogique de ces deux éléments dans les minerais ou dans les produits en cours de traitement.

Quatre types de distribution de l'or peuvent être distingués suivant leur caractère :

- l'or invisible, et généralement considéré comme réfractaire ;
 - or combiné seul dans des sulfures (gisements de type Châtelet-Villeranges) ;
 - or métallique de faible taille (< à quelques microns), peu visible même avec les moyens actuels d'investigation, et difficilement libérable⁹ ;
- l'or visible au moins partiellement, cyanurable, ou extractible par lavage ;
 - or mixte (gisement de type Laurières, mais à or métallique très dominant) ;
 - or à dominante métallique, sous forme de particules visibles (la plupart des gisements filoniens du Limousin et de la Galice).

L'or combiné dans les sulfures

L'arsénopyrite et, dans une moindre mesure, la pyrite sont les principaux minéraux aurifères observés dans de nombreuses minéralisations hydrothermales (gisements de la zone Marche-Combrailles, gisements de Sb/Au d'Australie, etc.). Les teneurs en or combiné dans l'arsénopyrite peuvent atteindre ponctuellement environ 1% (au Châtelet par exemple), mais la teneur moyenne de ce minéral est en général variable et comprise entre 1 et 2500 ppm (Salsigne : 12 ppm ; Le Bourneix : 40 ppm ; Villeranges : 800 à 1200 ppm ; Le Châtelet : 2000 ppm).

La distribution de l'or dans les cristaux d'arsénopyrite peut être abordée dans un premier temps grâce à l'observation au microscope électronique à balayage qui témoigne des variations chimiques en éléments majeurs (As et S) (fig. 4 et 5), corrélées aux teneurs en Au, et complétées par des analyses systématiques à la microsonde électronique, selon une grille d'analyse, par exemple de $3\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$. Les résultats ne sont significatifs que dans le cas d'arsénopyrites enrichies présentant des teneurs

Fig. 4
Arsénopyrite aurifère du Châtelet (Marche-Combrailles, Massif Central français). Zonation chimique du cristal montrant une fluctuation des contenus en As et S (image obtenue par observation au microscope électronique à balayage en électrons rétrodiffusés).

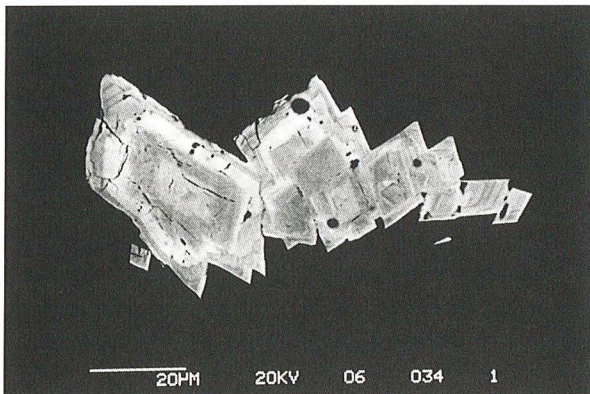
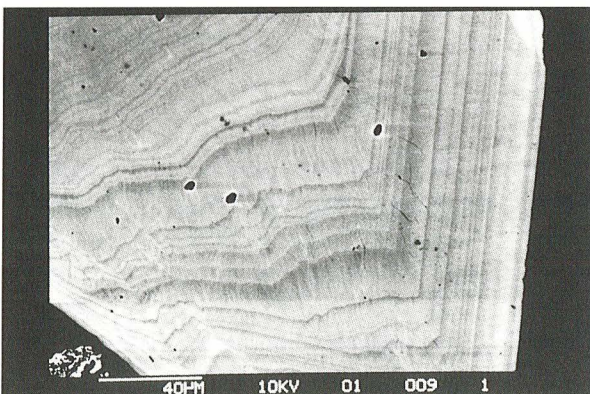


Fig. 5
Arsénopyrite aurifère de Villeranges (Marche-Combrailles, Massif Central français). Détail de la zonation chimique qui correspond aux zones de croissance du cristal (image obtenue par observation au microscope électronique à balayage en électrons rétrodiffusés).



9. Maille de libération inaccessible à des traitements rudimentaires ; or non extractible par méthode mécanique (lavages), cyanurable mais incomplètement en raison de l'inaccessibilité des particules (cas de certains minerais de Salsigne).

supérieures à 500 ppm, et pour des répartitions régulières de l'or dans les cristaux. Cette approche est cependant très utile à la reconnaissance des grains enrichis.

Pour obtenir une image fine de la répartition de l'or, surtout dans le cas de teneurs en Au plus basses que les teneurs limites de détection de la sonde électronique, les images de répartition de l'or sont obtenues par analyse à la microsonde ionique¹⁰. La stabilité du champ magnétique d'environ 10⁻⁵ permet une discrimination parfaite de la masse de l'or, et la limite de détection de l'or est de l'ordre du ppm.

Les images ioniques de Au et de Sb montrent que l'or peut être réparti de différentes manières dans les cristaux d'arsénopyrite :

- distribution d'Or homogène suivant les zones de croissance et fortement anticorrelée avec celle de Sb ;
- distribution hétérogène avec d'importants enrichissements à la périphérie du cristal qui peuvent être interprétés comme relatifs à la dernière zone de croissance, ou comme une surcroissance tardive, ou encore comme des enrichissements hétérogènes le long de fractures isolées ou de réseaux complexes de microfractures. Dans ce dernier cas, la distribution suggère une invasion ou un remplacement du premier cristal par une arsénopyrite tardive riche en Au-As.

L'examen d'arsénopyrites de nombreux gisements français, de Galice (Espagne) ou du Portugal a montré que la plupart des enrichissements en or combiné significatifs sont généralement associés à des surcroissances tardives, comme à Laurières¹¹, au Châtelet et à Villeranges dans le Massif Central¹², à Montemor et à França au Portugal¹³ et à Tomino en Galice¹⁴. Cette association est à mettre en relation avec une introduction relativement tardive de l'or dans la formation des veines de quartz aurifère¹⁵.

Genèse des concentrations : théories anciennes et nouvelles

Théories anciennes

Les différents types de gisements

Les minéralisations se sont exprimées de manière différente au cours des temps géologiques selon

les types de roches et les contextes géodynamiques. Une importante partie de la production mondiale d'or provient des gisements de type placer associés aux terrains protérozoïques d'Afrique du Sud (bassin du Witwatersrand et district de Barbenton). Si dans ces gisements une partie non négligeable des sulfures, de l'uraninite (exploitée pour l'U) et de l'or semble détritique, une partie de l'or est probablement redistribuée lors de phases tardives de circulation de fluides syn- à tardi- métamorphiques dans le bassin¹⁶.

Les principales époques métallogéniques aurifères à l'origine de filons de quartz aurifère sont surtout associées à des percolations de fluides dans des veines formées lors de phases de métamorphisme rétrograde (archéen, panafricain, hercynien, alpin) ou liées à des flux de chaleur en relation avec des phases de volcanisme (gîtes épithermaux s.l.).

Les veines de quartz des socles métamorphisés les plus connus sont celles de l'archéen du Canada (district de Val d'Or, Noranda, Timmins, Yellowknife) et d'Australie (Kalgoorlie, Wiluna). Pour les stades tardi-hercyniens, il faut citer les gisements d'Europe de l'Ouest décrits notamment dans cette publication (Salsigne, Le Châtelet-Villeranges, Bourneix-Laurières, La Bellière en France), ceux de la Péninsule Ibérique, et ceux du massif de Bohême.

Au Mésozoïque, les minéralisations aurifères ont été observées dans les séries carbonatées, notamment en Californie avec les filons de type *Mother Lode*. De l'or est également associé aux porphyres cuprifères, où il y constitue un sous-produit. Ces gîtes (nord-ouest des Etats-Unis) se sont mis en place à la fin du Mésozoïque et au début de l'ère Cénozoïque.

Au Cénozoïque, de nombreux gîtes sont associés au volcanisme calco-alcalin des chaînes tertiaires et sont de type filonien ou de type porphyre-cuprifère à Au. On les trouve dans les cordillères américaines, la ceinture circum-pacifique (Japon, Philippines) et dans la chaîne alpine (Europe centrale, Espagne). Le potentiel aurifère de ces types de gisement est non négligeable.

10. Cameca IMS 3F et 5F équipée d'un photomultiplicateur de haute sensibilité.

11. Essarraj, 1992.

12. Boiron, 1987 ; Cathelineau *et al.*, 1989.

13. Cathelineau *et al.*, 1993a ; Mateus, 1995.

14. Cathelineau *et al.*, 1993a.

15. Cathelineau *et al.*, 1991.

Théories anciennes de formation des veines aurifères

L'or est connu depuis l'Antiquité en Europe, surtout en placers anciens (Las Médulas en Espagne, par exemple, site exploité par les Romains) et en placers récents (rivières) qui constituent la seule source d'or mentionnée par la plupart des auteurs au XVIIIe et au XIXe siècle. L'or filonien est connu en Hongrie et en Transylvanie, mais pas en France où le seul gisement signalé reste celui de La Gardette (Isère) jusque vers 1890¹⁷. Cette mine est considérée comme "peu abondante" et a fait l'objet de tentatives épisodiques d'exploitation entre 1700 et 1840¹⁸.

La perte de la connaissance et de la description des districts aurifères primaires européens, entre l'Antiquité (Diodore de Sicile, Strabon, Pline) et la période moderne, est probablement en partie à l'origine de la relative pauvreté des théories de formation des gisements dans la littérature scientifique ancienne. Les concepts métallogéniques sont par ailleurs tardifs dans l'histoire de la géologie. Mises à part les théories balbutiantes de Werner (1802) sur la formation des filons, il faut en effet attendre Daubrée (1893) pour des concepts généraux quant au transport d'éléments métalliques par les fluides souterrains. De Launay (1913) donne une synthèse détaillée de la connaissance des gîtes filoniens ouest-européens, mais surtout une réflexion sur la genèse des filons. Pour ce dernier, l'or a une relation spatiale et génétique avec les magmas ignés. La notion de zonalité des métaux autour des plutons (Sn, W, Bi, Cu, Sb, Pb, Ag, Hg par exemple selon les types de roches ignées) est émise, l'or se plaçant entre Sn, W et Cu. A Salsigne par exemple, deux phases de minéralisation¹⁹ sont évoquées par Routhier (1963) qui les associe, comme de Launay, au magmatisme tardi-hercynien.

Le concept de "maturation des shear zones aurifères" : une discussion

Bonnemaison et Marcoux²⁰ présentent un modèle de maturation de *shear zone* aurifères caractérisé par plusieurs stades où l'or se manifeste sous différentes formes : un stade précoce à or invisible, un stade intermédiaire à or fin, et un stade tardif à or pépitique. Les concentrations économiques seraient associées aux deux derniers stades et en relation avec des processus de "maturation" de la préconcentration à or invisible.

Ce concept de maturation des *shear zones* aurifères est ainsi basé sur l'hypothèse d'une précon-

centration d'or dans les sulfures précoces et la libération de cet or lors des phases plus tardives. Cependant, cette hypothèse de base ne semble pas être vérifiée. La seule occurrence connue de sulfures précoces (pyrrhotite aurifère) a été signalée dans un indice aurifère peu significatif du Massif Central français²¹, pour lequel il n'existe pas de données de spectroscopie Mössbauer démontrant que l'or est présent dans le réseau de la pyrrhotite.

Absence de préconcentration : les données acquises sur des pyrites, pyrrhotites ou arsénopyrites montrent qu'il n'y a pas de préconcentrations précoces d'or, ce qui est en désaccord avec le concept de maturation. Des fractions pures de minéraux séparés de pyrite précoce, pyrrhotite (chaque échantillon contenant environ 50 mg de matière) de la zone de Villeranges-Châtelet ont par exemple été analysées par absorption atomique à four de graphite²². Les résultats indiquent que les pyrrhotites fraîches sans aucune altération ni remplacement présentent un contenu en or inférieur à 100 ppb. De tels minéraux sont fréquemment rencontrés dans des filonnets à proximité des gisements à une dizaine, voire une centaine de mètres des minéralisations. Ils sont communs mais leur abondance est toujours faible. Ils sont antérieurs au stade à arsénopyrite et sont localement remplacés par l'assemblage pyrite-marcassite quand ils sont recoupés par un filonnet à arsénopyrite. De plus, la pyrrhotite est, d'un point de vue volumétrique, mineure comparée à l'arsénopyrite aurifère et il paraît donc peu probable que les sulfures précoces puissent contribuer significativement aux concentrations des filons.

L'arsénopyrite aurifère, lorsqu'elle est présente, n'apparaît pas comme un précurseur des minéralisations aurifères, mais comme un dépôt, souvent peu significatif, et tardif par rapport au dépôt de l'essentiel de l'arsénopyrite. A Villeranges, le dépôt d'arsénopyrite aurifère, qui est majoritaire, a lieu lors du dernier stade (stade 3) de l'évolution globale des zones aurifères et ne donne lieu à aucune libération d'or natif (or métallique absent). A Laurières, les arsénopyrites et boulangérites aurifères cristallisent lors du stade 2 et sont dépourvues de toute altération.

16. Meyer *et al.*, 1991.

17. Fuchs, de Launay, 1893.

18. Haüy, 1801.

19. D'abord W, As, Au, Bi ; ensuite S, Cu, Ag séparées par un déplacement du centre chaud vers l'ouest.

20. Bonnemaison, Marcoux, 1987 ; Bonnemaison, Marcoux, 1989.

21. Picot, Marcoux, 1987.

Absence de remobilisation de l'or à partir des arsénopyrites aurifères : l'or peut être piégé relativement facilement dans les arsénopyrites et dans les pyrites à l'état combiné, probablement dans le réseau cristallin²³ dans des conditions variables. Il existe deux exemples majeurs d'arsénopyrites aurifères dans le Massif Central : Lauriéras²⁴ (fluides à $\text{CO}_2 - \text{CH}_4 - \text{H}_2\text{O}$, 300°C , 0,8 kbar) et Le Châtelet-Villeranges²⁵ (fluides aqueux, 200°C , 0,5 kbar). Dans chacun des cas, l'or est incorporé dans les dernières zones de croissance et ne semble pas ensuite libéré du réseau.

Le modèle de valve sismique

Ce modèle a été proposé par Sibson R.H., Robert F. et Poulsen K.H. en 1988²⁶. Il a été repris pour décrire les veines aurifères archéennes du Canada, notamment celles du district du Val d'Or²⁷. Ces chercheurs supposent que des surpressions fluides peuvent se développer sous des zones imperméables dans des niveaux crustaux relativement profonds (6 à 15 km). Dans le cas des gisements du Canada, la déformation provoque la formation de grandes discontinuités (failles inverses de plusieurs kilomètres de longueur) qui peuvent constituer des drains pour les fluides profonds. Les surpressions de fluides engendrent différentes structures, et lorsqu'elles atteignent des maxima²⁸, une fracturation

de type sismique est observée. Lors de la fracturation, la pression chute, ce qui engendre un colmatage de la faille (sursaturation vis-à-vis du quartz) jusqu'à l'épisode suivant. La chute de pression favorise aussi des processus d'ébullition des fluides²⁹, ce qui peut conduire au dépôt de l'or. Si ce modèle est structuralement et thermodynamiquement plausible, il reste à valider dans la plupart des cas. Il a probablement été trop souvent invoqué, comme le modèle précédent, sans vérification élémentaire, notamment du synchronisme entre l'acquisition des structures (drains), la précipitation du quartz, la nature des fluides percolants et le dépôt de l'or.

Modèle proposé pour les gisements d'Europe de l'Ouest

La recherche systématique d'arguments pour relier, dans l'espace et dans le temps, les stades de percolation de fluides, les stades de déformation et les stades de dépôt des métaux a conduit progressivement à remettre en question les modèles antérieurs.

22. Boiron *et al.*, 1989.

23. Wagner *et al.*, 1986 ; Marion *et al.*, 1988 ; Cathelineau *et al.*, 1989.

24. Wu, 1989 ; Essarraj, 1989 ; Essarraj, 1992.

25. Boiron, 1987 ; Boiron *et al.*, 1989 ; Boiron *et al.*, 1990.

26. Sibson *et al.*, 1988.

27. Robert, Brown, 1986 ; Boullier, Robert, 1992.

28. Pressions supérieures à la pression exercée par la colonne de roche (pression supralithostatique).

29. Séparation des phases volatiles (CO_2).

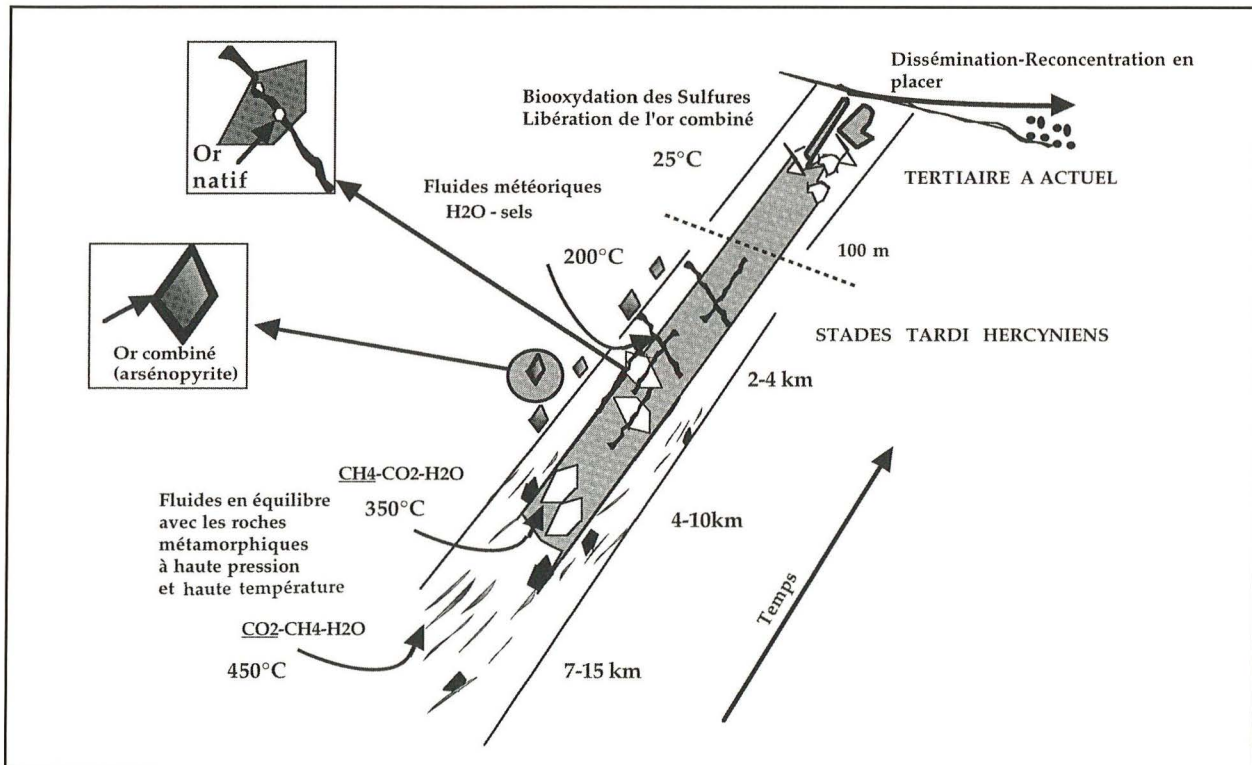


Fig. 6

Schéma représentatif des grandes étapes de formation d'une veine de quartz aurifère tardi-hercynienne avec indication des types de fluides, des températures et des profondeurs de formation.

Les travaux récents réalisés sur les gisements d'Europe de l'Ouest³⁰ (en Limousin, à Salsigne et en Galice) ont permis de proposer un modèle de formation des gisements à teneur économique qui résulte d'une superposition de plusieurs stades de percolations fluides dans les mêmes structures tectoniques. Trois stades successifs ont été reconnus pour la formation des veines de quartz aurifère. Chacun des stades est caractérisé par ses propres conditions de pression et de température, ses assemblages minéraux, la composition des fluides et l'état de déformation (en relation avec le régime de circulation fluide) (fig. 6).

Fig. 7

Inclusion fluide observée dans le quartz contemporain du stade intermédiaire antérieur à l'arsénopyrite tardive et à l'or natif. Cette inclusion est triphasée et contient du CO₂ liquide, du CO₂ gaz et solution (H₂O+NaCl). Gisement de Corcoesto (Galice, Espagne). Observation au microscope optique (1 cm = 12 μm).



Stade précoce : formation des veines de quartz

Les veines et les filonnets de quartz laiteux se sont formés après la mise en place des granites peralumineux (probablement Westphalien). Ils sont également postérieurs à certaines altérations subsolides affectant ces granites³¹. L'altération diffuse et la cristallisation de sulfures (pyrite non déformée, puis arsénopyrite stérile) dans les roches encaissantes semblent précéder le dépôt massif du quartz laiteux dans les fractures ouvertes³². Au Bourneix, un évènement cisailant conduisant à la formation des "mylonites noires"³³ est apparemment intercalé entre le dépôt des sulfures et celui du quartz. Cependant, aucune vraie mylonite ne se développe dans l'encaissant des veines de quartz. Ces caractéristiques sont en désaccord avec celles des zones de cisaillement typiques tardi-varisques telle que la zone Marche-Combrailles³⁴.

En Galice (Tomino, Corcoesto) ou dans le massif de Bohême (Mokrsko-Celina), un réseau de fentes de tension à remplissage quartzeux de puissance centimétrique à décimétrique se développe dans l'encaissant granitique. Ce réseau de veines de quartz constitue le piège de la minéralisation aurifère.

À ce stade caractérisé par la cristallisation de quartz laiteux qui constitue l'essentiel de la masse quartzreuse, piège des minéralisations, seules pyrite et arsénopyrite stériles sont observées. Bien que les relations texturales soient masquées par des remobilisations tardives, il semble que la plupart des sulfures soient incorporés dans les veines de quartz à partir de l'encaissant silicifié. Il n'y a pas d'évidence de dépôt d'or à ce stade, même à des concentrations faibles dans les sulfures.

Des fluides précoces à C-H-O-(N) d'origine métamorphique ont été observés dans l'encaissant des veines de quartz blanc laiteux, et en rares reliques dans le quartz lui-même. Ce sont des fluides denses piégés sous forme d'inclusion fluide (fig. 7) à des pressions supérieures à 1 kbar (fréquemment dans la gamme 2-4 kbar) et à des températures variant de 350 à 450 °C. Ces conditions sont très similaires à celles observées lors des derniers stades métamorphiques affectant les terrains varisques pendant ou juste après le stade d'hyper-collision.

Stade intermédiaire : dépôt précoce d'or

Les veines de quartz laiteux subissent d'importantes modifications suite à des réactivations tectoniques successives. Les phases de bréchification engendrent la formation de quartz microcristallin, à Laurières par exemple³⁵, qui constitue le ciment des brèches conduisant à la formation de lentilles de quartz massif. Les pyrites et les arsénopyrites précoces sont bréchifiées.

Les lentilles de quartz sont soumises à une intense fracturation, avec une alternance de formation de microfractures, de cicatrisation par des surcroissances de quartz hyalin (fig. 8) et de mise en place d'une seconde génération de pyrite et d'arsénopyrite. À ce stade, l'or combiné est observé dans les sulfures notamment dans l'arsénopyrite ou dans la boulangérite³⁶. Leur contenu est toujours relativement bas. L'or combiné est relativement rare et seulement connu à ce stade dans le gisement de Laurières. Il s'observe en surcroissance sur les cœurs stériles d'arsénopyrites précoces (dans l'encaissant et les lentilles de quartz massif).

30. Boiron *et al.*, 1989, 1990, 1992 et 1993b ; Cathelineau *et al.*, 1989, 1993a et 1993b ; Essarraj, 1992.

31. Gréseimisation en Galice, albitisation et dissolution du quartz en Limousin.

32. Exemple de Laurières ; Essarraj, 1992.

33. Bouchot *et al.*, 1989.

34. Quenardel *et al.*, 1984 ; Lespinasse *et al.*, 1986.

35. Hubert, 1986 ; Bonnemaïson, 1987.

36. Comme à Laurières ; Essarraj, 1992.

Les fluides responsables de la formation des filonnets de quartz hyalin appartiennent au système C-H-O-(N) et sont très similaires à ceux du premier stade. Cependant, ils sont de plus en plus dilués et moins denses. Le contenu en CH₄ est plus élevé, notamment dans les gisements de la Péninsule Ibérique³⁷. Les compositions de ces fluides témoignent de processus de dilution qui s'accompagnent d'une rupture de l'équilibre fluide-graphite et engendrent des modifications dans les conditions d'oxydo-réduction du système. Ces fluides sont piégés dans des conditions de pression et de température intermédiaires ($P \approx 1-2$ kbar et $T : 250-400^\circ\text{C}$) selon les localités. Les alternances de variations de perméabilité des veines de quartz, du fait des épisodes de fracturation, reflètent d'importantes fluctuations de pressions qui s'observent d'une veine à l'autre ou au sein d'une même veine.

Stades tardifs à minéralisation économique

Une nouvelle réactivation tectonique (fréquemment sous un régime compressif associé à de nouvelles directions spécifiques des contraintes) sous des conditions différentes de pression et de température conduit au stade majeur de dépôt de l'or. Deux stades peuvent être distingués :

- la réactivation des veines de quartz précoces (stades 1 et 2), qui génère des microfissures cicatrisées mais ne sont pas scellées par du quartz. L'or natif cristallise avec les sulfures et sulfosels (Pb, Ag et Bi dominant) le long de ces fissures, et plus particulièrement lorsqu'elles recoupent les premiers sulfures. A ce stade, la plupart des reliques d'encastement sont altérées en un assemblage quartz-mica blanc. Dans ce cas, il est difficile de déterminer si l'or natif résulte entièrement d'un nouvel apport dans la structure, ou du remaniement partiel de concentrations précoces en de nouveaux assemblages minéraux. L'apport d'or semble cependant évident dans la majorité des cas.
- des systèmes faillés nouvellement formés, sans aucune relation avec les veines de quartz précoces. C'est le cas de la zone faillée de Villeranges observée dans les tufs rhyodacitiques viséens. L'or est déposé à l'état combiné dans l'arsénopyrite (et la pyrite) pendant un unique événement épithermal³⁸. Dans ce cas, l'assemblage minéralogique (quartz - ankérite - arsénopyrite aurifère - pyrite \pm aurifère) cristallise rapidement, constituant un réseau de microfilonnets dans les tufs, et est accompagné d'une importante altération à illite des tufs (fig. 9).

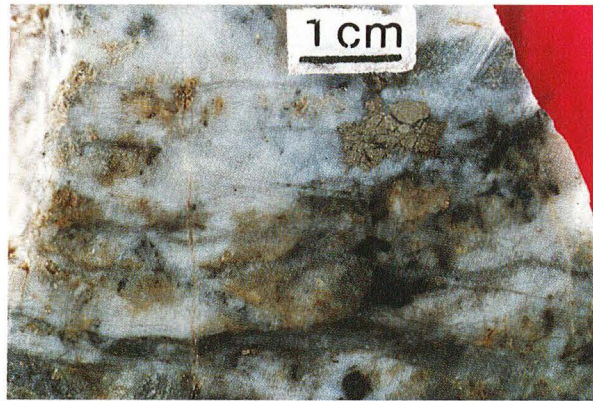


Fig. 8
Aspect macroscopique d'une veine de quartz aurifère, avec des filonnets de quartz tardif à arsénopyrite aurifère, recoupant les sulfures (pyrite) précoces, (Laurièras, Massif Central français).

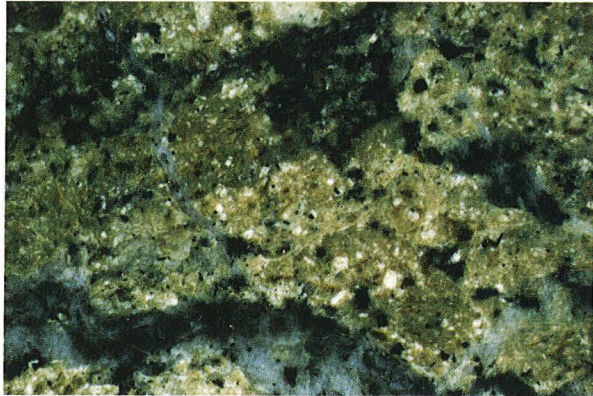


Fig. 9
Aspect macroscopique d'un tuff minéralisé. Arsénopyrite et pyrite sont disséminées dans la roche altérée et dans un réseau de microfilonnets de quartz et carbonate (Villeranges, Marche-Combrailles, Massif Central français) (1cm = 5mm).

Les fluides associés au dépôt de l'or économique sont aqueux, présentent de relativement faibles salinités et sont piégés dans un domaine de basse température ($150-250^\circ\text{C}$), à des pressions de type hydrostatique ($\approx 0,5$ kbar). Ils sont ubiquistes, sont rencontrés dans tous les gisements, mais leur importance a été largement sous-estimée³⁹.

Principales évolutions caractérisant la formation des veines aurifères

L'apparence successive des trois stades décrits reflète une série de changements majeurs qui peuvent être corrélés à l'évolution de la chaîne varisque. Ce sont des modifications :

- de la composition chimique globale des fluides : depuis des fluides précoces (C-H-O-N) d'origine métamorphique jusqu'à des fluides tardifs, aqueux, probablement en relation avec la circulation générale de fluides météoriques affectant le substratum à la fin de l'orogénèse varisque.
- des conditions de pression et de température : depuis les premiers stades de dépôt des sulfures au

37. Boiron *et al.*, 1993b.

38. Boiron, 1987 ; Boiron *et al.*, 1989.

39. Boiron *et al.*, 1990.

sein des veines de quartz, sous des pressions lithostatiques et des températures relativement hautes (niveaux structuraux relativement profonds), jusqu'à des conditions hydrothermales typiques de système géothermal, avec des températures basses (150-300°C) et des pressions hydrostatiques (niveaux superficiels).

- des facteurs contrôlant les migrations fluides. La nature des migrations fluides et la géométrie des anomalies thermiques changent à chaque stade. Cependant, ces changements sont pour la plupart associés aux différences de niveau structural considéré. Ainsi, le troisième stade est caractérisé par des anomalies thermiques linéaires, limitées aux structures crustales profondes (zone de cisaillement Marche-Combrailles), alors que les premiers stades concernent des zones plus étendues avec des flux de chaleur superficiels anormaux qui peuvent être en relation avec des événements affectant les niveaux crustaux plus profonds (dernières phases magmatiques hercyniennes). Enfin, les événements successifs enregistrés dans les zones minéralisées à longue histoire reflètent le soulèvement progressif d'un segment de la chaîne varisque à la fin de son stade d'hyper-collision, alors que les anomalies thermiques (315-285 Ma) persistent en profondeur.

Principaux facteurs contrôlant la formation de concentrations économiques

Deux facteurs à l'action complémentaire sont reconnus :

Facteur structural : des stades de microfracturation intenses des premières veines de quartz sont dus aux événements tardifs de déformation cassante. Une telle microfracturation est extrêmement complexe dans le détail et résulte de la superposition de chaque stade de déformation cassante sur la matrice de quartz précoce (quartz laiteux cimenté par le quartz microcristallin).

Des hétérogénéités rhéologiques apparaissent, telles que celles produites par la présence de lentilles de quartz métriques dans les micaschistes. Une modélisation par éléments finis⁴⁰ a montré que les intensités de contraintes sont plus élevées au centre des veines de quartz et à proximité des bordures. Ceci explique une plus intense fracturation de la veine comparée à l'encaissant et l'absence de minéralisation hors de la veine de quartz. La matrice de quartz précoce (quartz laiteux cimenté par le quartz microcristallin) acquiert donc sa per-

méabilité à la faveur de réactivations des contraintes, qui conduisent à des flux de fluides plus élevés au sein des veines que dans l'encaissant. Ce processus explique que l'introduction de l'or soit tardive, seules les veines de quartz sont minéralisées.

Facteur minéralogique : les sulfures précoces, même en faible quantité, sont considérés comme support de la nucléation des particules d'or. Les premiers sulfures sont fréquemment minéralisés quand ils sont affectés par une microfissuration tardive. Des processus électrochimiques à la surface des sulfures microfissurés sont probablement la cause de la précipitation de l'or comme l'ont montré les travaux expérimentaux⁴¹. La précipitation de l'or résulte de processus d'adsorption (physiosorption) suivis par des processus de réduction (chemiosorption) à la surface des sulfures. Les meilleurs sites où s'observent de tels phénomènes sont les zones à plus forte densité de charge électronique et de meilleure conductivité. Elles sont localisées là où les liaisons chimiques de surface sont interrompues (surface des fractures par exemple).

Libération de l'or en milieu supergène

La découverte de pyrite à or combiné⁴² montre que les porteurs précoces à faible concentration d'or (quelques dizaines de ppm à quelques centaines) peuvent aussi jouer un rôle important dans la formation de certaines concentrations. La libération de l'or combiné en or natif sous l'effet de l'oxydation bactérienne des sulfures (zones de subsurface) peut être en effet à l'origine d'une élévation de teneurs dans la partie oxydée des gisements. Cette zone relativement superficielle est par ailleurs la seule exploitée par les travaux anciens (facilité de broyage due à l'altération superficielle, zone au dessus des nappes, teneurs plus élevées).

Conclusions

L'ensemble des études réalisées sur les gisements aurifères de l'Europe de l'Ouest ont permis de montrer les faits suivants :

- Les zones aurifères de l'Europe de l'Ouest (Salsigne, Limousin, Marche-Combrailles en France, Galice en Espagne et au Portugal) et de l'Europe centrale (Mokrsko en République Tchèque) se caracté-

40. Lespinasse, 1990.

41. Möller, 1993 ; Möller, Kersten, 1994.

42. Marion *et al.*, 1991.

térisent par l'importance du polyphasage des circulations de fluides dans des zones fracturées, entraînant des séries de dépôts : paragenèses à sulfures précoces (pyrite-arsénopyrite), puis à sulfures-sulfosels-or natif. Ces dépôts se réalisent au cours de différents stades de l'évolution pression-température affectant les socles hercyniens à la fin de l'orogénèse hercynienne (290-310 Ma) avec la participation de fluides du métamorphisme rétrograde ⁴³ ($P \approx 0,7-2$ kbar, $T \approx 300-350$ °C), puis météorique de plus faible température ⁴⁴ (tous les gisements, 200 ± 50 °C, pressions hydrostatiques).

Ces minéralisations présentent des caractéristiques géométriques et minéralogiques très semblables à celles de la plupart des minéralisations aurifères filoniennes à fort potentiel économique, dont la genèse est interprétée comme liée aux percolations de fluides "métamorphiques" souvent riches en CO₂, lors de stades tardi-orogéniques : archéen (Australie, Canada), panafricain (Afrique), alpin (Alpes, Colombie britannique, de type "Mesothermal lode veins").

Cependant, les travaux récents ont montré que les conditions de dépôt de la minéralisation aurifère économique se rapprochent plus de celles des minéralisations disséminées associées de manière directe ou indirecte à des activités volcaniques (type "épithermal" s.l.) ou magmatiques, qui constituent un autre type important de gisement dans le monde. Dans ces conditions, l'or est fréquemment déposé soit à l'état combiné soit à l'état natif. En Galice par contre, l'or est transporté à partir de fluides aqueux, à caractère oxydant et d'origine superficielle, et l'or natif déposé grâce à des processus électrochimiques à la surface des sulfures microfissurés d'origine précoce dans des conditions de moyenne température (150-220 °C) et basse pression ⁴⁵. Dans la zone Marche-Combrailles, l'or est déposé à l'état combiné dans les sulfures (arsénopyrite, pyrite), dans des conditions analogues aux systèmes épithermaux ⁴⁶.

• Il n'y pas d'évidence claire de préconcentration de l'or en relation avec les stades précoces ou intermédiaires, antérieurs ou contemporains de la formation polyphasée des veines de quartz (quartz blanc laiteux, quartz microcristallin). Le dépôt de l'or est, dans la majorité des cas, relativement tardif et associé aux stades de déformation cassante des veines de quartz précoces. Aucun précurseur n'a été rencontré. L'or peut être piégé à l'état combiné dans des conditions variées, mais de manière tardi-

ve et jamais libéré du réseau. Cependant les sulfures précoces peuvent avoir un rôle de support pour la nucléation des particules d'or.

• Les zones faillées minéralisées ne sont pas typiques des grandes zones de cisaillement. Les zones de cisaillement majeures hercyniennes sont stériles. Les déformations ductiles précoces dues au cisaillement sont mineures le long des zones faillées, minéralisées dans la plupart des cas. Les minéralisations économiques sont dues à d'importantes hétérogénéités rhéologiques, telles que celles produites par la présence de lentilles métriques de quartz au sein des micaschistes, et à l'importante microfracturation des quartz précoces du fait des stades tardifs de déformation cassante.

• Le facteur majeur pour la préparation des zones faillées à la minéralisation est l'importante fracturation. Toutes les concentrations économiques se sont formées durant les stades tardifs de déformation cassante ⁴⁷. Les stades ductiles semblent totalement indépendants des processus minéralisateurs. C'est pourquoi une "maturation structurale" du quartz est nécessaire pour obtenir la perméabilité souhaitée. Ce processus de maturation est valide en Europe de l'Ouest (Laurières : Massif Central français, Tomino : Galice, Espagne) et en Amérique du Nord (Erickson, Colombie britannique), mais ne peut pas être étendu à toutes les veines de quartz où l'augmentation de la perméabilité peut résulter de processus différents ⁴⁸.

Le début des processus de formation de la matrice quartzreuse se situe à la transition entre les conditions ductiles et les conditions fragiles. Une longue évolution des zones de quartz faillées est nécessaire afin d'obtenir des concentrations économiques. La minéralisation économique ne résulte pas d'une remobilisation de préconcentrations, sauf dans le cas des minéralisations des zones d'oxydation ou des placers alluvionnaires.

• Plusieurs types de gisements sont distingués : 1) minéralisations à or combiné dominant qui n'ont pu être trouvés et exploités que lorsque l'identification et le traitement (grillage) de tels minerais a été

43. Par exemple à Cros Gallet (Hubert, 1986), à Laurières (Essarraj, 1992) et à Salsigne (Cathelineau *et al.*, 1993b).

44. Boiron *et al.*, 1990 ; Boiron *et al.*, 1993b ; Boiron *et al.*, 1996.

45. Boiron *et al.*, 1993b ; Boiron *et al.*, 1996.

46. Boiron, 1987.

47. Cathelineau *et al.*, 1991.

48. Effet de la schistosité (Zouhair, 1992), ou modèle de "valve sismique" (Boullier, Robert, 1992).

possible ; 2) minéralisations à or mixte , où l'or natif est dominant, et l'or réfractaire exploité ou non suivant les techniques de traitement ; 3) minéralisation à or natif dominant, sous forme de particules soit de faible taille (< quelques microns) non exploitable par des techniques rudimentaires (Salsigne, par exemple), soit de taille plus importante (gisements filoniens de Galice, du Limousin ; concentrations de type placer).

Remerciements : Les auteurs tiennent à remercier Total Compagnie Minière, COGEMA et la Société des Mines du Bourneix, Rio Tinto Minera S.A., l'ITGE (Madrid) et l'IGM (Porto) pour leur assistance scientifique et technique lors des missions de terrain et des nombreuses discussions. Ce travail a été supporté par la Communauté Européenne grâce au contrat MA2M-CT90-033 "Multidisciplinary studies of Au- vein formation : Application to the western part of the hesperian massif (Spain-Portugal)". Les auteurs remercient P. Marion, P. Holliger, Y. Gao pour leur aide lors de l'acquisition des données en spectroscopie Mössbauer et en microsonde ionique. Les auteurs sont particulièrement reconnaissants aux étudiants de l'équipe "Interactions fluides-minéraux" du CREGU, S. Essarraj, A. El Jarray, A. Barakat ainsi qu'à C. Marignac (Ecole des Mines, Nancy) qui ont largement contribué depuis plusieurs années au dynamisme de la métallogénie de l'or à Nancy.

Bibliographie

- Boiron, 1987 : Boiron M.C., *Minéralisations à Au, As, Sb, altérations hydrothermales et fluides associés dans le bassin de Villeranges (Combrailles, Massif Central français)*, Geol. Geochim. Uranium Mem., Nancy, 15, 1987, 310 p.
- Boiron et al., 1989 : Boiron M.C., Cathelineau M., Trescases J.J., Conditions of gold-bearing arsenopyrite crystallization in the Villeranges basin, Marche-Combrailles shear zone, France. A mineralogical and fluid inclusion study. *Econ. Geol.*, 84, 1989, p.1340-1362.
- Boiron et al., 1990 : Boiron M.C., Cathelineau M., Dubessy J., Bastoul A.M., Fluids in Hercynian Au-veins from the french variscan belt, *Min. Mag.*, 54, 1990, p.231-243.
- Boiron et al., 1992 : Boiron M.C., Essarraj S., Sellier E., Cathelineau M., Lespinasse M., Poty B., Geometric and genetic relationships between cathodoluminescent microstructural domains in quartz and fluid inclusions : application to the reconstruction of Au-ore fluid chronology, *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 56, 1992, p.175-185.
- Boiron et al., 1993a : Boiron M.C., Cathelineau M., Gao Y., Holliger P., Marion P., New improvements in the in-situ analysis and mapping of combined gold in sulphides at the ppm level, *Proceeding of the IX SIMS*, Yokohama, Japon, 1993, 4 p.
- Boiron et al., 1993b : Boiron M.C., Essarraj S., Barakat A., Castroviejo R., Cathelineau M., Noronha F., Nogueira P., Yardley B., Banks D., Marignac C., Pereira E., Urbano R., Florido P., Garcia Palomero F., P-V-T-X changes throughout the formation of intragranitic Au concentrations in the Northwestern Iberian massif (Spain-Portugal) : an integrated fluid inclusion study, *Proceedings of the second biennial SGA meeting "Current research in geology applied to ore deposits"*, Grenade, 1993, p.605-608.
- Boiron et al., 1996 : Boiron M. C., Cathelineau M., Banks D., Yardley B., Noronha F., Miller M., P-T-X conditions of late Hercynian fluid penetration at the origin of granite-hosted quartz veins in north-western Iberia : a multidisciplinary study of fluid inclusion and their chemistry, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60, 1996, p.43-57.
- Bonnemaison, 1987 : Bonnemaison M., *Les concentrations aurifères dans les zones de cisaillement, métallogénie et prospection*, Thèse, Univ.Toulouse, 1987.
- Bonnemaison, Marcoux, 1987 : Bonnemaison M., Marcoux E., Les zones de cisaillement aurifères du socle hercynien français, *Chron. Rech. Min.*, 478, 1987, p.29-42.
- Bonnemaison, Marcoux, 1989 : Bonnemaison M., Marcoux E., Auriferous mineralization in some shear zones : a three stage model of metallogenesis, *Mineral. Deposita*, 25, 1989, p.96-104.
- Bouchot et al., 1989 : Bouchot V., Gros Y., Bonnemaison M., Structural controls on the auriferous shear zones of the Saint Yrieix district, Massif Central, France : evidence from the Le Bourneix and Laurieras gold deposits, *Econ. Geol.*, 84, 1989, p.1315-1327.

- Boullier, Robert, 1992 : Boullier A.M., Robert F., Paleoseismic events recorded in Archean gold-quartz vein network, Val d'Or Abitibi, Québec, *J. Struct. Geol.*, 14, 1992, p.161-179
- Cathelineau et al., 1989 : Cathelineau M., Boiron M.C., Holliger P., Marion P., Denis M., Gold-rich arsenopyrite : crystal chemistry, gold location and state, physical chemical conditions of crystallization, *Econ. Geol. Monograph* 6, "The geology of gold deposits : the perspective in 1988", 1989, p.328-341.
- Cathelineau et al., 1991 : Cathelineau M., Boiron M.C., Poty B., Marignac C., Hercynian gold bearing quartz veins from western Europe : the "shear zone model" revisited, *Proceedings of Gold 91*, Brésil, A.A. Balkema Pub., 1991, p.115-119.
- Cathelineau et al., 1993a : Cathelineau M., Boiron M.C., Garcia Palomero F., Urbano R., Florido F., Pereira E.S., Noronha F., Barriga F., Mateus A., Yardley B., Banks D., Multidisciplinary studies of Au-vein formation : application to the western part of the hesperian massif (Spain-Portugal), *Final report, EEC project MA2M-CT90-0033*, 1993, 391 p.
- Cathelineau et al., 1993b : Cathelineau M., Boiron M.C., Essarraj S., Dubessy J., Lespinasse M., Poty B., Fluid pressure variations in relation to multistage deformation and uplift : a fluid inclusion study of Au-quartz veins, *Eur. J. Mineral.*, 5, 1993, p.107-121.
- Daubrée, 1887 : Daubrée A., *Les eaux souterraines aux époques anciennes*, Dunod éd. Paris, 1887, 443 p.
- Essarraj, 1989 : *Microfracturation et circulation fluide dans les filons de quartz aurifère : exemple du gisement de Laurières (Massif Central)*, DEA, Univ. Nancy I, 1989, 71 p.
- Essarraj, 1992 : Essarraj S., *Migration des fluides, microfissuration et conditions de dépôt de l'or dans les veines de quartz aurifère*, Thèse INPL, Nancy, 1992, 399 p.
- Fuchs, de Launay, 1893 : Fuchs E., de Launay L., *Traité des gîtes minéraux et métallifères*, Baudry éd., 1893.
- Haüy, 1801 : Haüy R.J., *Traité de minéralogie*, Louis Lib., Paris, 1801.
- Hubert, 1986 : Hubert P., Textures et inclusions fluides des quartz aurifères. Application au gîte de Cros Gallet (Haute-Vienne, France) et au prospect de Sanoukou (District de Kinieba, Mali), *Document du B.R.G.M.*, 114, 1986, 350 p.
- Johan et al., 1989 : Johan Z., Marcoux E., Bonnemaïson M., Arsenopyrite aurifère : mode de substitution de Au dans la structure de FeAsS, *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 308, 1989, p.185-191.
- de Launay, 1913 : de Launay L., *Gîtes minéraux et métallifères*, Bellanger C. éd., 1913, 934 p.
- Lespinasse, 1990 : Lespinasse M., *Les traînées d'inclusions fluides : marqueur microstructural des paléocontraintes et des migrations fluides*, Thèse Univ. Nancy I, 1990, 251 p.
- Lespinasse et al., 1986 : Lespinasse M., Mollier B., Delair J., Bladier Y., Structuration tangentielle et chevauchements carbonifères dans les leucogranites du N.O. du Massif Central français : l'exemple des failles de Buisnière-Madeleine et d'Arrènes-Ouzilly, *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 303, 1986, p.1575-1580.
- Marcoux et al., 1989 : Marcoux E., Bonnemaïson M., Braux C., Johan Z., Distribution de Au, Fe, As, et Sb dans l'arsenopyrite aurifère du Châtelet et de Villeranges (Creuse, Massif Central français), *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 308, 1989, p.293-300.
- Marion, 1988 : Marion P., *Caractérisation des minerais sulfurés aurifères : mise en œuvre de méthodes classiques et nouvelles*, Thèse Doct. d'Etat, INPL, Nancy, 1988.
- Marion et al., 1986 : Marion P., Regnard J.R., Wagner F.E., Etude de l'état chimique de l'or dans les sulfures aurifères par spectroscopie Mössbauer de ^{197}Au : premiers résultats, *C. R. Acad. Sc.*, Paris, 302, 1986, p.571-574.
- Marion et al., 1988 : Marion P., Wagner F.E., Jumas J.C., Regnard J.R., Apport de la spectroscopie Mössbauer à la connaissance de l'état de la liaison de l'or dans les sulfures, *Doc. BRGM* 158, 1988, p.509-525.
- Marion et al., 1991 : Marion P., Holliger P., Boiron M.C., Cathelineau M., Wagner F.E., New improvements in the characterization of the refractory gold in pyrites : an electron microprobe. Mössbauer spectrometry and ion microprobe study, *Proceedings of Gold 91*, Brésil, A.A. Balkema Pub., 1991, p.389-395.
- Mateus, 1995 : Mateus A., *Evolução tectono-termica e potencial metalogenico do troço transmontano da Zona de Falha Manteigas-Vilariça-Bragança*, Thèse, Univ. Lisbonne, 1995, 194 p. + annexes.
- Meyer et al., 1991 : Meyer F.M., Drennan G.R., Robb L.J., Cathelineau M., Dubessy J., Landais P., Conditions of Au-U mineralization in Witwatersrand reefs, *Proc. 25 years SGA anniversary*, dans Pagel et Leroy éd., Balkema, 1991, p.681-684.
- Möller, 1993 : Möller P., Why is gold accumulated in pyrite- and arsenopyrite-rich mineralizations ? An electrochemical approach, *Proc. of the second biennial SGA meeting*, Fenoll Hach-Ali, dans Torres Ruiz et Gervilla éd., 1993, p.503-508.
- Möller, Kersten, 1994 : Möller P., Kersten G., Electrochemical accumulation of visible gold on pyrite and arsenopyrites surfaces, *Mineral. Deposita*, 29, 1994, p.404-413.
- Picot, Marcoux, 1987 : Picot P., Marcoux E., Nouvelles données sur la métallogénie de l'or, *C.R. Acad. Sc.*, Paris, 304, 1987, p.221-226.
- Quenardel et al., 1984 : Quenardel J.M., Rolin P., Lerouge G., Failles et décrochements carbonifères dans le Massif Central nord-occidental (France), *109e Congrès National des Sociétés Savantes*, Dijon, Sciences, 1, 1984, p.215-225.
- Robert, Brown, 1986 : Robert F., Brown A.C., Archean gold-bearing quartz veins at the Sigma mine, Abitibi greenstone belt, Québec. Part I : Geologic relations and formation of the vein system, *Econ. Geol.*, 81, 1986, p.578-592.

Routhier, 1963 : Routhier P., *Les gisements métallifères, géologie et principe de recherche*, Masson éd., 1963, 1282 p.

Sibson *et al.*, 1988 : Sibson R.H, Robert F., Poulsen K.H., High angle reverse fault, fluid-pressure cycling and mesothermal gold quartz deposits, *Geology*, 16, 1988, p.551-555.

Wagner *et al.*, 1986 : Wagner F.E., Marion P., Regnard J.R., Mössbauer study of chemical state of gold in ores, *Gold 100, Proceeding of international conference of ore gold, Extractive metallurgy of gold vol.2*, Johannesburg, SAIM, 1986, p.435-442.

Werner, 1802 : Werner A.G., *Nouvelle théorie de la formation des filons. Application de cette théorie à l'exploitation des mines*, Villier éd., Paris, 1802, 290 p.

Wu, 1989 : Wu X., *L'arsénoxyrite aurifère : composition, conditions de genèse. L'apport des synthèses minérales et de l'étude de gisements d'or* (Le Châtelet, L'Aurières, France), Thèse Univ. Orléans, 1989.

Zouhair, 1992 : Zouhair M., *Les paléocirculations fluides dans la Tagragra d'Akka (Anti-Atlas, Maroc). Etude combinée des inclusions fluides et de la déformation des quartz aurifères : conséquences pour la métallogénie de l'or*, Thèse INPL, Nancy, 1992, 384 p.