

L'OR
Données industrielles,
économiques et géographiques*
(1 once = 31,1035 g)

par J.-L. VIGNES

Centre de Ressources Pédagogiques en Chimie : Économie et Industrie
École Normale Supérieure de Cachan, 94235 Cachan Cedex

MATIÈRES PREMIÈRES : teneur de l'écorce terrestre : 0,005 ppm (5ppb). 1 m³ d'eau de mer contient de 1 à 10 mg d'or.

Minerai : teneurs de 5 à 14 ppm. Lorsque Au est récupéré comme sous-produit d'autres métaux, les teneurs peuvent être nettement plus faibles : l'or à la teneur de 0,2 ppm, associé à Cu, est récupéré dans la mine de Bingham (Utah, États-Unis). En un siècle, la production de cette mine a été de 460 t d'or.

Dans les minerais, Au est pratiquement toujours (à 99 %) présent sous forme métallique (état natif), toujours allié à l'argent, souvent au cuivre, parfois au bismuth, également souvent associé à l'uranium. Les minerais sont classés en fonction des autres composés associés à l'or, la présence de ces composés pouvant entraîner des difficultés de traitement. On distingue l'or libre, non inclus dans d'autres minéraux, de l'or associé à des sulfures de fer (pyrite : FeS₂, pyrrhotite : Fe_{1-x}S), de l'or associé à des sulfures d'arsenic (arsénopyrite ou mispickel : FeAsS) ou d'anti-

* Cet article fait partie de la mise à jour 1992 de l'ouvrage : «Données industrielles, économiques, géographiques sur des produits inorganiques et métaux», rédigé par J.-L. Vignes et édité conjointement par le Centre Documentaire Coopératif de l'Université de Poitiers et l'Union des Physiciens. La 3^e édition (1991) est actuellement disponible auprès de l'Union des Physiciens (voir le bon de commande dans cette revue). Par rapport à la 2^e édition (1990), l'édition 1991, en 2 tomes a subi les modifications suivantes :

- mise à jour générale à l'aide des données de 1989,
- nouveaux chapitres : hydroxyde de potassium, gaz naturel, peroxyde d'hydrogène, dioxyde de soufre, sodium, uranium.

moine (stibine : $\text{Sb}_2 \text{S}_3$). L'or associé à des sulfures de cuivre, zinc ou plomb est récupéré comme sous-produit des métallurgies correspondantes.

L'or libre se trouve dans : des filons (en général riches en quartz), des chapeaux oxydés de minerais sulfurés, ou des alluvions, sous forme de placers (dans ce cas, l'or est sous forme de paillettes ou de pépites) : le Witwatersrand de République Sud Africaine est un placer fossile. Le plus gros amas d'or trouvé (mélangé à du quartz), la « plaque de Holterman », a été trouvée en 1872 à Hill End (Australie) : 1,42 m de long, 235 kg. La plus grosse pépite (« Welcome Stranger ») a été découverte à Black Lead (Australie), en 1869 : 71 kg d'or. En France, la plus grosse pépite conservée pèse 543 g. Elle provient des Avols (07) et se trouve actuellement à l'Université Harvard (Massachusetts, États-Unis). En France, l'orpaillage donne de l'ordre de 300 à 400 kg/an, principalement en Guyane.

Les découvertes de gisements d'or ont donné lieu à de nombreuses ruées vers l'or :

- 1721 dans le Mato Grosso puis en 1735 dans le Goiás (Brésil).
- 1838 dans les alluvions de la Tchara, en Transbaïkalie (sud Sibérie).
- 1848 à Colonna en Californie : les 2 premières années, l'or trouvé a rapporté 3 fois le prix payé par les États-Unis au Mexique pour la cession de la Californie. La production totale a été de 1 500 t. La ruée se poursuit au Nevada, puis au Colorado.
- 1851 en New South Wales (Australie).
- 1884, découverte du plus important gisement de tous les temps : le Witwatersrand, près de Johannesburg (Afrique du Sud). La ruée a commencé en septembre 1888. A fourni en un siècle, plus de 40 000 t d'or.
- 1886 dans la rivière Klondike (Yukon, Canada), célébrée par J. London puis C. Chaplin. La production a été de 280 t.
- 1898 près du détroit de Behring en Alaska, production de 230 t.
- 1980 à Morro da Babilonia, Serra Pelada dans l'état de Para (Brésil). En 1982, 30 000 orpailleurs et porteurs sont entassés sur 1 km².

Productions minières : en 1990, en kg de métal. Monde : 2 027 921, CEE (Espagne, France) : 12 156.

Afrique du Sud : 602 997	Canada :	165 453
États-Unis : 290 202	Chine :	100 000
URSS : 250 000	Brésil (production officielle) :	87 000
Australie : 243 117	Nouvelle Guinée :	34 280

La production réelle du Brésil, en 1989, est estimée à 110 000 kg. Dans ce pays, environ 850 000 garimpos exploitent artisanalement plus de 2 000 mines (garimpos) dans le bassin du rio Tapajos. L'utilisation de mercure pour l'amalgamation entraîne une importante pollution des rivières.

Au Canada, production au Québec : région de Abitibi, en Colombie Britannique et en Ontario : gisement de Hemlo découvert en 1981, 700 t de réserves à 7 g/t.

En URSS : mines de Murantau : 80 t/an.

Évolution de la production minière : en % de la production du monde occidental.

Années	Afrique du Sud	États-Unis	Australie	Canada
1983	64 %	6 %	3 %	7 %
1990	36 %	17 %	15 %	10 %

Production minière d'Afrique du Sud :

Les gisements sont situés dans le Witwatersrand, à 2 000 m d'altitude. Il y a 2,5 milliards d'années (archéen), l'or charrié par des rivières s'est déposé sur les 50 000 km² d'une mer intérieure. Le gisement forme un arc de cercle de 480 km de long à cheval sur le Transvaal et l'État d'Orange. Les paillettes d'or sont présentes dans des veines (reefs) de 2 à 3 cm de large. La teneur moyenne du minerai qui était de 13,3 g/t en 1970, n'était plus que de 5,3 g/t en 1987. Le minerai le plus riche est celui de la mine de Kloof : 14 g/t. La mine de Vaal Reefs produit également de l'uranium (2 000 t/an). Le puits de Western Deep Levels détient le record de profondeur à environ 4 000 m. Il y a 33 mines en activité qui emploient 145 000 mineurs. La raffinerie de Germiston traite l'ensemble de la production du pays et la plus grande partie de celle-ci est achetée par la banque centrale d'Afrique du Sud qui la vend ensuite sur le marché mondial. De 1911 à 1984, 44 000 mineurs

ont péri dans les mines d'or. En 1984, la production d'une once d'or, nécessitait l'extraction de 3,3 t de minerai, 39 heures de travail, 5,4 m³ d'eau, 572 kWh, 12 m³ d'air comprimé. Les mines d'or sud africaines consomment 18 milliards de kWh soit 1/5 de la production d'Afrique du Sud et 1/10 de la production du continent africain.

Situation française :

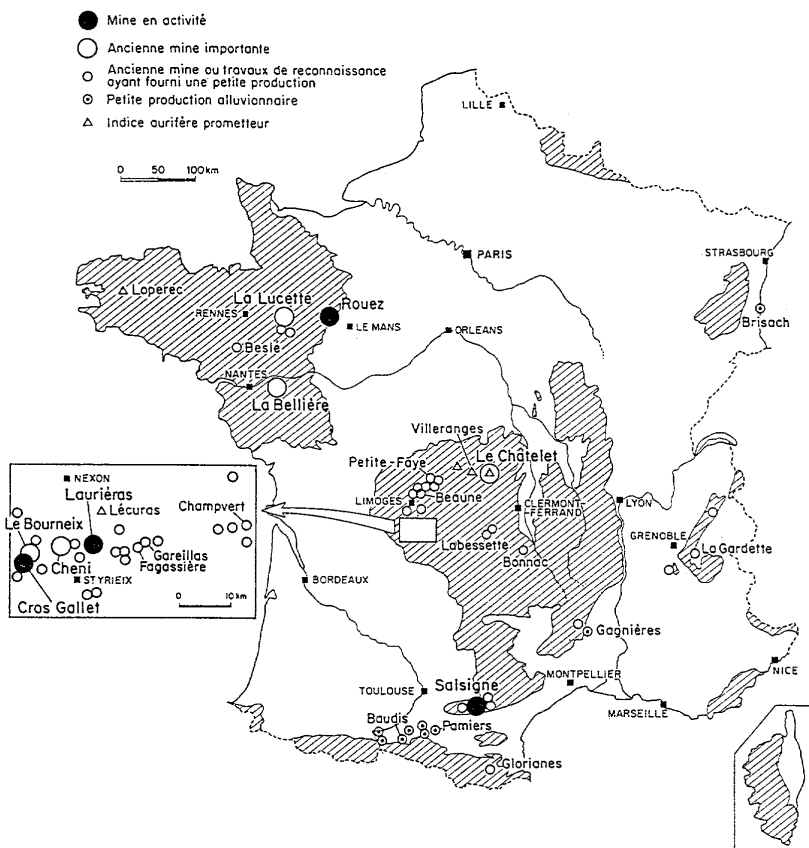
– La mine de Salsigne (11) est la plus importante mine européenne. Elle est exploitée depuis 1926. Elle est en partie à ciel ouvert (6 millions de t de tout venant/an, 160 000 t de minerai/an), en partie souterraine (– 345 m, 100 km de galeries, 60 000 t de minerai/an). Le minerai est sulfuré à prédominance de pyrite, pyrrhotite et mispickel. Les teneurs moyennes sont les suivantes : Au : 10 g/t, Ag : 20 g/t, Cu : 1 kg/t. Depuis l'ouverture de la mine, la production a atteint 90 t d'Au, les réserves sont estimées à 90 t. Les productions annuelles sont de 2 500 kg d'or, 4 000 kg d'Ag, 10 000 t d'As (n° 1 mondial). L'arsenic est transformé, en partie, en arsine (AsH₃) de haute pureté par l'Air Liquide (n° 2 mondial, marché de 15 t/an), utilisée en micro-électronique pour fabriquer l'arséniure de gallium (AsGa) semi conducteur et pour doper le silicium.

Le minerai a été pendant longtemps uniquement traité par flottation et pyrométallurgie dans un four de type water jacket qui traite 50 000 t/an de concentré. Le soufre et l'arsenic sont récupérés. La matte obtenue est traitée en Suède. En 1989, une installation de traitement hydrométallurgique par cyanuration a été mise en route pour traiter les stériles (haldes) accumulés depuis le début de l'exploitation de la mine. L'installation peut également traiter de minerai tout venant. La capacité est de 1 million de t/an.

La mine, exploitée par les Mines et Produits Chimiques de Salsigne, société contrôlée par le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), emploie 500 personnes et a réalisé, en 1989, un chiffre d'affaires de 250 millions de francs. Face à des coûts d'exploitation élevés et de faibles cours de l'or, la société exploitante a, en 1992, déposé son bilan.

– La Société des mines de Bourneix, filiale de la Cogéma, exploite les mines du Bourneix (depuis 1982) et de Laurières (depuis 1988), situées à la limite de la Haute Vienne et de la Dordogne. Les gisements sont constitués d'amas siliceux riches en sulfures (mispickel, pyrite et galène). L'or est finement disséminé dans le mispickel. La teneur moyenne

C. Guillemain, Z. Johan et E. Marcoux

La Vie des Sciences, *Comptes rendus*, série générale, tome 6, 1989, n° 5, p. 337-367

L'or en France métropolitaine. Les surfaces hachurées correspondent aux terrains anciens, essentiellement d'âge paléozoïque.

des mines souterraines est de 12 g/t, celle des mines à ciel ouvert de 6 g/t. L'exploitation comprend 3 mines souterraines (jusqu'à - 200 m), 3 mines à ciel ouvert, 2 unités de concentration par broyage et flottation (temps de flottation 30 min.) et une unité de production de lingots de doré dont la construction a été lancée en novembre 1990. Cette unité, dont la première étape (fixation sur charbon) est opérationnelle depuis juin 1991, procède par cyanuration sur une pulpe contenant 40 % de

matière solide, à un pH de 10,5 obtenu par ajout de chaux, dans 5 cuves agitées pendant 48 h. Le complexe aurocyanure est ensuite fixé sur du charbon actif dans 10 cuves. La pulpe et le charbon actif circulent à contre-sens. Le charbon de la première cuve, contenant environ 40 kg d'or/t est déchargé après 8 à 16 h. Actuellement, le charbon chargé en or est livré aux affineurs. Dans une seconde étape, après séchage, puis grillage, l'or et l'argent seront récupérés dans les cendres qui après ajout de fondant seront amenées à la fusion. Les scories surnageantes seront éliminées et le doré (60 % Au - 40 % Ag) récupéré puis expédié pour affinage.

On estime que depuis les origines de l'exploitation, 25 t d'or ont été produites dans le Limousin : de 10 à 12 t à l'époque gallo-romaine, 10 t de 1920 à 1944 et 5 t depuis 1982.

En 1990, la production est de 1 525 kg d'or, 2 273 kg d'argent, pour une extraction de 176 715 t de minerai (9,84 g d'or/t) et une production de concentrés de 5 978 t (255 g d'or/t). L'effectif est de 90 personnes et le chiffre d'affaires de 95,9 millions de francs.

– La Cogéma possède 30 % de la mine d'or de Jamestown (Californie, États-Unis) : production de 3 502 kg en 1988, réserves estimées à 30 t.

– Coframines, filiale du BRGM contrôle 72,3 % de Cheni Gold Inc (Amax, États-Unis en contrôle 19 %), qui exploite la mine de Lawyers (Colombie Britannique, Canada).

– Le groupe français Total qui possède des mines au Canada (Erickson...) et des participations dans des sociétés minières australiennes a décidé, en 1990, de se retirer de ce secteur.

Réserves minières : en 1983, en milliers de t d'or contenu.

Monde :	40		2,5
Afrique du Sud :	23,6	États-Unis :	2,5
URSS :	6,2	Canada :	1,3

Producteurs : principaux :

n° 1 mondial : Ninorco, filiale à 60 % d'Anglo American Company et De Beers (Afrique du Sud, siège à Luxembourg). Le groupe Anglo American Company contrôle 40 % de la production sud-africaine, est le premier producteur d'uranium et de charbon d'Afrique du Sud et détient une importante participation dans De Beers (1^{er} producteur mondial de diamants).

n° 2 : Consolidated Gold Fields (Royaume Uni). Exploite des mines en Afrique du Sud, États-Unis (contrôle 49,7 % de Newmont Gold, n° 1 aux États-Unis), Australie.

Autres producteurs : Gencor (Afrique du Sud), Placer Dome (Canada, Papouasie-Nouvelle Guinée, 44 t d'Au, 404 t d'Ag en 1990), Western Mining (Australie).

TRAITEMENT DES MINERAIS : les procédés utilisés dépendent de la nature des minerais.

– La gravimétrie : concerne l'or libre alluvial dont les particules sont $> 75 \mu\text{m}$. Elle est utilisée dans les installations artisanales des orpailleurs : batées et laveries formées de canaux de bois munis de baguettes (sluice). Technique peu coûteuse qui permet d'exploiter des gisements de très faible teneur (de l'ordre 1 g/m^3), mais la récupération des fines particules est faible malgré l'utilisation de canaux tapissés de velours.

– La flottation, après broyage, est systématiquement utilisée lorsque l'or est associé à des sulfures métalliques.

– Le grillage est utilisé lorsque Au est associé à des sulfures de Fe, Ni, Sb, car il facilite les traitements ultérieurs en rendant le minerai poreux.

– L'amalgamation consiste à allier l'or (et l'argent) avec du mercure et à décomposer l'alliage par distillation du mercure. Actuellement cette technique est marginale.

Extraction hydrométallurgique par cyanuration

Inventée en 1888, procédé le plus utilisé. Le minerai est traité par une solution diluée (1 g/l) de cyanure de sodium en milieu basique ($\text{pH} > 10$ pour éviter la libération, par le CO_2 dissous dans l'eau, de cyanure d'hydrogène (HCN) très toxique) et en présence d'oxygène :



Après traitement de 24 à 48 h, la solution contient quelques grammes d'or par mètre cube. La consommation de NaCN est de 1 à 10 kg/t de minerai.

La solution contenant le complexe aurocyanure peut être traitée par cémentation (procédé Merrill-Crowe) par du zinc. Au se dépose sur les grains de Zn, qui attaqués par $\text{H}_2 \text{ SO}_4$ libèrent l'or. Le métal obtenu (doré) contient jusqu'à 5 % d'impuretés métalliques. Actuellement, la

fixation de l'or sur charbon actif est de plus en plus utilisée. 1 t de charbon peut absorber 70 kg d'or. La solution d'ions aurocyanures et la pulpe ne sont pas séparés et passent dans des cuves contenant le charbon actif. Le temps de contact charbon-pulpe est de l'ordre de 1 h, le temps de séjour du charbon de plusieurs jours. L'or est récupéré en traitant le charbon par une solution chaude (70°C) de NaOH et NaCN. La solution obtenue contient quelques grammes d'or par litre. Le charbon est recyclé après chauffage à 600-750°C, à l'abri de l'air. L'or est récupéré par électrolyse. Il se dépose sur une cathode en laine de fer, puis est fondu. L'or obtenu est de haute pureté.

La biolixiviation par exemple avec *thiobacillus ferro-oxydans* qui oxyde le fer de la pyrite permet de libérer l'or et de rendre ainsi la cyanuration plus efficace.

La lixiviation en tas de minerais de faible teneur (moins de 1 g/t) utilise le même principe de formation d'un complexe cyanuré. Le traitement dure de quelques semaines à plusieurs mois pour des rendements de 40 à 85 %.

L'hydrométallurgie est également utilisée pour traiter les rejets d'anciennes laveries ou les stériles d'anciennes mines (par exemple à Salsigne, en France).

Affinage

– Le métal obtenu par cémentation est fondu et traité par Cl_2 à 1150°C (procédé Miller). Les impuretés métalliques donnent des chlorures volatils ou liquides qui sont éliminés. L'or obtenu a un titre en général > 995/1 000 et contient jusqu'à 0,35 % d'Ag. Il est coulé en barres de 12,5 kg.

– De l'or à 999,9/1 000 peut-être obtenu par affinage électrolytique à anode soluble. La cathode est en or pur, l'or à affiner constituant l'anode, l'électrolyte une solution d'acide aurichlorhydrique (HAuCl_4), les cellules sont en céramique.

PRODUCTION D'OR RAFFINÉ hors pays de l'est : en 1988, en t.

Monde occidental :	1 480		
Afrique du Sud :	619	Canada :	132
Amérique latine :	210	Australie :	125
États-Unis :	190	Philippines :	43

Depuis la préhistoire, la production mondiale totale d'or serait de l'ordre de 120 000 t, dont :

avant la fin de l'empire romain : 10 000 t au XIX^{ème} siècle : 12 000 t
 au moyen âge : 2 500 t de 1900 à 1990 : 96 500 t
 au XVII-XVIII^{ème} siècle : 4 000 t

Recyclage : estimé à 300-400 t/an dans le monde occidental, dont 40 t pour la France, en 1988.

SITUATION FRANÇAISE

En 1990

– Production minière : 5 426 kg dont : Salsigne : environ 2 500 kg, Le Bourneix : 1 525 kg, Guyane : 870 kg déclarés.

– Pas de production de métal à partir de concentrés miniers. La production (72 t d'or et d'alliages) est assurée, majoritairement, à partir de déchets récupérés par le Comptoir Lyon-Alemand-Louyot (10 usines dont 6 en France) et la Compagnie des métaux précieux.

– Importations (1989) : or et alliages : 115,4 t.

– Exportations (1989) : or et alliages : 52,1 t.

UTILISATIONS

Consommations hors pays de l'est : en 1988, en t.

Monde occidental :	1 942		
Extrême Orient :	850	Italie :	170
Proche Orient :	230	RFA :	120
États-Unis :	215	France (en 1989) :	37

Propriétés : inaltérable à l'air et dans l'eau et le plus malléable et ductile de tous les métaux : 1 g peut s'étirer sur plus de 3 km ou donner une feuille de plus de 1 m².

Alliages : la teneur en or est exprimée en millièmes ou en carats : 24 carats pour l'or pur, 18 carats (75 % d'or) pour les alliages commercialisés en France. Dans les autres pays de la CEE, de l'or à 14 carats (58,3 %) et 9 carats (37,5 %) est en vente.

Principaux alliages pour bijouterie : en France, 75 % d'or, avec en plus :

Or jaune : 12,5 % Ag, 12,5 % Cu

Or gris : 10 % Cu, 12,5 % Ni, 2,5 % Zn

Or rose : 6 % Ag, 19 % Cu

Or rouge : 4,5 % Ag, 20,5 % Cu

Secteurs d'utilisation : en 1990, dans le monde occidental.

Bijouterie : 72,6 % Industries diverses : 5,4 %

Monnaies officielles : 9,6 % Dentisterie : 3,4 %

Électronique : 9,0 %

Sur les 120 000 t produites dans le monde depuis la préhistoire, environ 100 000 t subsistent, détenues à 34 % par les banques centrales et institutions financières (à la fin de 1990 : États-Unis : 8 280 t, institutions internationales (FMI...) : 6 840 t, Allemagne : 2 880 t, France : 2 520 t, Suisse : 2 520 t, Japon : 720 t, URSS : 390 t). Les personnes privées en détiendraient 24 % sous forme de pièces et lingots, principalement en France (2 500 à 5 000 t), Inde, États-Unis. 32 % de la production serait sous forme de bijoux, et 10 % dans des applications industrielles.

– Rôle d'étalon monétaire de 1717 au 15 août 1971 (fin de la convertibilité du dollar en or) qui s'explique moins par sa relative rareté, les gisements aurifères sont plus nombreux que ceux de nombreux autres éléments, que par son inaltérabilité aux agents atmosphériques.

– Un téléphone à touche contient 33 contacts d'or.

– Dorure : par exemple dôme de l'hôtel des Invalides à Paris : utilisation de 550 000 feuilles d'or à 23,5 carats (98 % Au, 1 % Ag, 1 % Cu) de 0,2 μm d'épaisseur et de 8,4 cm^2 , soit 23 g d'or pour 1 000 feuilles, et au total, 12,5 kg d'or.

BIBLIOGRAPHIE

- Annuaire Statistique Minemet, Metaleurop.
- Annales des Mines, février 1990, février 1992.
- Explora n° 3, janvier 1989.
- Sciences et Avenir, n° 511, septembre 1989.
- Le Monde, Dossiers et documents, avril 1985.

- Informations de la société des Mines et Produits Chimiques de Salsigne, BP n° 2, 11 600 Conques-sur-Orbiel.
- Brochure de présentation de la Société des Mines du Bourneix, BP 36, 87500 Saint-Yrieix-La-Perche.
- Textes et Documents pour la classe, n° 348, mai 1984.
- Métaux précieux, métaux nobles, plaquette du Comptoir Lyon-Alemand-Louyot, 13 rue de Montmorency, 75003 Paris.
- Total Information n° 106, 1987.
- Science et Vie, n° 860, mai 1989.
- Comptes-rendus de l'Académie des Sciences, La vie des sciences, 6 (1989) n° 5.