

**Zeitschrift:** Revue économique et sociale : bulletin de la Société d'Etudes Economiques et Sociales

**Herausgeber:** Société d'Etudes Economiques et Sociales

**Band:** 71 (2013)

**Heft:** 3

**Artikel:** Un métal stratégique : l'or

**Autor:** Bachau, Christian

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-390960>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 12.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# UN MÉTAL STRATÉGIQUE: L'OR

CHRISTIAN BAUCHAU

*Université de Lausanne*

*christian.bauchau@unil.ch*

> Remontant dans le passé pour mieux mettre en exergue les aspects symboliques, voire émotionnels, qui sont attachés au minerai roi, l'auteur développe également les aspects économiques de la question, en termes de production, d'origine géographique, mais aussi et d'usages et applications diverses liées à l'or: bijouterie, médecine et autres usages industriels. La seconde partie de l'article est consacrée aux aspects géochimique et minéralogique d'une part et, d'autre part, aux principaux gîtes (que l'auteur caractérise en une typologie en cinq) d'or et à ses diverses modalités d'exploration rendue difficile, les géologues étant obligés « d'aller au-delà des dernières frontières géologiques ». Il est fait finalement allusion au rôle de la Chine.

Mots-clés: or, histoire, métallurgie, productions, usages, prix, géochimie, tonnages, teneurs, minéralogie, gîtologie, géologie, exploration.

## 1. INTRODUCTION GÉNÉRALE

### 1.1 UNE BRÈVE HISTOIRE DE L'OR: ANTIQUITÉ

L'or est un métal généralement rencontré sous forme d'or natif, c'est-à-dire d'or pur et il est connu, utilisé, recherché et parfois même adoré depuis la plus haute Antiquité. Il a sans doute été le premier métal connu de l'Homme qui le trouvait sous forme de pépites ou de paillettes sur les sols et dans les cours d'eau. Il a été ornement avant de devenir monnaie, pièces, médailles, réserve (bancaire) et objet de théaurisation ou standard monétaire (par exemple de 1821 à 1971) et plus tard métal industriel. La bijouterie en consomme beaucoup et il demeure, encore et toujours, une protection contre l'inflation. Lénine voulait en plaquer les urinoirs publics de l'URSS, on sait ce qu'il en advint... En fait l'URSS a longtemps été le 2e producteur mondial d'or et la Russie actuelle en est le 4e.

Le désir ou la soif de l'or ont toujours été insatiables et ont fortement influencé l'histoire de l'humanité, et ont été un facteur décisif dans le développement de la chimie, de la géographie, de la navigation, de la géologie, entre autres activités humaines. Le cri «*de l'Or!*» a entraîné les hommes à travers les océans, les déserts, les montagnes, les forêts vierges, dans tous les continents et les lieux les plus inhospitaliers de la Planète. Il a été l'origine et la cause de nombreuses expéditions et découvertes. On peut mentionner ici Jason de Thessalie, Darius et Cyrus de la Perse ancienne, Alexandre le Grand, Jules César et d'autres dirigeants romains, Christophe Colomb, Cortez, Pizarro et tous les conquistadors, etc. et plus près de nous les nombreuses ruées vers l'or du 19e et du début du 20e siècles, notamment en Californie, en Alaska, au Canada, au Pérou, etc. Des pays comme l'Australie auraient

certainement été connus et peuplés tardivement sans les ruées vers l'or du Victoria ou de l'Australie de l'Ouest, de 1840 à 1900.

D'après la légende, l'or aurait été découvert par Thoas en Thrace (Bulgarie et Grèce) ou encore par Mercure, fils de Jupiter. En réalité son origine se perd dans la plus lointaine Antiquité. Les plus anciens manuscrits, chinois, indiens ou hébreux, le mentionnent. De l'or a été trouvé dans de nombreuses civilisations anciennes, en particulier dans des ornements funéraires: tombes néolithiques, celtiques, sumériennes, égyptiennes. Dans la tombe de Toutankhamon (1350 av. J-C) on a retrouvé des scènes montrant le broyage du quartz auri-fère et le raffinage du métal. L'or a été utilisé par des artisans dès l'Âge du cuivre et des objets en or ont été trouvés dans les Balkans dès le 4e millénaire av. J-C. (nécropole de Varna) et en Europe centrale depuis l'Âge du bronze (2e millénaire av. J-C.). Le premier rapport or/argent connu a été édicté par le roi égyptien Menès 3500 av. J-C. et fixé à 2.5 (1 part d'or pour 2.5 Ag). A présent il oscille autour de 60-63. En 2600 av. J-C, des chroniques rapportent qu'il y avait beaucoup d'or en Nubie (Soudan). Il y en a encore.

Mille ans avant J-C. les monnaies d'or et d'argent étaient courantes entre le Nil et l'Indus. En Europe les premières pièces d'or apparaissent à Egine sous le règne du roi Argos vers environ 650 av. J-C, Mais elles étaient déjà connues en Asie mineure grecque six siècles plus tôt. La légende de la Toison d'or se réfère sans doute à l'usage alors courant de toisons de moutons pour piéger la poussière d'or dans les placers de la rive nord de la mer Noire. A partir de là, beaucoup d'Etats vont frapper des pièces d'or et tout particulièrement les Romains qui vont émettre l'aureus. Cette pièce va au fil du temps perdre de son poids, illustrant ainsi la décadence de Rome et son inflation: 11 g sous Sylla (86 av. J-C.), 8 g au temps de César, 7g sous Néron (60 après J-C) et 3.9 g au temps de Valentinien I (367). L'or des Romains provenait essentiellement d'Espagne et de Dacie (± l'actuelle Roumanie), mais aussi de Gaule. Les principaux producteurs d'or de l'Antiquité étaient l'Egypte et le Soudan, la Colchide (sud de la Russie), la Lydie (NE de la Turquie), l'Inde, l'Espagne, la Dacie.

## 1.2 HISTOIRE DE L'OR: TEMPS MODERNES

Avec la chute de Rome la monnaie d'or disparut presque complètement en Europe pour ne reparaître qu'au 16e siècle lorsque les gisements de l'Amérique espagnole (Mexique, Colombie, Pérou...) iront alimenter l'Espagne d'une quantité considérable d'or et d'argent. Cet afflux de métaux nobles provoqua d'ailleurs une forte expansion économique dans toute l'Europe. L'Espagne, alors une grande puissance, vivra pendant 250 ans de l'or et de l'argent des Amériques, avant de connaître une longue période de décadence. L'exploration des Amériques par les Européens a été largement provoquée par la vue et la description des ornements d'or portés à profusion par les peuples américains, dits indiens. Les Aztèques, par exemple, considéraient l'or comme produit par les dieux. Jusqu'au 18e siècle, les alchimistes n'ont cessé d'essayer de fabriquer de l'or à partir de métaux plus ordinaires (plomb...) par l'interaction avec une matière mythique, la pierre philosophale. Bien qu'ils n'aient jamais concrétisé leur espoir, ils n'en ont pas moins contribué à élaborer les fondations de la chimie scientifique. Leur symbole pour l'or était un cercle avec un point au centre qui est aussi le symbole astrologique du soleil.

En 1821, l'Empire britannique, alors en pleine expansion, créa le *gold standard* (ou étalon-or) lorsque la Banque d'Angleterre rétablit la conversion de ses billets. Cet étalon devait

durer grossso modo jusqu'en 1971, lorsque le président des USA Nixon supprima officiellement la convertibilité du dollar en or, donc une dévaluation de fait du dollar qui n'a d'ailleurs cessé de se poursuivre jusqu'à présent. L'instauration du gold standard et le besoin de nouvelles liquidités amenèrent la découverte au 19e siècle de riches gisements en Sibérie, USA (Californie...), Canada, Afrique du sud et centrale, Australie avec les ruées vers l'or qui les accompagnèrent. On mentionnera la découverte en 1898 de l'or de Kalgoorlie (Australie occidentale), toujours en exploitation à présent ainsi que celle du Yukon en 1896 (fameux dépôts alluvionnaires du Klondike), histoire dont Ch. Chaplin fit en 1925 un film fameux: «Goldrush». En 1883 et 1886, découverte d'or dans le Witwatersrand et début de l'exploitation industrielle. C'est le principal et plus grand district aurifère jamais découvert.

### 1.3 MÉTALLURGIE

La métallurgie la plus antique consistait en une séparation gravifique plus ou moins complète de l'or et de sa gangue. Vers 1000 av. J-C. on découvrit le processus d'amalgamation avec le mercure. On commence par broyer finement le minerai et on le mélange à du mercure. L'or se dissout alors dans le mercure pour former une sorte d'alliage qui est ensuite distillé entre 350° et 450°C. L'or en sort sous forme pure et le mercure est récupéré durant le refroidissement. Cette méthode est toujours utilisée dans les exploitations artisanales, notamment en Afrique et en Amérique du sud, mais elle est très polluante et à proscrire. L'Espagne a été et est encore le principal producteur de mercure, dans les mines d'Almaden au centre du pays. Dès 500 av. J-C. les métallurgistes connaissaient les alliages de l'or avec l'argent ou le cuivre. En 1887 découverte du procédé par cyanuration qui est encore à présent le plus utilisé. On utilise à cet effet du cyanure de sodium qui est un poison et doit être manipulé avec beaucoup de précautions dans des conditions très basiques (contraire d'acides) ( $\text{pH} > 11$ ), sinon il se formerait de l'acide cyanhydrique, mortel.

## 2. QUELQUES ASPECTS ÉCONOMIQUES

### 2.1 PRODUCTIONS PASSÉES ET ACTUELLES, RÉSERVES

Au total environ 170'000 tonnes d'or ont été produites dans l'histoire jusqu'en 2012. Cela représente à peu près 5.46 milliards d'onces ou en termes de volume 8'800 m<sup>3</sup>, soit un cube de 20.50 m d'arête. Pour comparaison, une piscine olympique contient environ 3'000 m<sup>3</sup> d'eau et un appartement normal de 120 m<sup>2</sup> occupe un volume de 350 m<sup>3</sup>. Une tonne d'or représente un volume de 52 dm<sup>3</sup> et la production annuelle étant de ~2'500 tonnes, celle-ci n'occuperait qu'un espace de 130m<sup>3</sup>, soit un cube de 5.1 m d'arête qui entrerait donc facilement dans un garage ou un appartement!

La production historique d'or se distribue comme suit:

- > Préhistoire et Antiquité: 10'250 tonnes
- > Moyen Age: ~2'500 t
- > 1492-2012: 157'000 tonnes dont:
  - > 1492-1800: 9'000 tonnes
  - > 1800-1900: 23'000 tonnes
  - > 1900-1975: 60'000 tonnes
  - > 1976-2012: 65'000 tonnes

Origine géographique de l'or entre 1492 et 1976:

- > Afrique: 45% (dont 40% pour l'Afrique du Sud)
- > Amérique du Nord: 20%
- > URSS et Russie: 13%
- > Océanie: 10% (surtout Australie)
- > Amérique du Sud: 6%
- > Asie: 5% (sans l'URSS)
- > Europe: 1% (sans l'URSS)

Pays (en 2012)	Prod. 2011 en tonnes	Prod. 2012 en tonnes	% en 2012	Réserves en tonnes
1. Chine	362	370	13.7%	9. 1'900
2. Australie	258	250	9.3	<b>1. 7'400</b>
3. USA	234	230	8.5	5. 3'000
4. Russie	200	205	7.6	3. 5'000
5. Afr. du Sud	181	170	6.3	2. 6'000
6. Pérou	164	165	6.1	8. 2'200
7. Canada	97	102	3.8	14. 920
8. Indonésie	96	95	3.5	5. 3'000
9. Ouzbekistan	91	90	3.3	10. 1'700
10. Ghana	80	89	3.3	11. 1'600
11. Mexique	84	87		12. 1'400
78 autres pays	800	802	23.9	~10'000
<b>Total Monde</b>	<b>2'660</b>	<b>~2'700</b>	<b>100</b>	<b>52'000</b>

Tableau 1. La production minière d'or en 2011 et 2012

Plus de 35% de l'or extrait dans le monde provient d'Afrique du Sud, mais, première productrice pendant plus d'un siècle, elle a perdu sa première place en 2003. Durant les années 1960 elle produisait de 60 à 70% de l'or mondial et encore environ 50% dans les années 1970 et 40% dans les années 1980. Les raisons de la forte baisse de sa production sont diverses. D'abord les coûts miniers directs sont les plus élevés du monde à cause de la grande profondeur des mines (jusqu'à 4'000 m), des basses teneurs, de la minceur des niveaux aurifères (<1 m), de la grande dureté du minerai, d'où une assez faible mécanisation et une importante masse salariale (50% des coûts totaux contre 25% aux USA). Enfin ces gisements sont exploités depuis 130 ans et tendent à s'épuiser.

La production minière d'or a été multipliée par 4 durant le 20e siècle et a atteint un premier record en 2001 avec 2'650 tonnes (cf. tableau1). Depuis, elle a eu tendance à baisser avec 2'260 tonnes en 2008. Elle a un peu augmenté à nouveau depuis 2009, atteignant environ 2'700 tonnes en 2012. Quelques pays voient leur production augmenter un peu tels la Chine, la Russie, le Ghana, le Pérou, tandis que d'autres tels l'Afrique du Sud, les USA, le Canada, l'Australie la voient diminuer. A cette production minière il faut rajouter plusieurs centaines de tonnes/an de métal de récupération, environ entre 400 et 1'000 tonnes/an. Le trou entre la demande et l'offre minière est de l'ordre de 1'000 tonnes comblé par l'or de récupération et celui vendu par les banques centrales, mais celles-ci en vendent de moins en moins et ont

plutôt tendance même à en acheter. Dans les prochains 10-15 ans il semble que la production minière doive baisser parce que les origines de cette baisse sont structurelles et endogènes à l'industrie minière et non pas conjoncturelles. Dans le futur on devrait donc voir les prix augmenter en dépit d'une récente baisse (printemps 2013). *Les réserves minières* estimées (celles qui sont connues avec une bonne précision) apparaissent aussi dans le tableau 1 et c'est l'Australie qui semble en avoir le plus, l'Afrique du sud apparaissant en second, mais les problèmes inhérents à ce pays sont toujours là et non résolus. On estime qu'aujourd'hui environ 85% de tout l'or extrait des mines est encore disponible dans les stocks mondiaux et que seuls 15% en ont été perdus ou utilisés dans des objets industriels non recyclables.

## 2.2 Usages et applications

*La consommation d'or* varie d'année en année mais grosso modo 51% va dans la bijouterie, 20% dans les banques centrales, 18% à la thésaurisation des privés (sur le total de 38%: barres, pièces 21% et EFT 17%) et 11% dans l'industrie. Les EFT (Gold Exchange-Traded Funds) sont, en simplifiant, de l'or-papier en actions, (chaque action = une once d'or). Les principaux usages de l'or découlent de son inaltérabilité et de sa résistance à la corrosion, de sa faible dureté, de sa malléabilité et ductilité, de ses fortes conductibilités électrique et thermique (inférieures seulement à celles du cuivre et de l'argent), de son inertie chimique et de sa facilité de s'allier avec le cuivre, l'argent ou les platinoïdes. C'est le plus malléable et le plus ductile des métaux: un seul gramme d'or peut être étendu en une feuille de 1 m<sup>2</sup> de moins de 1 micron (1µm = 1/1'000 de mm) d'épaisseur, ou encore une once Troy (31.1 g) d'or peut être étirée en un fil de 80 km de long (à un diamètre de 5 microns); un gramme suffirait pour fabriquer un fil de 2'850 m.

Dans la haute Antiquité le principal usage en était les bijoux et ornements. De 500 av. J-C jusqu'à 450, monnaie et bijoux. L'or monétaire a ensuite plus ou moins disparu en Europe entre les années 450 et 1500. Puis de nouveau gros usage monétaire et de thésaurisation jusqu'en 1920. Depuis lors la thésaurisation par les privés et les Etats domine.

La consommation actuelle utilise tout l'or de la production minière plus celui de récupération et, de nos jours, la demande excède le plus souvent l'offre. Les principaux consommateurs sont: 1) l'Inde 800 tonnes, dont plus de 400 tonnes importées; 2) la Chine (600 tonnes?); 3) l'Italie (~400 tonnes); 4) USA; 5) l'Arabie Saoudite. La Suisse en consomme environ 50 tonnes/an.

### > Bijouterie

Du fait de sa faible dureté, l'or pur (24 carats ou K- le carat est alors une mesure de pourcentage d'or qui peut aussi s'exprimer en %) est généralement allié en bijouterie avec les métaux mentionnés. On connaît de nombreux alliages à 18K (750%), 14K (583%), etc. avec divers pourcentages des métaux mentionnés. Le cuivre est le plus souvent employé, donnant une couleur rose à rouge. D'autres donnent des teintes bronze, bleu, etc. ou blanc (avec de l'argent ou du palladium) ou gris (avec du nickel).

### > Médecine

Certains sels d'or sont utilisés dans le traitement de l'arthrite. Mais le gros de l'usage médical réside dans la dentisterie (couronnes ou bridges permanents).

### > Usages industriels

Dans l'industrie l'électronique, les industries électriques et spatiales en sont les principaux consommateurs, notamment du fait de la bonne conductibilité électrique de l'or. On l'applique par exemple sur les fenêtres des grands immeubles pour réfléchir la chaleur des rayons solaires. Il protège ainsi de nombreux satellites, assure la protection thermique des scaphandres d'astronautes ou de moteurs d'avions à réaction ainsi que contre les infra-rouges. On le retrouve dans le dégivrage des vitres de cockpits d'avions en y faisant passer un courant électrique. Il a encore de nombreux usages en électronique: dans les CD, les connexions électriques sensibles, les câblages électroniques coûteux, etc. Enfin, de grands événements ou réalisations sont très souvent récompensés par des médailles ou trophées en or tels les Jeux Olympiques ou la Coupe du Monde de football. Il y a encore d'autres récompenses dorées pour les Prix Nobel, les Oscars du cinéma, la Palme d'Or de Cannes, les Emmy Awards, etc. La plus grande pièce d'or jamais fabriquée le fut à Perth (W Australie) en octobre 2011. Poids: 1'010 kg; diamètre: 78.7 cm; épaisseur: 11.9 cm; valeur au 31-10-2011: \$ 53.5 millions. Face, la reine Elizabeth II et pile, un kangourou. Le travail a duré 18 mois!

### 2.3 PRIX ET ÉCHANGES MONÉTAIRES

L'unité poids de base est ici l'once Troy (oz) qui vaut 31.15 grammes. Donc un kg d'or est égal à 32.15 oz. Le prix de l'or, longtemps stable (cf. infra), a beaucoup varié depuis 1971 et est déterminé par une procédure appelée Gold Fixing à Londres, qui comporte deux fixations par jour du prix de l'once par des banquiers et qui fournit ainsi une valeur quotidienne moyenne aux banques, aux spéculateurs et à l'industrie. Dans le système monétaire de l'étaillon-or un certain poids d'or correspondait à une valeur monétaire. Depuis longtemps ce prix est fixé en dollars US (autrefois en GB£) et pendant longtemps le gouvernement US l'avait fixé à \$ 20.7/oz. Mais en 1933 le président F. Roosevelt décida une dévaluation de dollar et la parité devint \$ 35/oz. On pouvait alors, au moins en principe, échanger des dollars contre de l'or. En mars 1968 les conditions économiques (surtout la guerre du Vietnam) et l'inflation entraînèrent la fin du «gold pool» et un système à double prix de l'or entra en vigueur, banques et marché privé. Cela prit fin en 1973 quand le prix de l'or fut définitivement laissé à la liberté du marché. Les banques centrales détiennent encore d'importantes réserves d'or bien que leur niveau ait eu tendance à baisser jusque vers les années 2008-2010 (cf. tableau 2). Mais elles ne recèlent qu'environ 19 à 20% de l'or extrait. Les réserves d'or par personne dans les banques centrales figurent au tableau 2. Depuis 1971 le prix de l'or a énormément varié, de quelques dizaines de dollars à un premier sommet de \$850/oz (= \$2'466 en \$ actuels) le 21 janvier 1980 (2e choc pétrolier), puis à un creux de \$253 le 21 juin 1999. Les prix les plus bas ont été enregistrés durant la période 1999-2001 puis ils ont grimpé fortement jusqu'à un sommet de \$1'907/oz (57'000 CHF/kg) en août 2011 pour s'établir ensuite entre \$1'600 et \$1'800/oz. Ils ont fortement baissé au printemps 2013 tombant à environ \$1250-1300/oz en juin (soit 39'000 CHF/kg). De 2001 à 2012 le prix de l'or a quintuplé en termes de \$US, indiquant ainsi la forte dévaluation réelle dudit dollar.

La plus grande partie de l'or transite par l'Europe d'où il est redistribué. Les trois principaux marchés sont Londres, Zurich et Hong Kong. Le *rapport or/argent* a beaucoup varié depuis l'Antiquité. Il a oscillé autour de 10-13 de 700 av. J-C. jusqu'à 1500 de notre ère.

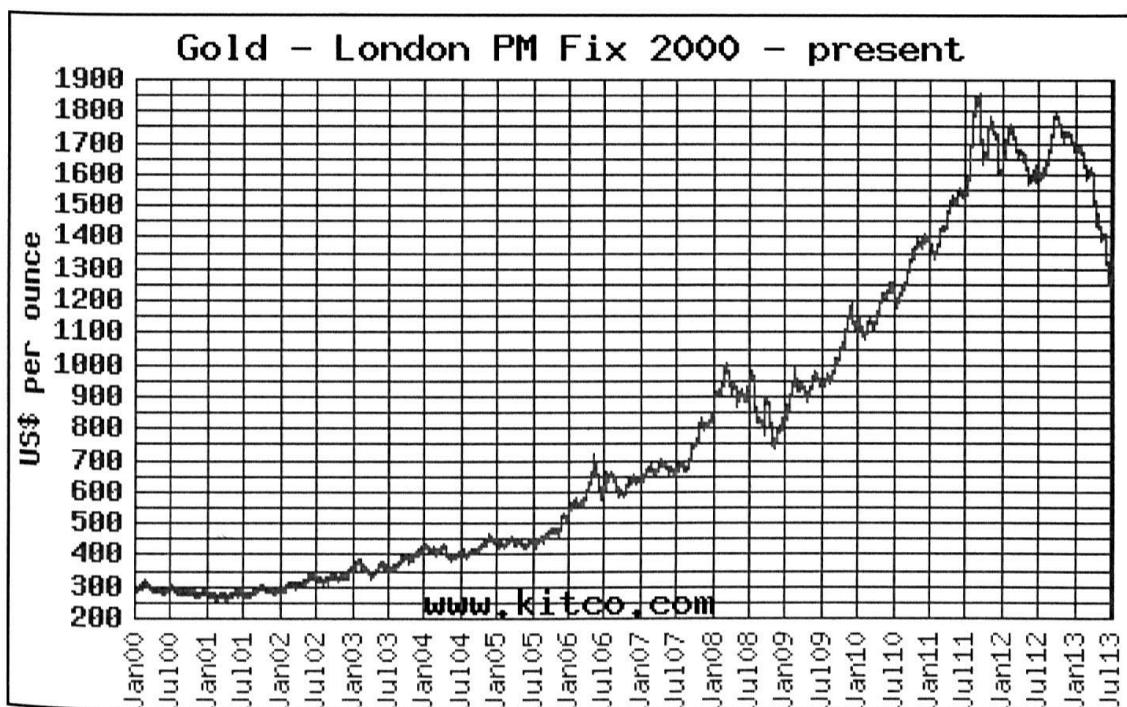


Fig. 1- Prix de l'or de 2000 à 2013

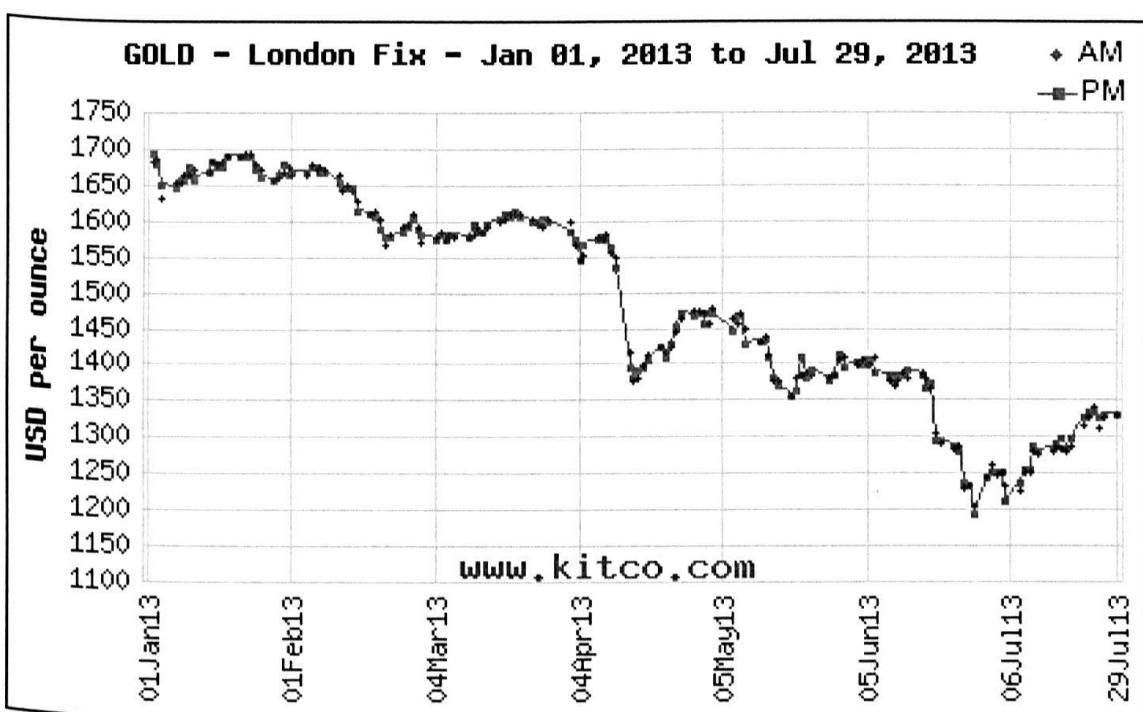


Fig. 2- Prix de l'or en 2013

Rang	Pays ou organisation	Or en tonnes	% du monde	% de l'or dans les réserves nationales	g d'or/ habitant ds banques centrales
1	USA	8'133	26.6	76.6	27 g
2	Allemagne	3'408	11.2	73.9	41
3	FMI	2'907	9.5	-	---
4	Italie	2'452	8.0	73.2	40
5	France	2'435	8.0	73.2	40
6	Chine*	1'054	3.5	1.8	1 (?)
7	Suisse**	1'040	3.4	~80.0	140 (record)
8	Russie	934	2.4	10.1	5.5
9	Japon	765	2.5	3.4	6
10	Pays-Bas	613	2.0	61.1	34
--	Zone euro	10,793	35.3	58.1	---
<b>Total</b>	<b>Monde</b>	<b>30,536</b>	<b>100</b>	<b>-</b>	<b>~ 5 g</b>

\* Les données pour la Chine sont sans doute très sous-estimées et se monteraient plutôt, d'après certains, à 7300-8300 t en 2013.

\*\* En 1997 la Suisse avait encore 2590 t d'or et était 4e (368 g/personne).

Tableau 2. Réserves officielles d'or dans les banques centrales (sept. 2010)

Depuis il a eu tendance à augmenter et a atteint 92 en décembre 1990. Il se situe à présent autour de 60-66, mais n'était que de 35-40 en 2011. Un autre rapport intéressant est le GOR (Gold oil ratio = or/pétrole). Il est en moyenne de 15 et a varié de 6 à 30. Il est en juin 2013 de 12 (=12 barils de pétrole pour une once d'or). L'or se vend sous diverses formes, principalement en barres standard de 12.5 kg (400 oz), 1 kg et 100 oz (3.11 kg) et aussi en de plus petites valeurs, 500, 250, 100 g. Il existe aussi un marché très actif de pièces d'or.

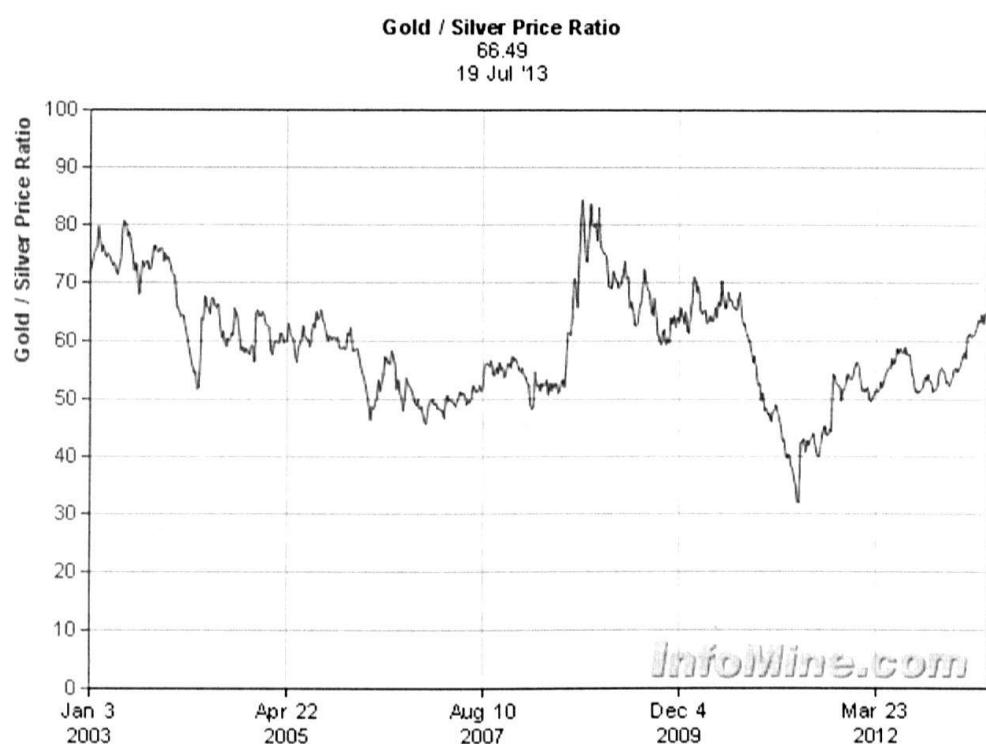


Fig. 3- Rapport or/argent sur 10 ans

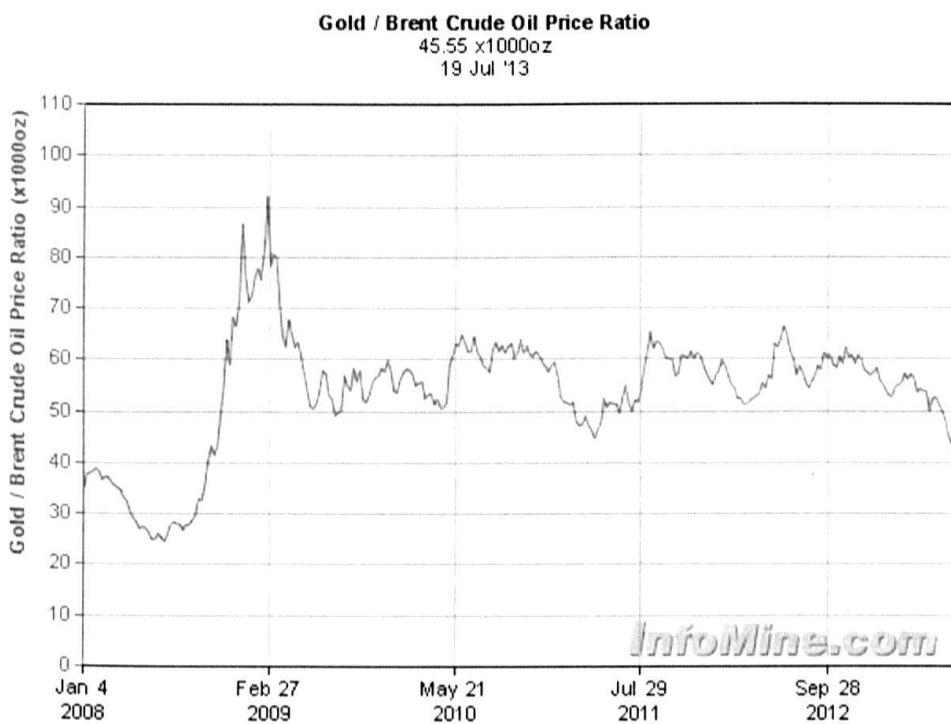


Fig. 4- Rapport or/Brent sur 5 ans

Les coûts opératoires en mine (extraction, transport, traitement) ont beaucoup grimpé passant de \$200/oz en 1999 à \$500/oz en 2005 et à environ \$850/oz en 2012. Il faut leur rajouter les frais de raffinage, de vente, de frais généraux, etc. ce qui amène le coût de production à \$1'200/oz en 2012, sans y inclure les amortissements. Avec ces derniers le coût total est près de 1'600/oz. Les coûts miniers (cash costs) sont très variables d'un pays à l'autre, par ex. en 2012: \$850/oz en Afrique (les plus hauts) contre \$700 en Australie/oz et 600 en Amérique du nord, les plus bas. Mais jusqu'en fin 2012 les prix de l'or ont suivi une pente montante encore plus marquée.

### 3. GÉOCHIMIE ET MINÉRALOGIE

#### 3.1 GÉOCHIMIE GÉNÉRALE

L'or est presque insoluble mais est attaqué par l'eau régale (un mélange d'acides nitrique et chlorhydrique concentrés). Il occupe la place n° 79 dans le tableau de Mendeleïev, entre le platine et le mercure. Il appartient au groupe IB qui comprend encore le cuivre et l'argent. Il y a des similitudes avec le groupe VIII voisin qui contient nickel, palladium et platine. Ainsi le platine (n° atomique 78) n'a qu'un électron de moins que l'or et il y a peu de différences dans le comportement chimique de ces deux éléments; pourtant il n'y a dans la nature quasi aucune relation entre eux. L'or et l'argent (n° atomiques 79 et 47) ont des comportements chimiques assez différents bien qu'ils soient fréquemment alliés. En effet, l'or apparaît souvent en alliage or-argent sous forme d'une solution métallique solide. De tels alliages ont en général une teneur en argent de 8 à 10%. L'abondance terrestre dans la lithosphère supérieure (ou Clarke) de l'or est de 0.005 g/tonne (ou 5 mg/t ou ppb). Ces données dépendent évidemment des types de roches considérées. Cela signifie en clair qu'il faut concentrer cette teneur par 300 jusqu'à 1'500 fois pour obtenir un minerai exploitable économiquement et explique les basses teneurs de la plupart des gisements d'or.

#### 3.2 TENEURS ET TONNAGES

*Les teneurs moyennes* des gisements aurifères varient beaucoup suivant le type de gisement. Dans le district géant du Witwatersrand en Afrique du Sud, les niveaux minéralisés (reefs) montrent des teneurs de 5 à 20 g/tonne, en moyenne 8-9 g/tonne. Cela veut dire que d'une tonne de minerai on récupérera 8-9 g d'or ou encore qu'il faut exploiter 125 tonnes de minerai pour obtenir un kg d'or. Dans les vieux boucliers tels l'est du Canada ou l'ouest de l'Australie les teneurs sont de l'ordre de 3 à 12 jusqu'à 20 g/tonne. Dans le type Carlin (Nevada) on peut descendre jusqu'à 1 g/tonne (1'000 tonnes de minerai pour 1 kg d'or!). Les mines souterraines travaillent à 4-8 g/tonne et les mines à ciel ouvert à 1-3 g/tonne. Quand l'or est un sous-produit du cuivre, les teneurs sont le plus souvent bien inférieures à 1 g/tonne (cf. infra). *Les tonnages* varient aussi beaucoup. Le plus grand district aurifère est celui du Rand en Afrique du Sud qui a produit au moins 60'000 tonnes d'or à partir de plus de 6 milliards de tonnes de minerai. Avec les réserves restantes on aurait un total d'environ 70'000 tonnes d'or. D'autres grands gisements comptent entre 3'000 et 1'000 tonnes d'or (tableau 3). En 2010 les 13 plus grandes mines avaient produit 1'120 tonnes soit 44.5% de la production et les petites mines (<30 t/an) le solde. Beaucoup de gisements moyens contiennent (ou contenaient) de 500 à 100 t de métal. Et d'innombrables moins de 50 tonnes, parfois seulement 5-10 tonnes. Du fait de la grande valeur de l'or il y encore un important artisanat de petites mines produisant environ 20% de l'or mondial.

Gisement et pays	Minérai en Mt	Or en t (avec les réserves)
Witwatersrand S Africa	60'000	70'000
Olympic Dam Australie S	8'500 (Au co-prod de Cu, U)	8'000
Kalgoorlie Australie W	>100	4'000
Mother Lode Calif. USA	>100	>1'000
Homestake Dakota S USA	120	1'200
Carlin Nev. USA	>300	>3'000
Abitibi Belt Ont-Que Canada	>200	>3'000
Mouraki N-Zél.	16	1'360
Chuquicamata Chili	10'000 (Au co-prod. du Cu)	8'000

Tableau 3. Quelques grands gisements ou districts aurifères

### 3.3 MINÉRALOGIE SIMPLIFIÉE

Le plus souvent l'or est sous forme d'or natif et cristallise dans le système cubique à faces centrées. On le trouve en très petites particules ou sous forme de paillettes, de grains ou de plus grande pépites. Il est souvent allié à l'argent et appelé électrum dès que la proportion d'argent atteint 20%. Il s'associe aussi au fer (sulfures, carbonates ou oxydes), au cuivre, à l'arsenic, au bismuth. Il se combine parfois avec le tellure et le sélénium pour former des tellurures et des séléniums. Le tellure est un élément rare qui est collecté et concentré avec l'or. Des tellurures tels la petzite ( $Ag_2AuTe_2$ ) et la calavérite ( $AuTe_2$ ) sont connus à Kalgoorlie (Australie), Cripple Creek (USA), etc. L'or forme souvent aussi de minuscules inclusions dans de nombreux sulfures et arsénio-sulfures (pyrite, chalcopyrite, arsénopyrite). Dans la plupart de ces minéraux et dans les sulfosels le rapport  $Au/Ag$  est << 1.

## 4. PRINCIPAUX TYPES DE GÎTES D'OR ET EXPLORATION

### 4.1 LES DIFFÉRENTS TYPES DE GÎTES D'OR ET LEUR CADRE GÉOLOGIQUE

En simplifiant beaucoup il y a cinq grands types de gîtes d'or qui seront passés en revue ici.  
 > *Filons, amas et stockwerks associés à d'importantes zones de cisaillement* (shear zones) très fracturées et faillées, souvent avec du quartz et des carbonates, la plupart du temps dans des terrains du Précambrien (plus anciens que 600 Ma =millions d'années) comme en Afrique de l'ouest, Brésil, Sibérie, et même archéens (plus vieux que 2'500 Ma) ainsi qu'en Inde, Canada E, Australie W. Dans le Bouclier Yilgarn en Australie W et dans la Province Supérieure (Ontario, Québec) plus de mille gisements (dans chaque région) de ce type sont connus, la plupart avec 2 tonnes d'or ou moins (=80 millions de CHF!). Dans la Province Supérieure 30 gîtes au moins contiennent plus de 50 t d'or et le district de Porcupine seul en a produit plus de 2'600 tonnes. Le bloc Yilgarn a produit plus de 5'000 tonnes dont environ 2600 tonnes pour le district de Kalgoorlie dont le total (production passée + réserves) doit tourner autour de 4'000 tonnes. Les teneurs y ont décrue de 40 g/tonne en 1900 jusqu'à  $\leq 5$  g/tonne à présent. Durant les années 1980 et début 1990 plus de 50 gîtes y furent découverts ou redécouverts.

La fracturation des roches a favorisé la circulation des fluides minéralisateurs. Le contrôle structural est donc très net. Ces failles ont guidé l'arrivée du volcanisme ainsi que des minéralisations. Les altérations hydrothermales, causées par l'interaction des fluides avec les

roches-hôtes, sont très importantes et marquées par des apports de silice, potasse et or. La minéralogie des minéraux consiste en or natif (dominant), tellurures, arsénopyrite, pyrite, etc. L'or peut être libre ou associé aux sulfures, ce qui en rend le traitement plus complexe.  $Au/Ag = 5 à 20/1$ . Les filons sont faits de quartz grossier, mais aussi parfois beaucoup plus fin. Ces gisements se sont formés lors de l'afflux d'énormes quantités d'eaux faiblement salées et très chaudes ( $280^{\circ}$ - $450^{\circ}C$ ), qui ont lessivé les métaux contenus en faible quantité dans d'énormes volumes de roches. Elles ont circulé le long des zones de cisaillement et ont déposé l'or par baisse de la pression et de la température. On appelle aussi ces gisements mésothermaux.

> *Filons, amas et stockwerks, dits épithermaux*, souvent riches en argent. Ils sont associés à des roches beaucoup plus jeunes, toujours des ensembles volcaniques tertiaires ( $<65$  Ma, mais le plus souvent  $<20$  Ma et même  $<10$  Ma) avec de forte altérations hydrothermales, dues à des circulations d'eaux chaudes à des températures de  $150^{\circ}$ - $300^{\circ}C$ . Ils ont été formés à faible profondeur ( $<600$  m) et souvent en relation avec des intrusions de faible profondeur et à proximité de systèmes géothermiques actifs ou fossiles. Les minéraux sont l'or natif, mais aussi beaucoup de sulfosels, de tellurures d'or, avec quantité de soufre. Le cuivre, le mercure et l'argent sont souvent présents. Dans l'ensemble ces gisements épithermaux se trouvent en Amérique andine, Mexique, Asie du SE, USA avec les principaux gisements tels que Comstock, Creede (USA), Pachuca (Mexique), El Indio (Chili), Indonésie.

> *Type Carlin*. Minéralisations disséminées multiformes dans des carbonates envahis par des intrusions granitiques. Ces gisements sont principalement connus au Nevada et dans quelques autres états des USA. L'argent et le mercure sont de fréquents sous-produits. Les tonnages varient de 5 à 80 millions de tonnes de minerai à 1-13 g/tonne et les ressources peuvent être bien plus importantes. Les nombreuses failles normales ont canalisé les fluides hydrothermaux dans les niveaux favorables et ont accru la perméabilité du piége par la création de brèches qui sont souvent hôtes de la minéralisation. Beaucoup de ces gîtes sont crétacés mais aussi plus jeunes (éocènes). En général seul l'or natif est présent en très petits grains. L'or forme des films très fins ( $<1$   $\mu$ m) sur la pyrite, l'arsénopyrite et du carbone amorphe, le tout enrobé de silice. Ces gîtes sont plutôt mésothermaux et ne doivent pas être confondus avec les épithermaux volcaniques. Les analyses indiquent une formation à 2.4 km de profondeur et des températures de  $200^{\circ}$ - $330^{\circ}C$  pour la phase principale.

> *Placers récents (tertiaires et quaternaires)*. Des dépôts d'or éluvionnaires et alluvionnaires sont connus un peu partout dans le monde (Californie, Yukon, Victoria, Congo, Afrique, Amérique andine, Brésil...) et ont été appelés «la mine du pauvre». Ils se présentent dans des sables et des graviers de chenaux de cours d'eau, actuels ou anciens: l'or s'y est accumulé sous forme de longs rubans appelés «run» ou «passe payante». L'or est sous forme de très petits grains ou en une fine poussière, quelquefois aussi en pépites de quelques dizaines à quelques centaines de grammes, rarement plus. La plus grosse vraie pépite, la «Welcome Stranger» de 72 kg a été trouvée au Victoria (Australie) en 1869. NB: une sphère en or massif de 72 kg aurait 20 cm de diamètre, à peu près la taille d'un petit ballon de football. En lavant le gravier avec un pan (ou batée) ou tout autre instrument, on récupère facilement les particules d'or. Leur titre est élevé, en général autour de 900-950‰, mais tombe parfois à 500‰. L'or provient de la destruction par l'érosion de roches plus anciennes qui contenaient des petits grains d'or très disséminés. Comme les placers étaient faciles à exploiter, ils ont été

travaillés depuis l'Antiquité et beaucoup sont maintenant épuisés, sauf en Sibérie orientale et au Brésil (tableau 4), mais des petites exploitations artisanales existent encore un peu partout en Afrique et en Amérique du sud.

Placer(s) et pays	Date découverte	Production en tonnes or
Californie USA	1848	2'000
Fairbanks Alaska	1903	225
Bendigo-Ballarat Vict. Austral.	1851	680
Otago N-Zélande	1880	250
Klondike- Yukon Canada	1896	400
Kilo-Moto Kivu Congo	1903	250
Saldana + autres Colombie	1537	1'500
Challana + autres Bolivie	1500	340
Chili	16 <sup>e</sup> siècle	330
Sibérie orient.	1838-1850	500 (?)
<b>Total</b>		<b>8'500 tonnes</b>

Tableau 4. Quelques grands placers aurifères (>150t or)

> *Placers anciens ou paléoplacers.* Ceux-ci sont des placers fossiles, lithifiés. Il y en a peu de niveau économique. De loin les plus importants sont les conglomérats à quartz-or-pyrite du Witwatersrand en Afrique du Sud. Ces très vieilles roches (2'500-3'000 Ma) étaient à l'origine des larges chenaux fluviatiles dans lesquels des grains d'or natif et quelques autres minéraux comme la pyrite et quelquefois l'uraninite (UO<sub>2</sub>) ont été déposés par gravité après érosion et transport des minéraux. L'or et l'uraninite provenaient de roches voisines plus anciennes. Ces dépôts alluviaux se sont transformés en roches en se durcissant. Les grains d'or sont quasi invisibles (10 à 100 µm). Les galets de quartz arrondis ont de 1 à 4 cm de diamètre. Les teneurs sont en moyenne de 6 à 12 g/t d'or. Le bassin sédimentaire complet a 14,000m d'épaisseur et couvre 30'000 km<sup>2</sup>! Toutefois l'or ne se trouve que dans des bancs de conglomérats très durs, d'un mètre d'épaisseur en moyenne et qui représentent moins de 10% de la série sédimentaire fertile du Central Rand (la principale) dont l'épaisseur est de 1800 m. Ce district a produit plus de 60'000t d'or ainsi que 160'000t d'uranium (comme sous-produit de la production d'or) à des teneurs moyennes de 300-400 g/t U, teneurs non économiques dans des gisements d'uranium ordinaires

> *Les gisements décrits ci-dessus ont produit environ 90 % de l'or extrait.* Les autres 10% proviennent de minerais où l'or n'est qu'un co- ou un sous-produit de mines de cuivre ou de cuivre-zinc. Le meilleur exemple en donné par les énormes porphyres cuprifères qui produisent actuellement 75 % du cuivre mondial (Chili, Pérou, USA, Indonésie) ou les amas sulfurés massifs (VMS) si abondants dans le bouclier archéen du Canada. L'or est présent dans ces deux types à de très basse teneur, 0.1-1 g/tonne dans les porphyres et 1-2 g/t dans les VMS. Ces faibles valeurs sont compensées par les énormes tonnages (>100'000 tonnes/jour) qui rendent sa récupération économique. A 0.3 g/t, 100'000 t/j de mineraux fourniront 30 kg/jour d'or, d'une valeur de l'ordre de 1.3 millions de CHF.

Type de gisement	% de l'or inventorié (P+R)*	même tableau sans le Rand
Filons et amas dans les cisaillements (shear zones)	15%	27%
Gîtes épithermaux	10	18
Type Carlin	5	9
Paléoplacers (Rand)	45	1
Placers récents	9	16
Porphyres cuprifères	6	11
Autres	10	18
Totaux	100%	100%

\* P+R indique les tonnages déjà exploités plus ceux en réserves

Tableau 5. Distribution approximative de l'or inventorié dans les différents types de gîtes

#### 4.2 EXPLORATION

L'exploration pour découvrir de nouveaux gisements est essentielle dans l'industrie minière. En effet les ressources minérales ne se renouvellent pas et une fois qu'une tonne de mineraux a été exploitée, elle ne repoussera pas et devra tôt ou tard être remplacée par une nouvelle tonne! C'est pourquoi les sociétés minières intelligentes consacrent des budgets importants à cet effet car elles savent que leur futur en dépend. Malheureusement quand les choses vont mal dans l'industrie ou dans une compagnie, le premier département à souffrir de réduction, voire de suppression, est le plus souvent celui de l'exploration. Cela explique la grande variation des budgets d'exploration mondiaux d'une année à l'autre. Par exemple, il y a eu une croissance de six ans de 2003 à 2008, année du record absolu de 14 milliards de dollars. Ensuite les budgets ont baissé de plus de 40% à \$8 milliards en 2009. Les prix des métaux étant remontés en 2010, les montants alloués à l'exploration ont augmenté de 30% à \$10 milliards et mieux encore à 14 milliards, (+ 40%) en 2011 dont 8.5 milliards pour l'or seul. Dans les budgets d'exploration globaux la part de l'or domine toujours, avec des pourcentages variant entre 45% et 75% suivant les régions considérées, avec une moyenne autour de 60%.

L'exploration pour les métaux (et les minéraux industriels) n'est que la première étape d'un processus long, risqué et coûteux qui a pour objet de découvrir des gisements susceptibles d'être exploités économiquement et de fournir ainsi des métaux (et autres substances minérales) à l'économie. L'exploration se trouvant au début du processus est donc très risquée et coûteuse aussi (plusieurs millions à dizaines de millions de dollars) et souvent longue (4 à 10 ans ou plus parfois). Ainsi, à présent, il faut compter au moins de 8 à 18 ans pour arriver à ouvrir une mine prête à fonctionner, un peu moins pour l'or. Les lois environnementales sont de plus en plus sévères dans la plupart des pays avancés et l'étude d'impact sur l'environnement peut durer plusieurs années. Enfin les coûts de développement d'un gisement ont augmenté exponentiellement. (cf. paragraphe 2.3).

L'exploration utilise les moyens classiques de la géologie (cartes, coupes, profils...), la géochimie de surface (en sols, sédiments de rivières, eaux, roches) et la géophysique (utilisation de méthodes physiques pour tester le sous-sol) et enfin divers types de sondages et de sondes. Ces méthodes sont à présent bien soutenues par de multiples méthodes analytiques

qui permettent d'affiner et d'accélérer les résultats. Ce qui suit dans le processus (faisabilité, construction, exploitation) ne relève plus directement de l'exploration.

> *Les « Juniors ».* Ce sont de petites sociétés d'exploration, agressives, mobiles et rapides. Elles reposent entièrement sur un financement par la bourse. Elles existent surtout au Canada où on en compte au moins 200 et aussi un peu en Australie. Après la découverte de bons indices de minéralisations et des travaux préliminaires plus ou moins importants, elles tâchent de revendre leurs propriétés à des « majors », des sociétés ayant pignon sur rue, parfois en y gardant un pourcentage ou quelque forme de royalties. Ces juniors comptent pour une large part de l'exploration de base (dite grass root) et des dépenses y afférentes. Les juniors canadiennes ont levé en bourse \$ 33 milliards durant les six années de 2003 à 2008!

## 5. BRÈVES CONCLUSIONS

Il faut donc absolument de nouvelles découvertes et si possible de grandes dimensions. Alors que la demande d'or augmente fortement, notamment du côté de la Chine, la production minière a dans l'ensemble eu tendance à baisser d'environ 5% par an depuis 2001, avec une certaine reprise en 2011 et 2012. On a vu une chute en Amérique du Nord, de 539 à 370 tonnes en 10 ans (31%), avec une reprise depuis 2011 (419 tonnes en 2012). Dans de riches territoires aurifères comme l'Abitibi Belt au Canada ou la Carlin Trend du Nevada, on n'a plus découvert de districts géants depuis plus de dix ans (bien qu'il semble qu'une découverte importante puisse être bientôt annoncée dans l'Ontario). Le trio des trois plus grandes compagnies produit environ 300 tonnes d'or par an. Cela signifie qu'au moins un gisement de plusieurs millions d'onces (un million d'onces = 31.1 tonnes) devrait s'ouvrir chaque année pour remplacer ce qui a été produit: on est pour le moment bien loin du compte!

Le problème est qu'il n'y a plus beaucoup de terrains vierges et les géologues sont ainsi obligés d'aller au-delà des dernières frontières géologiques, souvent dans des pays émergents comportant des risques géopolitiques comme la Mongolie où a eu lieu une des rares découvertes de classe mondiale de cette dernière décennie ou l'Équateur, deux pays où les problèmes administratifs sont pendents. Enfin il est notoire que la Chine (le marché de Shanghai a livré 6'300 tonnes d'or de 2009 à 2012) tente par tous les moyens de s'approprier tout ou partie de l'or mondial, soit en achetant des mines, des participations dans les sociétés minières ou la production directe de ces mines ou encore en raflant tout ce qui traîne sur les marchés. Y en aura-t-il assez pour tout le monde?