

# AFFINAGE HYDROMÉTALLURGIQUE DES PRECONCENTRÉS D'OR DE MADAGASCAR

Simon RAKOTOARISON, Roger RANDRIANJA, Rado ANDRIANAINA

---

## RÉSUMÉ

L'or est le métal qui existe un peu partout à Madagascar. Il a été exploité depuis le début du 19<sup>ème</sup> siècle mais d'une manière artisanale. C'était entre 1960 et 1970 que la production d'or a atteint son maximum de 15 tonnes par an. A Madagascar, l'activité d'exploitation d'or génère d'emplois informels et de revenus pour les artisans mineurs lorsque des gisements sporadiques sont découverts dans des zones aurifères. La formalisation de l'activité de l'or est difficile si bien que la production officielle annuelle est loin d'être la réalité. Les chiffres de la production annuelle de certaines années ne reflètent guère la réalité (28.1 kg en 1963 contre 13 740 kg en 1964 ; 13 kg en 2004 contre 2801 kg en 2001). L'État doit faire un effort d'organisation et de gestion pour rendre l'activité aurifère formelle et que cette dernière génère comme il se doit comme en 1969 (20 136 kg), des revenus décents et stables et pour les exploitants et pour l'État. Notre étude est plus précisément, axée sur la proposition d'une méthode d'affinage de minerais d'or pour minimiser les pertes des produits dans les chantiers aurifères de Madagascar et pour que la production d'or de qualité soit appréciables dans les années à venir.

Mots clés : Or, métal, gisement, aurifère, affinage, exploitants, production et traitement.

## INTRODUCTION

La métallurgie de l'or est conduite généralement en deux étapes, sa mise en solution et son extraction à partir de solutions aurifères, puis l'affinage du métal. Au préalable, des opérations de séparations de phases visent à éliminer les phases minéralogiques gênantes. Le procédé de mise en solution s'effectue le plus fréquemment par cyanuration, et l'extraction par cémentation ou adsorption sur charbon actif. En théorie, le traitement des effluents et des stériles, et éventuellement la destruction des cyanures, devrait être conduit sous contrôle strict par des méthodes éprouvées qui doivent être suivies.

Notre travail se divise en quatre parties qui sont :

- ✦ Les différents traitements des minerais d'or,
- ✦ La chimie de l'or,
- ✦ Les essais d'affinage au laboratoire
- ✦ et la proposition de méthode d'affinage des préconcentrés d'or.

### I. LES TRAITEMENTS DES MINERAIS D'OR [W1, W2]

#### A. LA MINÉRALURGIE

A chaque apparition d'or dans le minerai, correspond des méthodes minéralurgiques différentes conduisant à des concentrés de teneurs variées et des récupérations variables selon les cas. En effet, la première observation à faire est la dimension des grains d'or libres ou de minéraux porteurs, notamment des sulfures.

Les méthodes minéralurgiques courantes sont généralement simples dans leur principe. L'enrichissement par gravité s'applique essentiellement à l'or libre des placers, mais il peut aussi être combiné à la flottation des sulfures porteurs d'or. Dans le premier cas, on effectue souvent un débouillage suivi d'un criblage avant la séparation gravimétrique. Dans le deuxième cas, il est nécessaire de concasser et de broyer le minerai. Comme règle générale, la présence de quantités raisonnables d'or grossier nécessite un traitement par gravité sur les refus de criblage après concassage et sur les sousverses du cyclonage après broyage.

## B. L'HYDROMÉTALLURGIE [9]

Dans la majorité des cas, l'hydrométallurgie de l'or est basée sur sa mise en solution par le cyanure (le métal est alors contenu dans la liqueur d'attaque). Elle est appliquée selon deux techniques :

- la lixiviation dynamique en réacteur agité mécaniquement en usine
- et la lixiviation statique en tas ou en fosse en plein air.

Dans les deux cas, le minerai a subi auparavant des opérations plus ou moins complexes de prétraitement. Dans le cas d'un traitement conventionnel en usine, le minerai issu de l'exploitation minière est concassé et broyé avant d'être lixivié.

Lorsque les particules d'or sont facilement libérables et assez grossières ( $> 75 \mu\text{m}$ ), la concentration gravimétrique peut rejeter un stérile définitif et fabriquer un préconcentré. On peut ainsi atteindre des coefficients de concentration très élevés (de 100 à 1 000 g / t). Lorsque l'or est associé étroitement à des sulfures métalliques, la concentration par flottation conduit à produire un préconcentré des sulfures. Si la proportion d'or libre est élevée, celui-ci est extractible auparavant par voie gravimétrique...

## C. MÉTALLOGÉNIE DE L'OR [9]

Les gisements d'or sont considérés de nature hydrothermale et l'or se retrouve dans les trois systèmes hydrothermalismes (hypo, méso et épithermal). L'or est souvent associé aux amas pyriteux magmatique profond dont les roches mafiques et ultramafiques telles que les dolorites et les autres roches.

## D. LA FLOTTATION [11]

La flottation est un procédé qui fait partie intégrante de traitement de minerais complexes ou réfractaires intervenant comme procédé de concentration en tant que complément de récupération de l'or fin libre non libéré ou existant à l'état de tellurure et échappant à l'amalgamation, à la concentration gravimétrique ou à la cyanuration.

On peut donc proposer la flottation comme étant le procédé le plus fiable pour la récupération de l'or fin libre.

La flottation remplace le lavage gravimétrique et assure la récupération de l'or libre et du métal associé aux sulfures habituels (pyrite, arsénopyrite et sulfures de cuivre) ou combiné au tellure.

## E. L'AMALGAMATION [8, 12]

Madagascar a produit de l'or depuis 1883 et l'orpaillage artisanal ou le préconcentration à la batée artisanal (méthode gravimétrique) reste de loin le mode de production adopté jusqu'à ce jour. Mais les mineurs de Madagascar n'utilisent pas la méthode de concentration au mercure encore moins celle de concentration par cyanuration, c'est pourquoi que les résidus des traitements sans mercure ni cyanure sont encore riches en particules fines d'or.

Le sol de Madagascar regorge beaucoup d'or, mais malheureusement les méthodes utilisées restent traditionnelles et l'affinage de l'or, afin de lui attribuer une valeur compétitive sur le marché mondial, n'est pas connu de tout le monde même en restant artisanal. Seuls quelques bijoutiers le pratiquent et toujours d'une manière artisanale.

Avec une amélioration de la gestion de cette ressource et des efforts de modernisation des modes d'exploitation, l'or pourrait aider au développement socio-économique de Madagascar. Aussi pour développer cette filière, nous proposons une méthode améliorée d'affinage du pré concentré d'or. Cette méthode pourrait être vulgarisée auprès des artisans et opérateurs dans le secteur or.

L'extraction par le mercure est considérée comme un procédé de dissolution. En effet, si l'or est soluble dans le mercure ou s'il peut former avec ce dernier des composés tels qu' $\text{Au}_2\text{Hg}_2$  et  $\text{Au Hg}_2$  stable au dessous de leur point de fusion respectif  $420^\circ\text{C}$  et  $310^\circ\text{C}$ , l'amalgamation est un procédé d'adhésion applicable en pratique en présence d'eau seulement.

Quelque soit la méthode employée (table ou fût), les grains métalliques libérés, insolubles dans l'eau sont mouillés dans le mercure. S'ils sont mis au contact de deux liquides, ils auront tendance à traverser l'interface (eau-Hg) et à pénétrer dans l'Hg qui les absorbera. La pénétration et la digestion de l'or ou de l'argent imposent certaines conditions (propreté des surfaces métalliques, absence d'impuretés nuisibles).

Le processus normal est analogue à celui des mouillages des sulfures par l'huile ou par l'air. Il peut être considéré comme une réduction de l'énergie superficielle d'un système dans lequel une interface Au - Hg aurait été substituée aux deux interfaces (Au -  $\text{H}_2\text{O}$ ) et ( $\text{H}_2\text{O}$  - Hg)

#### F. LES MÉTHODES ARTISANALES

L'extraction minière artisanale et à petite échelle de l'or repose sur des techniques rudimentaires que les mineurs travaillant dans de petites et moyennes exploitations utilisent pour extraire l'or. D'ordinaire, les pratiques suivies sont simples et nécessitent peu d'investissement économique.

A Madagascar, point n'est besoin de faire constater que la production artisanale de l'or repose à 90 pourcent sur le traitement à la batée (méthode gravimétrique artisanale) dans les gisements alluvionnaires, dans ou à proximité des fleuves et rivières. Peu de gens utilise le mercure, à l'exception de quelques sociétés détenant des permis officiels et réglementaires à cet effet alors que dans beaucoup de pays producteurs d'or, c'est le mercure qui est souvent utilisé pour séparer le métal du minerai.

Dans le monde entier, au moins 100 millions d'individus répartis dans 55 pays travaillent dans les mines d'or pour leurs moyens de subsistance. Il est estimé que cette forme d'extraction par le mercure représente 20 à 30 % de la production aurifère mondiale, soit environ 55 à 800 tonnes par an. [W3] ;

#### G. LE PROBLÉMATIQUE DE L'AMALGAMATION AU MERCURE [19]

L'amalgamation du minerai entier consiste à additionner du mercure à l'ensemble du minerai en cours de traitement après le broyage, la pulvérisation ou le lavage au « sluice ». Ce mode d'utilisation du mercure est plus polluant que toutes les autres méthodes. Dans bon nombre de cas, seul un dixième du mercure injecté dans l'amalgamateur ou dans la batée (s'il s'agit d'une amalgamation manuelle) se combine avec l'or pour produire l'amalgame. Le reste (90 %) est excédentaire et doit être récupéré et recyclé, faute de quoi il est rejeté dans l'environnement.

Le procédé d'amalgamation du minerai brut entraîne des niveaux élevés de concentrations de mercure dans l'environnement sur le plan local ainsi que des problèmes de santé aigus dus à l'exposition au mercure, aussi bien chez les mineurs que chez les autres membres d'une collectivité. Selon des études réalisées dans des localités où ce procédé est appliqué, les plus fortes concentrations de mercure s'observent dans le sol, les sédiments et les poissons.

C'est la concentration gravimétrique ou « lavage à la batée » qui est le procédé couramment utilisé à Madagascar. L'addition de mercure aux concentrés a pour effet d'amalgamer ou d'assembler les fines particules d'or. Cette pratique résultant d'une amélioration de la méthode d'amalgamation du minerai entier occasionne 10 à 15 % des pertes de mercure dans le domaine de l'extraction minière artisanale de l'or.

Le brûlage de l'amalgame est un autre procédé de récupération de l'or qui consiste à chauffer l'amalgame. L'amalgame est brûlé à l'air libre sur une pelle ou dans un récipient métallique. Sur le plan mondial, cette pratique produit des émissions atmosphériques de mercure de l'ordre de 300 tonnes par an (Partenariat mondial sur le mercure, 2006). L'utilisation de la cornue permet de recueillir la vapeur de mercure et d'empêcher sa libération dans l'atmosphère, de manière à réduire les risques pour la santé des mineurs, de leurs familles et de la collectivité locale. Les cornues sont des dispositifs de conception relativement simple qui peuvent récupérer une bonne partie du mercure vaporisé émanant de l'amalgame.

L'exposition au méthylmercure, même à de faibles doses, provoque des troubles neurologiques particulièrement dangereux chez les femmes en âge de procréer. La présence de fortes concentrations de mercure dans le lait de mères allaitantes au sein des communautés de mineurs artisanaux représente un risque particulièrement grave pour les nourrissons.

Des enquêtes menées sur le plan mondial dans les zones d'extraction minière artisanale de l'or révèlent des taux de contamination élevés chez les mineurs. Dans certains cas, les niveaux d'exposition sont plus de 50 fois supérieures aux valeurs limites déclarées par l'Organisation mondiale de la santé (OMS). Dans un site de projet, on a observé chez près de 50 % des mineurs des tremblements involontaires, qui sont des symptômes caractéristiques d'une atteinte du système nerveux central due au mercure.

Le procédé d'amalgamation du minerai entier est une source de contamination à grande échelle, mais il est fréquemment utilisé du fait qu'il constitue pour les mineurs un moyen facile et économique d'extraire rapidement de l'or. La mesure la plus importante que pourrait prendre une communauté minière pour réduire sa consommation de mercure consiste à concentrer la partie du minerai qui contient de l'or avant l'apport de mercure. Pour ce faire, les mineurs peuvent broyer et pulvériser le minerai pour obtenir des particules plus fines et utiliser des sluices magnétiques ou garnis de tapis et des techniques de séparation par gravité comme le lavage à la batée et la centrifugation. Cette pratique permet de capter plus de particules d'or, de consommer moins de mercure et de récupérer entièrement le mercure résiduel.

#### H. LES ALTERNATIVES DE REMPLACEMENT DU MERCURE [20]

Les méthodes de concentration ou de séparation par gravité (sluices à fond tapissé, dispositifs magnétiques, centrifugeuses, etc.) peuvent réduire sensiblement et, dans certaines circonstances, éliminer totalement l'utilisation du mercure. L'or provient de dépôts alluviaux de minéraux (or libre) et des solutions de rechange totalement dépourvues de mercure pourraient être disponibles localement à un coût dérisoire.

La cyanuration est le procédé le plus prometteur pour le remplacement intégral de l'utilisation du mercure dans le traitement de tout minerai aurifère mais elle pourrait ne pas être financièrement ou techniquement accessible aux mineurs artisanaux. De plus elle doit être utilisée et mise en œuvre avec précaution en raison des risques importants qu'elle comporte pour la santé des personnes et l'environnement. Il importe de retenir que le cyanure et le mercure ne devraient en aucune manière être utilisés ensemble, car cela pourrait intensifier considérablement la pollution et les risques en matière de santé. [W3].

## II. LA CHIMIE DE L'OR [8, 13]

L'or est l'élément chimique de numéro atomique 79, de symbole Au (du latin *aurum*), de poids spécifique de 19,3 t / m<sup>3</sup> et de point de fusion de 1063°C. Le corps simple or est un métal précieux très recherché et apprécié sous forme de parures ou de pièces de monnaie depuis l'aube des temps historiques. A l'état naturel, ce métal se présente sous forme de pépites qui peuvent être réduites en poudre ou en paillettes par érosion mécanique. L'or est un métal rare, de couleur jaune très brillant. Il est malléable, se façonne et se transforme facilement.

L'or peut se présenter sous trois valences, valence I (AuCl), valence II (AuCl<sub>2</sub>), valence III (AuCl<sub>3</sub>), ce qui indique sa réactivité sur plusieurs molécules, et qui, d'ailleurs rend complexe les réactivités des molécules chimiques nécessaires aux traitements des minerais contenant l'or.

L'or est très ductile et peut être étiré pour en faire des fils sans se briser. L'or résiste à la corrosion, il est inaltérable. Il est l'un des métaux le moins réactif et résiste à l'oxydation et on l'appelle le métal noble. L'eau Régale (3/4 d'HCl + 1/4 d'HNO<sub>3</sub>) dissout facilement l'or. L'or peut être attaqué par le mélange à chaud d'HNO<sub>3</sub> et d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. L'or s'amalgame avec l'Hg, tandis que tous les halogènes réagissent avec lui. L'or est un bon conducteur d'électricité au même titre que le Cu et l'Ag. [1]. L'or a un pouvoir réfléchissant très élevé. [W3]. A part sa thésaurisation dans les banques, l'or est largement utilisé dans la bijouterie, dans l'électronique et en odontologie (dentisterie). [W7].

### III. L’AFFINAGE DE L’OR [8]

Les méthodes d’affinage classiques [9-W11]

#### 1. Affinage pyrométallurgique

La hydrométallurgie constitue le méthode traditionnelle d’extraction des métaux. Elle vise l’obtention des métaux à partir de leurs minerais ou de concentrés au moyen de technique utilisant le feu.

Le doré est fondu et traité à 1150°C par du chlore injecté dans le métal en fusion par des tubes de céramique qui plongent dans le bain. A cette température, le chlore attaque successivement les impuretés métalliques (l’argent, le fer, le plomb et le zinc) et s’éliminent d’abord sous forme de chlorures gazeux qui seront entraînés et retraités pour récupérer les traces d’or entraînées. Le cuivre et l’argent réagissent ensuite et donnent des chlorures liquides qui sont séparés par gravité et recueillis pour extraire l’argent et les traces d’or.

#### 2. Affinage électrolytique (procédé WOHLWILL)

On suit une méthode par double électrolyse pour le traitement des boues par raffinage électrolytique de cuivre. Un procédé électrolytique est aussi utilisé pour obtenir de l’or à pureté élevée, en particulier lorsque le métal contient des traces de métaux de la platine qui ne sont pas éliminés par le chlore.. L’électrolyte est une solution de chlorure d’or obtenue en dissolvant de l’or métallique dans l’acide chlorhydrique en présence de chlore gazeux à 70°C. On opère dans des cellules de céramique. Les anodes sont constituées par le métal à purifier, l’or fin se déposant sur la cathode préparée avec du métal pur. On opère sous 0.5 à 0.7V avec une densité de courant anodique de l’ordre de 600A/m<sup>2</sup>. On peut aussi produire de l’or à 999.9g/1000 à partir du métal contenant jusqu’à 1.5% d’Argent.

#### 3. Procédé acides

La méthode est analogue à celle utilisée pour l’analyse de l’or dans le procédé de coupelation lorsque l’on sépare ces deux métaux par une attaque sélective d’un des métaux et qui consiste à dissoudre l’argent par un acide sans attaquer l’or.

Après un premier traitement du produit à l’acide chlorhydrique pour éliminer les métaux communs, on l’attaque à l’acide sulfurique bouillant qui dissout l’argent, lequel sera ultérieurement précipité sous forme chlorure ; l’or restant inattaqué. L’opération sera réussie si celui-ci reste dans le bac sous forme d’éponge et ne se désagrège pas en fines particules qui seraient entraînées. Cela dépend de la composition du métal à affiner.

#### 4. Les nouvelles méthodes d’affinage [W4, W8]

##### ✚ Le procédé industriel MINATAUR

C’est une technologie purement hydrométallurgique développée en Afrique du Sud. Le procédé est basé sur l’extraction par solvant pour affiner l’or à une pureté de 99,99% (Five nines). Le processus comprend la lixiviation oxydante de l’alimentation dans un milieu chloruré, suivi de l’extraction sélective de l’or par solvant ; les impuretés étant rejetées. La phase organique chargée d’or est lavée de nouveau pour obtenir une solution d’or concentrée, à partir de laquelle l’or de haute pureté est précipité par réduction.

La teneur en or de l’alimentation peut varier de 20 à 99 %. Les alimentations peuvent être des dorés de mines, des scraps de bijoutiers, des filtrats de précipitation au zinc, des déchets d’autre affinage (électrolyse de l’or, raffinage de l’Ag).

##### ✚ La technologie d’affinage hydrométallurgique [3, W4]

Par souci du problème de l’environnement avec l’utilisation du Hg pour l’extraction de l’or, cette méthode a été mise au point pour rendre l’extraction d’or plus efficace et de produire de l’or pur (>99%). Généralement, cette méthode s’applique sur les concentrés de sluice ayant une teneur >1000 g/t. Elle a été déjà mise en place en Afrique du Sud, en Tanzanie, en Mozambique et aussi en Amérique du Sud.

Les concentrés de gravimétrie sont lixiviés dans un mélange d'acide chlorhydrique dilué et d'agent de blanchiment dilué. Après que les solides soient filtrés, l'or sera précipité avec l'un des produits suivants :

Métabisulfite de sodium ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ )

L'acide oxalique ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$ )

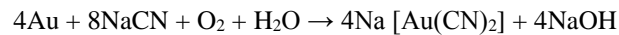
Le ferrosulfate ( $\text{FeSO}_4,6\text{H}_2\text{O}$ )

Le nitrate de sodium ( $\text{NO}_3\text{Na}$ )

Le zinc (Zn)

#### ✚ La lixiviation par cyanuration [6, 3]

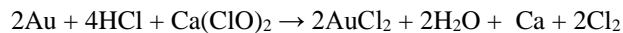
La lixiviation par cyanuration est la norme industrielle du traitement d'or depuis plus de 100 ans. Durant le processus de lixiviation par cyanuration, une solution de cyanure (lixiviât) est lixiviée par le minerai contenu dans les cuves, colonnes ou amas. L'or est dissout par le cyanure puis retiré des tas ou colonnes. Il est ensuite extrait de la solution de lixiviation sursaturée par adsorption sur carbone ou sur résines. Ce procédé d'extraction de minerai rentable et éprouvé fournit une récupération maximale pour de nombreux minerais d'or, y compris les minerais à faible teneur et certains minerais réfractaires. Le mécanisme global de cyanuration de l'or est décrit par la réaction d'Elsner :



Cette équation met en évidence la nécessité de la présence d'oxygène pour former un complexe auro-cyanure à partir de l'or métallique et du cyanure :

#### ✚ La lixiviation par le chlore

La lixiviation par le chlore utilise les réactions suivantes :



#### ✚ Lixiviât en cuves et en colonnes

Dans une lixiviation par cyanuration traditionnelle, le minerai est placé dans des cuves ou des colonnes. La solution de cyanure se lixivie à travers le minerai et dissout l'or, qui est ensuite retiré de la solution lixiviante par adsorption sur le carbone ou les résines. Le calibre des grains, les niveaux d'oxygène et d'alcalinité sont soigneusement contrôlés pour garantir une récupération de l'or maximale.

#### ✚ lixiviation en tas

La lixiviation en tas facilite l'extraction fructueuse de l'or à partir d'un minerai à très faible teneur. Avant la lixiviation en tas, le minerai tout venant ou le minerai concassé est chargé dans des structures de 10 à 20 m de hauteur qui sont empilées sur une couche imperméable. La solution de cyanure dilué est pulvérisée sur le tas, se lixivie à travers la pile puis dissout l'or disponible. La solution est ensuite dirigée dans un bassin. Une lixiviation en tas rentable offre un certain nombre d'avantages dont l'adsorption sur carbone et sur résines qui est la méthode moderne utilisée pour la séparation de l'or.

## L'OR DE MADAGASCAR

La plus grande quantité d'or qui circule sur les marchés se présente le plus souvent sous forme d'alliages. Le titre du métal indique sa pureté. Il peut s'exprimer en millième, en pourcent ou en carats. Les titres légaux pour les ouvrages en or sont : l'or de premier titre contenant 920 pour mille d'or pur, celui du deuxième titre en contient 840 pour mille et celui du troisième titre 750 pour mille. C'est dans le système Vohibory que se trouve le système C6 du groupe de Maevatanana et celui de C4 du groupe de Mananjary où les gisements sont appréciables par sa teneur en or contenu dans leurs quartzites magnétites à or.

### ✚ LA GÉOLOGIE AURIFÈRE DE MADAGASCAR [1]

Parmi les trois systèmes Précambriens de Madagascar, à savoir : le système Androyen, le système de Graphite et le système de Vohibory, seuls les deux systèmes de Graphite et de Vohibory contiennent de l'or. Le système Androyen n'est pas aurifère. A Madagascar, l'or se trouve essentiellement dans le système de Vohibory qui est caractérisé par la forte présence d'intrusions mafiques – ultramafiques.

### ✚ LES GISEMENTS AURIFÈRES DE MADAGASCAR [4, 2]

Les principaux gisements aurifères de Madagascar sont :

#### ❖ Betsiaka (Andavakoera)

Champ de filons quartzo baritiques encaissés dans les gnès du socle et dans les grès de base du Permien, le long du contact socle sédimentaire. Anciennes exploitations : Ranomafana et Beriziky

#### ❖ Tsaratanana

Série métamorphique calco-ferromagnésienne d'Andriamena et des roches basiques associées. Anciennes exploitations : Ambohipihaonana et Masokoamena.

#### ❖ Maevatanana

Série métamorphique silico alumineuse de l'Ikopa Betsiboka, série métamorphique caco-ferro-magnésien d'Andriamena. Anciennes exploitations : Nandrojia, Tainangidina, alluvions des rivières Ikopa et Betsiboka.

#### ❖ Betsiriry

Gnès migmatique du groupe de Miandrivazo. Anciennes exploitations : Dabolava, Ankarongana et Antsaily.

#### ❖ Itasy

Série gneissique silico-alumineuse de l'Itasy. Ancienne exploitation Antsolobato.

#### ❖ Axe Ambositra-Antananarivo

Série gneissique silico-alumineuse archéenne d'Ambatolampy, sauf Itéa qui se situe dans la série schisto-quartzo-calcaire d'Ambatofinandrahana (Protérozoïque moyen). Anciennes exploitations : Antsofimbato, Andravoravo et Itéa.

#### ❖ Vohilava – Ampasary

Série gneissique silico-alumineuse à lentilles ultra basiques des groupes archéens de l'Ampasary (formation de betampona) et de Vohilava (au contact du voisinage avec le granite de Befody et les orthogneiss dioritiques de Masora, rapportés au soubassement Antoginien d'âge catarchéen). Anciennes exploitations : Bebasy, Andrambo, Tsongolo, Tsaramiadana, Gîtes alluvionnaires des rivières d'Ampasary, Maha, Sakaleona et Sahandrambo.

#### ❖ Beforona

Formation métamorphique calco-ferro-magnésiennes d'Alaotra.

#### ❖ Andrarona

Contact entre le granite d'Antogilien de Masoala et une série de schistes et de quartzites. Ancienne exploitation Antsahivo

#### ❖ Vavatenina Anosibe

Série métamorphique silico-alumineuse d'âge archéen, envahie par de nombreux filonnets pegmatitiques (front de migmatisation).

Le tableau-1 suivant résume la production d'or à Madagascar depuis 1897 jusqu'en 2004. [4]

Tableau 1. Production d'or de Madagascar de 1897 à 2004 (kg)

Année	Production (kg)	Année	Production (kg)	Année	Production (kg)
1897	79,1	1933	449,7	1968	16893
1898	124,6	1934	496,9	1969	20136
1899	386,6	1935	480,8	1970	16571
1900	1114,5	1936	469,9	1971	12849
1901	1045	1937	418,7	1972	5814
1902	1295,1	1938	428,2	1973	2166
1903	1910,7	1939	348,9	1974	2417
1904	2460	1940	360,2	1975	4925
1905	2370	1941	341,9	1976	1537
1906	2238	1942	276,4	1977	2356
1907	2940	1943	285,6	1978	3943
1908	3149,3	1944	291,8	1979	1378
1909	3696,8	1945	200	1980	3534
1910	3234,9	1946	121,1	1981	1016
1911	2850	1948	65,1	1982	3232
1912	2119,5	1949	51,7	1983	2601
1914	1782,5	1950	60,1	1984	2430
1915	2078,3	1951	60,6	1985	870
1916	1515,3	1952	55,5	1986	790
1917	1107,7	1953	51,5	1987	350
1918	844,2	1954	42,7	1988	230
1919	561	1955	33,4	1989	60
1920	518,7	1956	28,1	1992	30



Année	Production (kg)
1921	456,2
1922	577,6
1923	502,8
1924	349,2
1925	419,7
1926	306,6
1927	210,3
1928	195,1
1929	187,1
1931	266,4
1932	352,6

Année	Production (kg)
1957	26,8
1958	24,8
1959	13,5
1960	8,5
1961	10,8
1962	10,1
1963	28,1
1964	13740
1965	18620
1966	26520
1967	23493

Année	Production (kg)
1993	7460
1994	26400
1995	39480
1996	7050
1997	7930
1999	7135
2000	4615
2001	294
2002	2801
2004	13

#### IV. LES TRAVAUX EXPÉRIMENTAUX

C'est le procédé par lixiviation par le chlore que nous avons adopté pour l'affinage de l'or à Madagascar. Les réactifs utilisés sont : Acide chlorhydrique concentré (HCl concentré) et dilué (HCl 50%), Hypochlorite de calcium [Ca(ClO)<sub>2</sub> 10%], Soude (NaOH 1N), Métabisulfite de sodium (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), Eau acidulée.

La principale réaction chimique mise en œuvre est :  $2\text{Au} + 4\text{HCl} + \text{Ca}(\text{ClO})_2 \rightarrow 2\text{AuCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + \text{Ca} + 2\text{Cl}_2$ .

Les protocoles opératoires sont:

- ✚ Mettre le préconcentré d'or dans le réacteur,
- ✚ Verser de l'acide dilué à raison de 5 ml / g de préconcentré,
- ✚ Verser progressivement de l'hypochlorite de calcium dilué à 10% à raison de 1 ml / g de concentré,
- ✚ Mettre en place l'unité de barbotage de gaz et fermer le réacteur.
- ✚ Mélanger et laisser pendant 8 heures,
- ✚ Barboter le gaz à l'aide d'une moto pompe,
- ✚ Récupérer l'or après réaction, calculer le rendement de récupération.
- ✚ Titrer l'or obtenu.

Après quelques essais, les résultats d'analyse ont donné une moyenne de rendement de récupération de 86% et de l'or fin titré entre 98,5 % et 99,17 %. Il s'avère que cette pureté obtenue est largement supérieure au titre commercial local qui est de l'ordre de 75% d' Au et cela va permettre à l'or malgache de faire une entrée dans le marché international.

## CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Depuis le 17<sup>ème</sup> siècle Madagascar est reconnu être un pays à potentialité aurifère appréciable. Jusqu'à maintenant, l'exploitation d'or est effectuée de manière artisanale sur des sites alluvionnaires.

Pour l'année 2005, l'application de la réglementation minière, la sortie des cartes des gisements d'or, les statistiques et les découvertes des nouveaux gisements, feront du secteur minier un moteur pour le développement économique. Pour que l'or malgache soit compétitif au niveau du marché mondial, il ne devrait pas seulement rester à l'état de concentré mais doit être affiné suivant les normes internationales c'est-à-dire ayant un titre > 99% d'Au

Notre travail consistait donc à mettre au point une nouvelle méthode d'affinage hydrométallurgique artisanale assurant une double fonction comprenant la récupération de l'or préconcentré et l'homogénéisation et affinage du produit. Cette méthode est applicable à des préconcentrés de teneur supérieure à 1% et tient compte du respect de l'environnement par le traitement des différents effluents.

Vu le rendement de récupération des traitements effectués, l'introduction de la méthode hydrométallurgique pourra contribuer d'une façon significative au développement du secteur or à Madagascar..

Dans les perspectives d'avenir, nous prévoyons une conception et une réalisation d'une unité d'affinage d'une capacité de 5 kg par exemple, ensuite de vulgariser cet appareil auprès des opérateurs dans le domaine de l'affinage de l'or.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

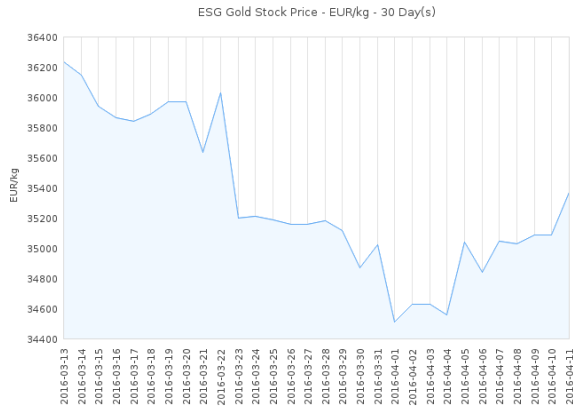
- [1]- AMABLE B.A., 1999, Activités d'orpaillage compatibles avec l'environnement cas de la série de Maevatanana, mémoire d'ingénieur ESPA.
- [2]- BESAIRIE H. 1966, L'or à Madagascar, Service géologique de Madagascar.
- [3]- CONIDA C., Mars 2003, Les bijoux, comment les concentrer et les réaliser Edition GRUND
- [4]- Direction des mines et de la géologie, 2004, Ministère chargé des Mines.
- [5]- FARGEON M., 1992, Technologie des métaux précieux, MASSON, Paris
- [6]- HABASHI F., 2005, Extractive Metallurgy, Department of Mining, Metallurgical and Materials Engineering Laval University of Québec City Canada.
- [7]- HERMAN W., September 2003, Technologies for small scale mining, CASM Annual meeting, Elimina-Ghana.
- [8]- LIBAUDE J. MORIZOT G., Juin 1984, Le traitement des minerais d'or BRGM,.
- [9]- MICHEL R., Métallurgie de l'or, Technique de l'ingénieur, édition 1984.
- [10]- RAMBELO D., 5 Janvier 2006. Le gramme négocié à 180 000 fmg Journal midi Madagascar,
- [11]- RAVELOJAONA A.H., 2004, Contribution au traitement du minerai d'or d'Androfia dans le cadre du projet
- [12]- RAZAFANIA L.N, 2004, Prospection géochimique de l'or primaire du secteur Nord Ouest Ambondrona Région de Tsinjoarivo – Ambatolampy.
- [13]- RICKFORD V., August 2004, Mercury-free mining Technologies,
- [14]- ROQUES E. Métallurgie de l'or Technique de l'Ingénieur, 1<sup>ère</sup> édition octobre 1956 ; Or Andriamena, mémoire d'ingénieur, ESPA.
- [15]- PREMOLI C., 1996, Gold in Madagascar, International Mineral Resources.

## WEBOGRAPHIES

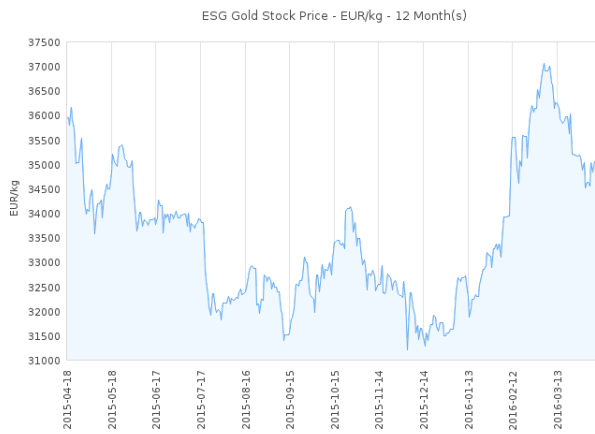
- [W1]- [www.bcn.cl/obtienearchivo?id=documentos/10221](http://www.bcn.cl/obtienearchivo?id=documentos/10221)
- [W2] [www.societechimiquedefrance.fr/.../Article-BUP](http://www.societechimiquedefrance.fr/.../Article-BUP)
- [W3] [www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr) > ... > Matériaux
- [W4]- [www.minetek.co.za](http://www.minetek.co.za)
- [W5]- [www.world gold council discover.com](http://www.worldgoldcouncil.com/discover.com)
- [W6]- [www.mining gold.com](http://www.mininggold.com)
- [W7]- [www.106.us/OR.htm](http://www.106.us/OR.htm)
- [W8]- [www.métalor.com](http://www.metalor.com)
- [W9]- <https://www.bullionvault.com/gold-price-chart.do>
- [W10]- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Métallurgie>
- [W11]- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Or>
- [W12] <http://www.metaux-precieux.fr/courbes-de-lor/>
- [W13] <http://www.metaux-precieux.fr/courbes-du-platine/>

La figure-1 nous renseigne sur le cours mondial de l'or entre Avril 1996 et Avril 2006, tandisque la figure-2 nous donne un aperçu du cours mondial de l'or comparé à celui du platine.

Cours mondial de l'or [W12]



A

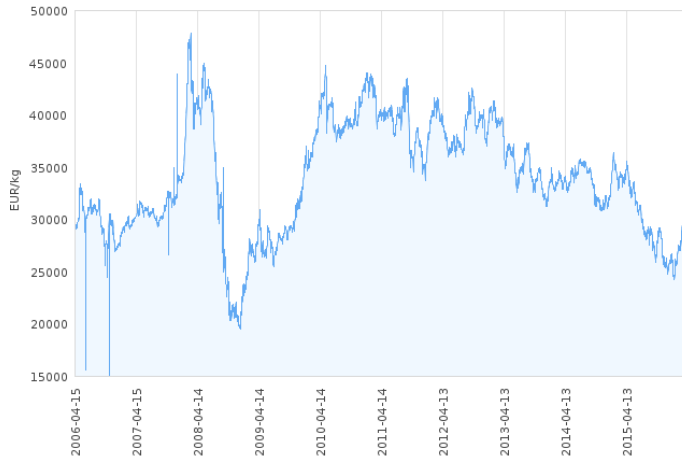


Cours du platine sur le marché mondial [W13]

ESG Platinum Stock Price - EUR/kg - 12 Month(s)



ESG Platinum Stock Price - EUR/kg - 10 Year(s)



ESG Platinum Stock Price - EUR/kg - 30 Day(s)

