

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Minier

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier

**Utilisation de nouveaux réactifs chimiques pour les besoins de
traitement du minerai d'or provenant du site d'Amesmessa**

**Mahmoud MAOUEL
Salim CHEMALI**

Sous la direction de M. Malek OULD HAMOU PhD

Présenté et soutenu publiquement le 20 juin 2018

Composition du Jury :

Président	M. Arezki AKKAL	MCA	École Nationale Polytechnique
Promoteur	M. Malek OULD HAMOU	MCA	École Nationale Polytechnique
Examinatrice	Mme. Amira MERCHICHI	MAA	École Nationale Polytechnique

ENP 2018

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Minier

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier

**Utilisation de nouveaux réactifs chimiques pour les besoins de
traitement du minerai d'or provenant du site d'Amesmessa**

**Mahmoud MAOUEL
Salim CHEMALI**

Sous la direction de M. Malek OULD HAMOU PhD

Présenté et soutenu publiquement le 20 juin 2018

Composition du Jury :

Président	M. Arezki AKKAL	MCA	École Nationale Polytechnique
Promoteur	M. Malek OULD HAMOU	MCA	École Nationale Polytechnique
Examinatrice	Mme. Amira MERCHICHI	MAA	École Nationale Polytechnique

ENP 2018

Je dédie cette thèse

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes chers frères, pour leur appui et leur encouragement,

A mes chers amis, En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

Remerciement

Au terme de ce travail, Nous tenons à saisir cette occasion pour adresser nos profonds remerciements et notre éternelle reconnaissance à un grand nombre de personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail. Nous souhaitons tout d'abord remercier notre promoteur Dr. Malek OULD HAMOU , chef du département de Génie Minier à l'École Nationale Polytechnique d'Alger, pour ses précieux conseils, sa patience, sa confiance et son orientation ficelée tout au long de notre travail de recherche.

Nous tenons à témoigner notre gratitude à M. Mahdjoub BERADOUANE directeur général de l'entreprise AGENOR unité de Baraki pour sa disponibilité sans faille et son aide très précieuse sans laquelle les essais de ce mémoire n'auraient pas été possibles. Nos remerciements s'étendent également aux membres du jury, qui nous ont honoré en acceptant d'apprécier et de juger ce modeste projet . Nos sincères remerciements à l'ensemble du corps professoral du département Génie Minier pour la qualité de leurs enseignements, leurs conseils, leur générosité et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charge académique et professionnelle. Nous ne cesserons de remercier M.Mahmoud GHEZALI directeur de production ENOR et l'ensemble du personnel de l'ENOR et AGENOR pour leur patience, leurs conseils pleins de sens et pour le suivi et l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à nos familles et nos amis qui par leurs prières et leurs encouragements, nous ont permis de surmonter tous les obstacles.

ملخص

يعد الذهب أحد أكثر المعادن الثمينة شهرة في تاريخ البشرية. حيث أنه يرمز إلى مصدر القوة والإلهام والثروة. ترتبط قيمة المعدن بمعدل اكتشاف مناجم جديدة ، أو تحسين تقنيات التعدين واستغلال خامه، كما أنه يعتبر نفيسا أكثر بارتفاع معدل الطلب عليه في السوق : فكلما زاد الطلب ، زادت قيمته. يتعلق تزايد أو تناقص الطلب على المعادن في الأسواق باختلاف استخداماتها العملية (صناعية أو فنية) و أيضا بقيمة استثمارها وتخزينها. المعدن الأصفر له استخدام صناعي واسع الانتشار خاصة في مجال الفن ، المجوهرات ، الإلكترونيات والعملة. في مقابل السعر المرتفع لهذه المادة و تطوير النشاط المتعلق بها في صناعة التعدين، بدأت تظهر العديد من الابتكارات التي تهدف إلى تحسين وفتح الفرص لمعالجة خامات الذهب بكفاءة من

الكلمات الدلالية : الذهب، خامة، معالجة ، منجم.

Abstract

Gold is one of the most known precious metals in the history of mankind, it symbolizes power, the divine and wealth. The value of a given metal is related to the stripping rate of new mines, or the improvement of mining techniques and exploitation of their ore. The preciousness of a metal is also related to the demand on the market : more it is asked, more it is valuable. The Demand depends on the practical use of metals (industrial or artistic) but also on other values as investment and storage. The yellow metal has a widespread industrial use, mainly in art, jewelry, electronics and money. Regarding the heavenly price of this substance and the renewed interest shown by this part of the mining industry, multiple innovations are emerging that aim to improve and open up opportunities to process gold ores while efficiency with considerable economic profitability.

Key words : Gold, Ore, Treatment, Deposit, Mine.

Résumé

L'or est l'un des métaux précieux les plus connus de l'histoire de l'humanité, il symbolise le pouvoir et la richesse. La valeur d'un métal donné est liée au taux de découverte des nouvelles mines, ou l'amélioration des techniques d'exploitation et de valorisation de leur minerai. Le caractère précieux d'un métal est également lié à la demande sur le marché : plus il est demandé, plus il est précieux. La demande dépend de l'usage pratique des métaux (industriel ou artistique) mais également de leur valeur comme investissement et stockage. Le métal jaune présente un usage industriel très répandu, connu surtout pour son utilisation dans l'art, la joaillerie, l'électronique et la monnaie. En raison du prix céleste de cette substance et du regain d'activité dont fait preuve cette partie d'industrie minière, de multiples innovations voient le jour visant à améliorer et ouvrir des possibilités de traitement des minerais d'or avec efficacité et rentabilité économique considérable.

Mot clés : Or, Minerai, Traitement , Gisement, Mine.

Table des matières

Table des figures

Liste des tableaux

Introduction générale	12
1 Aperçu général sur l'or	16
1.1 Historique	16
1.2 Caractéristiques physico-chimique de l'or	16
1.3 La production mondiale de l'or	17
1.4 L'apport économique de l'or	19
1.4.1 La fixation des prix de l'or sur le marché mondial	20
1.4.2 L'offre et la demande d'or	20
1.5 Types des gisements d'or	20
1.6 Méthodes d'extraction d'or	21
1.7 Méthodes de pré-traitement et de valorisation des minerais d'or	21
1.7.1 Méthodes de pré-traitement des minerais d'or	22
Procédés d'enrichissement par gravité :	22
1.7.2 Méthodes de valorisation des minerais d'or	23
L'Amalgamation :	23
La cyanuration :	23
1.8 Méthodes de récupération d'or	24
1.8.1 Précipitation sur zinc ou aluminium	24
1.8.2 Adsorption sur charbon actif	25
1.9 Critères de choix et sélection d'un procédé de traitement	25
1.10 Innovations et axes de recherches	26
2 Identification de la mine d'or d'Amesmassa	29
2.1 Introduction	29
2.2 Historique de la mine	29
2.3 Cadre géologique et minéralogique	30
2.3.1 Situation géographique et économique	30
2.3.2 Cadre géologique régional	31
2.3.3 Minéralogie des minerais	31
2.3.4 Propriétés technologique des minerais	32
2.3.5 Minéralisation de gisement	33
2.4 Caractéristiques des structures aurifères du gisement Amesmassa	33
2.4.1 Estimation des réserves	33
2.4.2 Structures aurifères du gisement d'Amesmassa	34

2.4.3	Les zones (filons) en exploitation	34
2.5	Exploitation de la mine	36
2.5.1	Paramètres de la mine :	37
2.5.2	Régime de fonctionnement dans la mine :	37
2.5.3	Équipements utilisés dans la mine :	37
2.5.4	Les travaux de foration et de tir :	37
2.5.5	Chargement et transport de la masse rocheuse :	38
2.6	Traitement du minerai d'Amesmassa (Process)	39
2.6.1	Préparation mécanique	39
	Alimentation :	40
	Concassage primaire :	40
	Criblage primaire :	40
	Criblage secondaire :	40
2.6.2	Traitement du minerai riche par lixiviation en cuves	41
	Le Broyage :	41
	La Classification :	41
	L'épaississement :	42
	La lixiviation et l'adsorption sur charbon actif CIL (Carbon In Leach)	42
2.7	Traitement du minerai pauvre par lixiviation en tas (heap leach)	44
2.7.1	Colonnes de charbon	45
2.8	Le raffinage de l'or	46
2.8.1	Le lavage du charbon	46
2.8.2	L'éluion	46
2.8.3	L'électrolyse	47
2.8.4	Le séchage	47
2.8.5	La fusion	47
3	Affinage de l'or	50
3.1	Présentation de l'entreprise	50
3.2	Processus d'affinage de l'or	50
3.2.1	Le grenouillage	51
3.2.2	L'affinage de l'or (attaque chimique par l'eau régale)	51
3.2.3	Le Filtrage de la solution	52
3.2.4	La récupération de l'or	53
3.2.5	La fusion	54
4	Caractérisation de minerais d'or d'Amesmassa (Essais de laboratoire)	57
4.1	Échantillonnage	57
4.1.1	Prélèvement des échantillons	57
4.2	Préparation mécanique	58
4.2.1	Concassage	58
	Le concassage grossier	58
	Le concassage secondaire	58
4.3	Échantillonnage au laboratoire	59
4.3.1	Quartage manuel	59
4.3.2	Diviseur à couloirs	60

4.4	Caractérisation physique et chimique et physicochimique	60
4.4.1	La masse volumique	60
	La masse volumique apparente	60
	La porosité	61
	Taux d'humidité	61
4.5	Analyse granulométrique	61
4.5.1	Mode Opérateur	62
4.5.2	Résultats et interprétation	63
4.6	Analyse minéralogique	64
4.6.1	Diffraction des rayons X	64
	Interprétation des résultats	67
4.7	Détermination de teneur	67
4.7.1	Préparation thermique	67
	La fusion :	67
	La coupellation :	69
4.7.2	Préparation chimique	69
4.7.3	Spectroscopie d'absorption atomique (SAA)	69
	Détermination de la teneur par SAA	70
	Résultats et interprétation :	71
5	Méthodes de traitement hydrométallurgique	74
5.1	Introduction	74
5.2	Traitement par cyanuration	75
5.2.1	Influence de la concentration de cyanure de potassium (KCN) . . .	75
	Mode opératoire	75
5.2.2	Influence de l'agitation	76
	Conduite de l'opération	76
5.2.3	Influence de la granulométrie (surface de contact)	76
	Conduite de l'opération	76
5.2.4	Résultats et interprétation :	78
5.3	Traitement par l'hypochlorite	81
5.3.1	L'hypochlorite	81
5.3.2	La lixiviation de minerai d'or par l'hypochlorite	82
	Influence de la concentration de l'hypochlorite de sodium (NaClO) :	83
	Influence du rapport solide-liquide (S/L) :	83
	Influence du pH :	83
	Résultats et interprétation :	84
5.4	Traitement par l'eau régale	87
5.4.1	Préconcentration gravimétrique	87
	Mode opératoire :	88
5.4.2	Attaque par l'eau régale	88
	Mode opératoire	89
	Résultats et interprétation :	90
	Conclusion	92
	Bibliographie	98
	Annexes	101

Table des figures

1.1	Classement des pays producteurs de l'or	18
1.2	Production mondiale d'or depuis 1995	19
1.3	Cours de l'Once d'Or depuis 1970 à Londres	20
2.1	Carte de localisation géographique d'Amesmassa	31
2.2	Carte géologique de la région d'Amesmassa	32
2.3	État des lieux carrière gisement d'Amesmassa filon-8 (fin 2017)	36
2.4	Lieux de stockage minéral mine d'Amesmassa	39
2.5	Schéma préparation mécanique	40
2.6	Préparation mécanique site d'Amesmassa	41
2.7	Processus de la lixiviation en cuves (LEACH TINK)	43
2.8	Processus de la lixiviation en cuves (LEACH TINK) mine d'Amesmassa	43
2.9	L'air de lixiviation (Leach Pad) mine d'Amesmassa	44
2.10	Lixiviation en tas mine d'Amesmassa	45
2.11	Principe d'adsorption colonnes de charbon	45
2.12	Processus lixiviation en tas (HEAP LEACH)	46
2.13	Processus raffinage d'or	48
3.1	localisation géographique Agenor	51
3.2	Le tonneau réacteur	52
3.3	Le chariot de filtrage	53
3.4	Cellule de réduction, filtrage et séchage	54
3.5	La fusion de l'or	54
3.6	Processus de l'affinage de l'or AGENOR	55
4.1	Concasseur à mâchoires	59
4.2	Échantillonnage diviseur à couloirs	60
4.3	Tamiseuse	63
4.4	La courbe granulométrique	64
4.5	Géométrie de Bragg	65
4.6	Spectre de la diffraction X (minéral)	66
4.7	Spectre de la diffraction X (formules chimiques)	66
4.8	Préparation du creuset de fusion	68
4.9	Récupération du bouton de plomb	68
4.10	Perle de l'or et l'argent après coupellation	69
4.11	Installation générale SAA	70

4.12	Spectromètre d'absorption atomique à flamme modèle ThermoSCIENTI-FIC iCE 3000 Series	71
4.13	Courbe d'étalonnage	72
5.1	Fioles de lixiviation (Influence de la concentration KCN)	75
5.2	Récipients de lixiviation (Influence de l'agitation) et filtration	76
5.3	Mini-colonnes de lixiviation (Influence de la granulométrie)	77
5.4	Courbe d'étalonnage	78
5.5	Effet concentration de KCN	79
5.6	Effet durée d'agitation	80
5.7	Effet de granulométrie	81
5.8	Lixiviation en hypochlorite (Influence du rapport solide-liquide) et filtration	83
5.9	Effet concentration hypochlorite de sodium (NaClO)	84
5.10	Effet rapport solide/liquide	85
5.11	Effet du pH	86
5.12	Alimentation table à secousses	88
5.13	Concentré du minerai d'or dans les rifles	89
5.14	Flow sheet traitement des minerais d'or par cyanuration	94
5.15	Flow sheet traitement des minerais d'or par l'hypochlorite	95
5.16	Flow sheet traitement des minerais d'or par l'eau régale	96
5.17	Mode opératoire calcul de masse volumique	102

Liste des tableaux

1.1	Caractéristiques physico-chimique et thermique de l'or	17
2.1	Composition chimique et minéralogique.	33
2.2	Réserves estimées ORGM (1993)	34
2.3	Réserves géologiques filon 8 de la mine d'Amesmassa	35
2.4	Réserves géologiques filon 9 de la mine d'Amesmassa	35
2.5	Les paramètres de la carrière adopté par l'exploitation de la mine d'Ames- massa	37
2.6	Régime de fonctionnement dans la mine la mine d'Amesmassa	37
2.7	Équipements utilisés dans la mine d'Amesmassa	38
4.1	Données de prélèvement d'échantillons Amesmassa	57
4.2	Résultats de l'analyse granulométrique	64
4.3	Données typiques de la courbe d'étalonnage pour Au	72
5.1	Effet concentration de KCN, 200g de minerai à 12g/t, 200ml de solution KCN, 3H d'agitation à 400rpm.	78
5.2	Effet durée d'agitation, 200g de minerai à 12g/t, 150ml de solution KCN à 500ppm, agitation à 400rpm.	79
5.3	Effet de granulométrie, 200g de minerai, 150ml de solution KCN à 500ppm.	80
5.4	Effet concentration hypochlorite de sodium (NaClO), 10g du minerai d'or à 12g/t, rapport solide/liquide (1/10), agitation pendant 12 heures à 400rpm	84
5.5	Effet rapport solide/liquide, minerai d'or à 12g/t, solution hypochlorite à 12%, pH=5, agitation pendant 12 heures à 400rpm	85
5.6	Effet pH, 10g du minerai d'or à 12g/t, solution hypochlorite à 12%, rapport solide/liquide (1/10), agitation pendant 12 heures à 400rpm	86
5.7	La description des différentes zones table à secousses	88
5.8	Les esquisses de l'expérience	89
5.9	Concentration en or dans les zones de récupérations après attaque par l'eau régale	90

Introduction Générale

Introduction Générale

L'or est sans conteste une des merveilles de la nature, un des plus beaux éléments que recèle la terre, il est semblable au soleil et reflète parfaitement la couleur de cet astre. C'est une matière à nul autre pareil, rare et précieuse ; elle attire somptueusement et demeure terriblement séduisante. Quelle que soit l'époque, quelle que soit la civilisation, l'or a toujours fasciné l'humanité.

Dès les temps les plus anciens, le métal jaune a joué un rôle central dans l'histoire de l'humanité car il est le fondement de nos richesses et l'élément moteur de l'économie mondiale.

A travers les siècles, l'or a contribué à bâtir le monde industriel qui nous a fait pénétrer dans une époque de prospérité. Il a été utilisé pour fabriquer des biens précieux et de la monnaie, d'autres utilisations aussi ont vu le jour avec l'avènement de l'électronique et de l'aérospatiale.

C'est pour cela et ainsi en raison de sa rareté et ses caractéristiques physico-chimiques particulières que l'or occupe le rang de substance exceptionnelle très recherchée dont le prix par rapport aux autres éléments est relativement élevé, l'exploitation de cette substance minérale suscite l'engouement éternel de l'homme qui ne cesse de la prospecter, l'exploiter et la traiter, chose qui s'est traduite par le phénomène des ruées vers l'or.

Un regain d'intérêt pour le métal jaune s'est alors manifesté par l'augmentation de la prospection, l'ouverture ou la réouverture de nouvelles mines, et aussi par l'accroissement des recherches sur les procédés de traitement anciens ou nouveaux.

Aujourd'hui, les principaux gisements d'or se trouvent au Canada, aux États-Unis, en Australie, en Inde. On en trouve aussi au Japon, en Nouvelle-Zélande, en Indonésie et en Europe et sans oublier le leader historique dans la production de ce métal, l'Afrique du sud.

En outre , il existe actuellement plusieurs gisements d'or localisés dans notre pays essentiellement au sud (région du Hoggar) comme les gisements d'In Abequi , Tiririne(Hanane), Tirek et celui d'Amessmassa dont les réserves géologiques sont respectivement de l'ordre de 2,8 ; 0,48 ; 0,73 ; 3.38 millions de tonnes avec des teneurs moyennes respectives de 3.59;17 ; 18 ; 18 g/t. [1]

Ce travail de mémoire a fait l'objet d'un stage pratique effectué au sein de mine d'Amesmassa et pour nos essais de valorisation (partie expérimentale) ont été effectué

au sein de Laboratoire de traitement département Génie Minier, en nous basant sur le flow sheet de traitement de minerai d'or provenant de la mine d'or d'Amesmassa et de laboratoire d'affinage de l'AGENOR.

Notre projet de fin d'études a pour objectif l'amélioration du schéma de traitement d'Or provenant du gisement aurifère de la mine d'Amesmassa et l'introduction de nouveaux réactifs autres que les cyanures à savoir l'hypochlorite et l'eau régale, le travail est subdivisé en cinq chapitres dont le premier chapitre est une synthèse des généralités sur l'or, à savoir, ses propriétés, ses applications, son apport économique, sa production mondiale, sa genèse et sa valorisation (traitement conventionnel et métallurgie extractive).

Le second chapitre est une description de la mine d'Amesmassa, illustré par son bilan l'historique des travaux de prospection et d'exploration réalisés, sa localisation, sa géologie régionale, sa minéralisation et les modes d'exploitation et de valorisation utilisés.

Le troisième chapitre est une description du processus général de traitement de minerai d'or où on présente le procédé d'affinage de lingot d'or obtenu de la mine, tandis que les chapitres quatre et cinq font l'objet de notre étude expérimentale. Dans le premier alinéa on a déterminé les différentes propriétés, en effectuant des analyses physiques et chimiques sur le tout-venant, tandis que dans le dernier chapitre, nous avons décrit tout les essais de traitement réalisés au niveau de notre laboratoire, en nous basant sur le même processus que celui utilisé par l'ENOR, mais avec des réactifs et des conditions de travail différents. Les résultats obtenues ont été l'objet d'une discussion.

Enfin, nous avons clôturé notre travail par une conclusion, en émettant quelques recommandations, qui nous espérant être prises en considération par les responsables de l'industrie minière en général et de l'ENOR-AGENOR en particulier.

Partie théorique

Premier Chapitre

Aperçu général sur l'or

Chapitre 1

Aperçu général sur l'or

1.1 Historique

L'or est considéré comme étant le métal le plus précieux sur la croûte terrestre, c'est un élément extra-terrestre formé dans l'espace grâce à des explosions stellaires cataclysmiques d'une étoile appelée supernova qui ont propulsé des débris sous forme de gaz et de poussière à travers le milieu interstellaire. Du fait de la pression extrême de cette étoile, des éléments autre que l'hydrogène se sont formés et se sont ensuite condensés dans des planètes, parmi lesquelles on retrouve la terre, c'est de cette manière que l'or était livré dans notre planète. [2]

Au moment de la formation de la terre, du fait qu'il est l'élément le plus dense, l'or s'est concentré en profondeur se limitant entre la roche en fusion dite "le magma" et la roche dure dite " croûte terrestre" .

A cause des mouvements géologiques, des fissures se sont formées, et des gaz et fluides provenant du magma sont venus s'infiltrer à travers ces fissures prenant au passage des quantités d'or lorsqu'il y en a.

Avec le temps ces fluides vont refroidir et se cristalliser formant des filons qui emprisonnent l'or.

Ce métal natif que l'on trouve un peu partout sur la planète mais en très faible quantité reste enfermé généralement dans des filons de quartz, il apparait soit sous forme de petits morceaux visibles a l'œil nu, qu'on appelle des pipettes, ou bien il se trouve sous forme de petites particules totalement invisibles (fine dissémination), ou encore il peut prendre une troisième forme, mais uniquement dans les placers où il apparait sous forme de paillettes.

1.2 Caractéristiques physico-chimique de l'or

L'or est un métal qui présente des propriétés physico-chimiques tout à fait remarquables faisant de lui une substance exceptionnelle.

Masse atomique relative	196.9665
Nombre atomique	79
Conductibilité thermique	$317 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Rayon atomique	144.2 pm
Densité	19,32
Configuration électronique	$4f^{14} 5d^{10} 6s^1$
Électro-négativité	2.4
Etat physique (25°C)	Solide
Point de fusion	1064°C
Point d'ébullition	2856°C

TABLE 1.1 – Caractéristiques physico-chimique et thermique de l'or

C'est un métal jaune brillant, le plus malléable et ductile des métaux, c'est à dire qu'on peut l'étendre et l'aplatir le plus possible. Chimiquement inactif, il ne rouille pas et ne se décolore pas. Sous l'action de l'eau, de l'air ou de la plupart des bases et acides, il ne subit aucune dégradation.

C'est un élément chimique de symbole Au et de numéro atomique 79. Sa couleur à l'état pur est d'un jaune vif mat et brillant à l'éclat métallique envoûtant. Il est très dense (19.3) ce qui lui donne un poids atomique très élevé de 196.9665 g/atome.

L'or a la particularité de fondre à 1064°C et de s'évaporer à une température extrême de 2960°C . Il est remarquable pour sa densité élevée ; sa malléabilité ; sa ductilité et son excellente conductivité électrique et thermique. Il est aussi amagnétique et inerte et donc presque totalement insensible à l'oxydation et peut par conséquent être facilement conservé pendant de très longues périodes. [3]

1.3 La production mondiale de l'or

La production mondiale est sur une pente ascendante depuis des années, ce qui est un présage à une augmentation progressive des cours de l'Or sur le moyen et le long terme, et l'exploitation des gisements à faible teneur, sa faible teneur dans la croûte terrestre (0,004 mg par tonne), explique en partie son prix élevé.

La production mondiale d'Or repose principalement sur un groupe de 8 pays grands producteurs d'Or, avec une hiérarchie fluctuante. Aujourd'hui, La Chine domine ce classement aux dépens de l'Afrique du Sud, leader historique de la production d'Or, concentrant 40% des réserves d'Or mondiales. Ce groupe de 8 pays représente les 2/3 de la production mondiale totale. [4]

La Chine est depuis 2007, le premier producteur mondial avec un total annuel de 462 tonnes d'Or (dernière statistique mondiale établie en 2014), tout en étant un des premiers

consommateurs d'Or mondiaux également. En second vient l'Australie avec une production totale de 272 tonnes d'Or, puis la Russie, Moscou complète le podium avec 266 tonnes d'or produites en 2014. Les États-Unis en quatrième place avec 210 tonnes (principalement le Nevada). Le Pérou est le cinquième producteur mondial avec 171 tonnes d'or produites en 2014. Enfin, de la 6ème à la 8ème position viennent respectivement, l'Afrique du sud, le Canada et le Mexique.

Les principales mines d'Or mondiales se localisent dans le groupe des 8 premiers pays producteurs d'Or mondiaux :

- ✓ Chine : région du Shandong
- ✓ Australie : Ouest du pays (75% de la production australienne), mine de Boddington
- ✓ Russie : l'Oural
- ✓ États-Unis : Nevada (60% de la production américaine), mine de Goldstrike
- ✓ Pérou : mine de Yanacocha (Nord du pays)
- ✓ Afrique du Sud : Driefontein et mine de Tau Tona
- ✓ Canada : mine d'Hemlo (Ontario)
- ✓ Mexique : mine de Los Filos

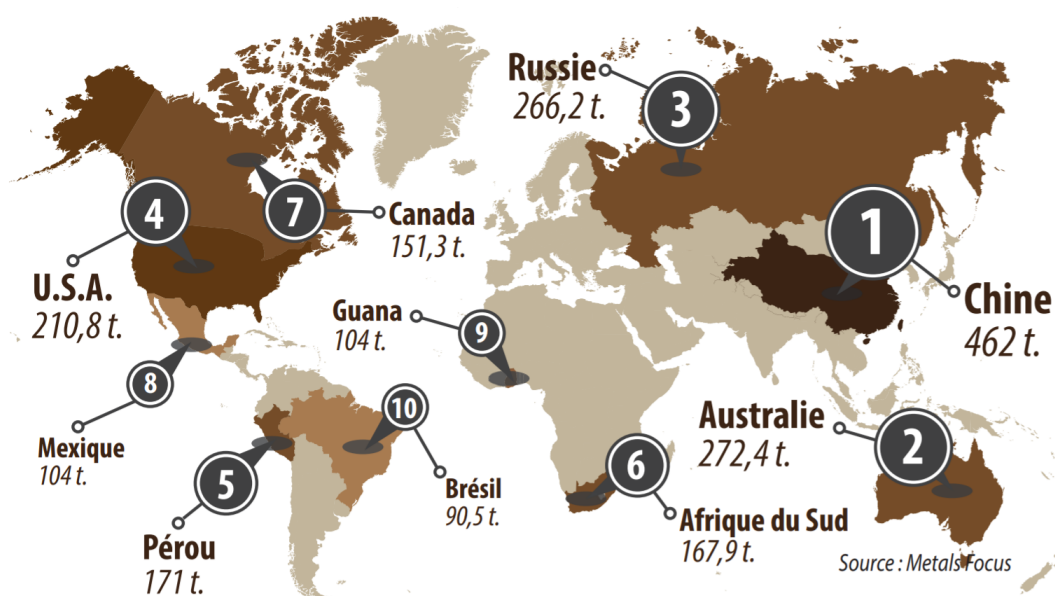


FIGURE 1.1 – Classement des pays producteurs de l'or

La production minière d'Or a atteint un pic mondial en 2001 avec un total produit

de 2600 tonnes d'or. Depuis, la production mondiale d'or était en décroissance jusqu'à l'année 2009, où la tendance s'est inversée en raison de la concurrence imposée par la Chine, avec un pic de croissance ayant atteint les 3100 tonnes en 2016.

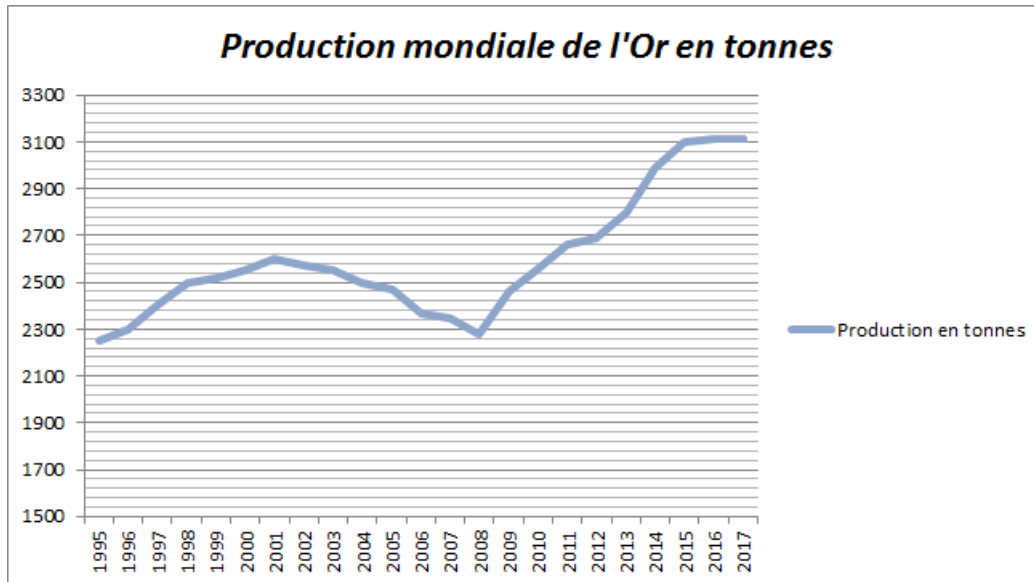


FIGURE 1.2 – Production mondiale d'or depuis 1995

L'Algérie occupe le 25^{ème} rang mondial et le 3^{ème} parmi les pays arabes par ses réserves d'or estimées en fin 2015 à 173.6 tonnes selon le classement des réserves officielles d'or détenues par les états, dévoilé dans le dernier rapport du Conseil Mondial de l'Or (CMO). Comparativement à ce classement, l'Algérie est détentrice de 4,1% des réserves mondiales d'or, le plus grand pic enregistré a été produit dans le gisement d'Amesmassa en 2009 qui était de l'ordre de 998 kg d'or.

[5]

1.4 L'apport économique de l'or

L'or a été évalué fortement par presque toutes les sociétés pendant une grande partie de l'histoire humaine. Il joue un rôle incontournable dans la vie économique d'une nation, il représente un symbole de la richesse et sa revente est une solution pratique pour améliorer la valeur monétaire du pays ou sortir d'une situation financière difficile.

La demande mondiale à l'égard de ce matériau demeure toujours incroyable, à elle seule l'Afrique de sud produit plus de 300 tonnes par ans. Ce métal noble possède de nombreuses applications, nous l'utilisant en :

- ✓ Joaillerie
- ✓ Électronique
- ✓ En médecine
- ✓ Fabrication de la monnaie, des médailles...

Il est aussi utilisé dans les arts et surtout il permet de mesurer et d'assurer une grande partie de nos richesses.

1.4.1 La fixation des prix de l'or sur le marché mondial

La règle économique de l'offre et de la demande est le principal facteur de détermination des prix de l'or sur le marché mondial. Les transactions se réalisent sur les principales places financières en fonction de la provenance : New York et Toronto pour les Amériques, Londres et Zurich pour l'or en provenance d'Afrique du Sud et de Russie, Hong Kong, Singapour et Tokyo pour celui de Chine et d'Australie.[6]

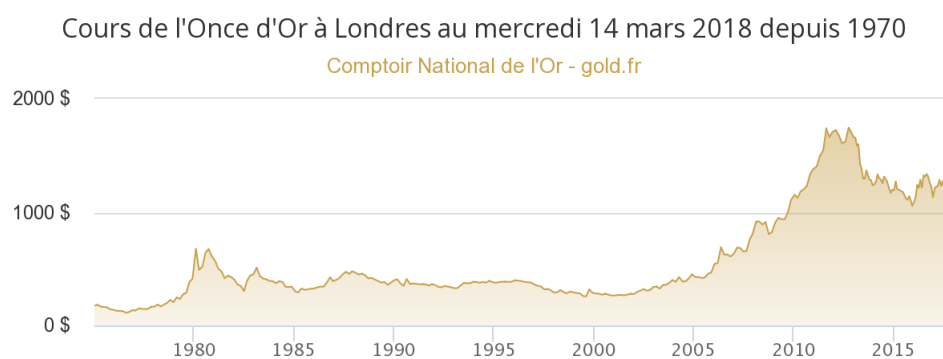


FIGURE 1.3 – Cours de l'Once d'Or depuis 1970 à Londres

1.4.2 L'offre et la demande d'or

L'offre est principalement alimentée par la production et les ventes des autorités monétaires. Certaines banques centrales et institutions internationales, conservent une réserve de 32702 tonnes (publié en Janvier 2016 par World Gold Council WGC) soit quand même à peu près 20 % de tout l'or extrait depuis deux mille ans. La production actuelle moyenne durant les dernières années est évaluée à 2800 tonnes par an et elle est en progression en raison de l'utilisation de nouvelles technologies d'extraction.

La demande émane principalement de la bijouterie, des technologies, des investisseurs et des banques centrales. La demande destinée à la bijouterie est l'utilisation « classique » de l'or en particulier en Inde et en Chine où les bijoux en or sont très prisés. La demande à destination des technologies progresse grâce à l'utilisation de l'or comme excellent conducteur d'électricité. Chaque puce d'ordinateur nécessite un composant d'or, générant une demande faible mais constante. Actuellement, la demande de l'or sur le marché atteint les 3300 tonnes par an.[6]

1.5 Types des gisements d'or

Un grand nombre des découvertes les mieux connues étaient des gisements filoniens ou placers.

L'or filonien (gisement primaire), c'est l'or inclus dans les filons ou dans les roches en place qui constituent les reliefs. Il se forme lorsqu'un fluide aurifère très chaud passe dans les fissures que constituent les failles et les fractures des roches. Ces fissures sont alors comblées par la précipitation des minéraux, principalement du quartz, mais aussi de l'or. Ces gisements sont parfois constitués d'un unique filon qu'on peut exploiter en pratiquant une seule tranchée ou une seule galerie, ou parfois d'un système complexe de veines qui requière alors une exploitation sur plusieurs niveaux souterrains.

L'or des placers (gisement secondaire ou alluvionnaire), c'est l'or qui s'est libéré des roches et filons en place lors des différentes phases d'érosion et qui est venu se déposer dans les graviers des fonds de rivières en formant ainsi ce que l'on appelle les « placers ».[7]

1.6 Méthodes d'extraction d'or

L'extraction de l'or se fait par deux principaux types, à ciel ouvert ou souterraines, le choix revient à plusieurs facteurs, la nature du dépôt, sa taille, sa profondeur, sa teneur, la sécurité et les incidences sur l'environnement. La plupart de ces derniers facteurs se combinent pour devenir une considération économique.

Une mine à ciel ouvert est creusée en une série de gradins qui fournissent une plate-forme pour l'accès et les activités minières. La pente du mur de mine et la conception des gradins doivent maximiser la sécurité tout en réduisant au minimum le déplacement de roche stérile. Le minerai et les stériles doivent être particulièrement surveillés pendant l'extraction minière. La récupération du minerai et le déblaiement des stériles succèdent aux forages et aux explosions si la roche est dure.

Dans certains cas, l'extraction minière à ciel ouvert précède l'extraction souterraine qui peut débiter perpendiculairement ou de manière inclinée près de la base du puits. Cependant, quand ceci est entrepris, cela doit généralement permettre l'accès à un minerai de qualité supérieure par rapport à celui extrait à ciel ouvert.

L'accès à l'extraction souterraine peut se faire par l'axe vertical ou de manière inclinée, souvent avec une pente spiralée. Dans certains cas, les deux techniques d'accès sont utilisées, celles-ci pouvant être employées pour le personnel ou les matériaux, ou pour la ventilation. Puisque l'extraction souterraine est plus chère, le choix du minerai est plus soigneusement contrôlé.[8]

1.7 Méthodes de pré-traitement et de valorisation des minerais d'or

Le choix de la méthode de traitement du minerais d'or repose sur leurs propriétés spécifiques (densité très élevée ; mouillabilité par le mercure ; flottabilité ; solubilité dans des solution de cyanure), le choix tient compte aussi des minéraux accompagnateurs ,de la

nature de la gangue et des conditions géoéconomiques du gisement à traiter.[9]

1.7.1 Méthodes de pré-traitement des minerais d'or

Procédés d'enrichissement par gravité :

S'appliquent essentiellement à l'or libre des placers, l'enrichissement signifie l'augmentation de la quantité d'or dans le minerai, en éliminant sélectivement les particules les plus légères.

Le minerai d'or doit être broyé pour libérer les particules d'or de la roche et pour réduire la taille des grains. l'enrichissement fonctionne mieux lorsque la taille des grains du minerai broyé est relativement constante, de sorte que la plupart des particules sont de taille similaire.

La plupart des méthodes de ce procédé reposent sur la forte densité de l'or par rapport aux autres minéraux contenus dans le minerai ou le mélange d'alluvions. Ces méthodes sont appelées méthodes de gravité. Les principaux appareils utilisés sont :

✓ Les tables à secousses : les tables à secousses sont des tables surélevées peu inclinées d'un côté de ses arrêtes qui s'étendent horizontalement sur toute leur longueur, dotée d'une boîte d'alimentation en eau dans sa partie supérieure. Un mécanisme imprime des secousses asymétrique et longitudinales, les grains légers ont tendance à sauter les obstacles par les riffles, et les grains lourd sont piégés.

On trouve donc en commençant par la partie extérieure au rifflage plusieurs zones :

Zone 1 : Fines particules denses.

Zone 2 : Particules denses grosses et moyennes.

Zone 3 : Particules mixtes.

Zone 4 : Particules légères.

✓ Les sluices : le sluice est un très bon trieur car il permet d'extraire de l'or contenu dans des alluvions aurifères et ce en grandes quantités. Les sluices ou écluses utilisent de l'eau pour laver le minerai ou l'alluvion sur une série de plates-formes inclinées. Au fur et à mesure que l'eau se dépose dans les sédiments, les particules d'or s'enfoncent et sont capturées par le matériau qui recouvre le fond, souvent des tapis. Les écluses sont généralement inclinées de 5 à 15 degrés. Lorsque l'eau se déplace le long d'une écluse, elle génère une force plus importante et empêche les particules d'or de s'enfoncer facilement. Pour cette raison, la plus grande partie de l'or est capturée au début de l'écluse. Tapis ou autres dispositifs de capture sur le fond des écluses peuvent être enlevés et lavés dans un seau pour récupérer l'or capturé.[10]

La flottation :

La flottation est généralement utilisée par les mineurs à grande échelle. C'est un processus qui fonctionne le mieux pour le traitement de types de minerais complexes, en particulier les minerais qui sont difficiles à traiter en utilisant des méthodes de gravité.

En flottation, un mélange de suspension (minerai broyé et eau) et des agents moussants sont ajoutés dans une cellule de flottation. Un tube libère de l'air dans le réservoir de la machine et un agitateur crée des bulles d'air au fond du réservoir.

Des produits chimiques spécifiques sont ajoutés à la pulpe, d'abord des collecteurs qui sont des substances hétéropolaires qui agissent sur la surface des minéraux pour les rendre plus hydrophobes et s'attacher aux bulles d'air et aussi des régulateurs qui sont principalement des réactifs qui déterminent le degré d'acidité ou d'alcalinité de la pulpe, autrement dit qui fixent le pH.

Le processus de flottation en général ne fait pas flotter des particules d'or libres mais est particulièrement efficace lorsque l'or est associé à des minéraux sulfurés tels que la pyrite. Dans un minerai d'or pyritique typique, l'or est encapsulé dans une structure cristalline de sulfure de fer.[10]

1.7.2 Méthodes de valorisation des minerais d'or

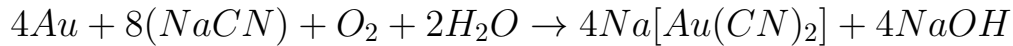
L'Amalgamation :

L'amalgamation est un processus de concentration dans lequel l'or métallique est mélangé avec du mercure, soit dans un tambour d'amalgamation, soit sur une table d'amalgamation où le métal précieux se lie au mercure. L'amalgam et la pâte du minerai stérile sont amenés à emprunter des chemins différents pour effectuer la séparation. Le minerai contenant l'or devrait être broyé suffisamment fin pour permettre l'exposition maximale de la surface d'or au mercure. Souvent, l'eau est utilisée pour aider à disperser les particules et favoriser une meilleure interface du métal précieux au mercure. Les amalgames sont définis comme des alliages de mercure et d'or d'une série de composés allant de $AuHg_2$ à Au_8Hg . L'application de cette technique sur les minerais d'or est aujourd'hui quasiment abandonnée à cause des dangers présentés par la manipulation du mercure. [10]

La cyanuration :

La lixiviation chimique repose sur les propriétés chimiques de l'or pour le lixivier à partir du minerai, du concentré ou des résidus. Ce procédé est principalement utilisé dans les opérations minières à grande échelle, mais il a été de plus en plus adopté dans les mines à petite échelle en raison de son taux élevé de récupération de l'or et de son faible coût. Les meilleures pratiques de la lixiviation chimique combinent l'enrichissement et la lixiviation des minerais, car elles entraînent le moins de déchets, un temps de traitement plus court pour les mineurs et des taux de récupération élevés. Premièrement, l'enrichissement est effectué par des techniques de gravité. Ensuite, le concentré est broyé et lessivé simultanément. Lorsque la lixiviation chimique est utilisée, il est important que les mineurs manipulent correctement les produits chimiques et s'assurent qu'ils sont correctement utilisés et stockés pour éviter les problèmes de santé et d'environnement. Plusieurs méthodes sont utilisées tels que :[11]

Depuis les années 1890, le cyanure a été utilisé pour récupérer l'or des minerais aurifères. Et aujourd'hui, plus de 125 ans plus tard, la majeure partie de l'or du monde est récupérée avec du cyanure en jouant un rôle important dans l'enrichissement du métal précieux jaune. Chimiquement, c'est une réaction plutôt simple :



La force de la solution de cyanure est également importante dans la lixiviation de l'or, la gamme typique de solution se trouvant dans le NaCN 0,02% -0,05%. La taille des particules d'or a un effet énorme sur le temps requis pour la dissolution dans une solution de cyanure. Généralement, plus l'or est fin, plus il se dissoudra rapidement. Une particule d'or de 45 microns se dissoudrait en 10-13 heures, tandis qu'une particule de 150 microns pourrait prendre de 20 à 44 heures pour se dissoudre dans la même solution.

L'oxygène joue également un rôle important dans une solution de cyanure. La vitesse de dissolution de l'or dans la solution de cyanure est directement proportionnelle à la quantité d'oxygène présente. L'eau normale contient de 8 à 9 ppm d'oxygène dissous. Si cet oxygène est épuisé par d'autres réactions, il peut être nécessaire d'aérer la solution, en y introduisant de l'oxygène, pour accélérer la réaction. Le coût étant toujours le facteur déterminant, la décision d'aérer et d'accélérer la réaction sera prise sur la base des études économiques et des tests en laboratoire.

1.8 Méthodes de récupération d'or

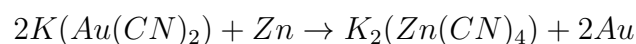
Une fois extrait et traité par les méthodes d'extraction et de traitement sus-citées, l'or doit être récupéré. Deux procédés de traitement sont usuellement utilisés : la précipitation sur le zinc ou sur l'aluminium, procédé ancien, et l'adsorption de l'or sur le charbon actifs, procédé apparu industriellement dans la dernière décennie.

1.8.1 Précipitation sur zinc ou aluminium

La mise au point de la précipitation de l'or sur la poudre de zinc (procédé Merrill-Crowe) comme méthode efficace de récupération de l'or en solution cyanurée a été un facteur important pour le développement et le succès de la cyanuration au début du siècle.[12]

Le procédé de la précipitation comprend :

- Une séparation liquide solide après cyanuration (décantation à contre courant) ;
- Une clarification de la solution aurifère ;
- L'ajout de la poudre de zinc ou d'aluminium et de sel de plomb qui améliore la précipitation de l'or, Le zinc remplace l'or dans le complexe auro-cyanure pour former un nouvel ion complexe suivant la réaction globale :



- La récupération de l'or précipité sur un filtre-presse.

1.8.2 Adsorption sur charbon actif

Le principe de la récupération de l'or par le charbon actif repose sur la propriété qu'ont les matières carbonées activées d'adsorber l'or contenu dans les cyanures. Le charbon actif est préparé à partir de charbon végétal naturellement dur (noyaux de fruit, noix de coco) traité spécialement pour développer sa capacité d'adsorption et sa porosité. La granulométrie de ce charbon est comprise généralement entre 0,8 à 3 mm. En fin d'adsorption le charbon chargé est récupéré et traité par élution. Plusieurs procédés d'élution existent. Le premier appliqué est celui de Zadra, il utilise une solution à 1% de soude et 0,1% de cyanure de sodium à la température d'ébullition à pression atmosphérique.

Une amélioration de ce procédé consiste à introduire environ 10% d'éthanol dans une solution à 2% de soude ce qui accélère la cinétique d'élution de l'or. Enfin le procédé est développé en Afrique de sud, utilisant de l'eau pure après un trempage du charbon chargé dans une solution à 5% de cyanure de sodium et à 1M de soude. Les solutions éluantes aurifères sont ensuite traitées par électrolyse, l'or se déposant sur des cathodes de laine de fer. [13]

1.9 Critères de choix et sélection d'un procédé de traitement

De nombreuses données doivent être prises en considération dans la sélection d'un procédé. Ces données concernent le gisement. Le minerai, les résultats des essais préliminaires, les conditions Locales etc. Parmi les principaux facteurs intervenant on peut citer [14] :

- **Le gisement** : Le couple tonnage de minerai/teneur en or donne au départ une indication sur la quantité d'or à récupérer et oriente le projet vers un procédé classique complet ou vers un procédé à faible coût comme la cyanuration en tas. La nature de l'exploitation minière (mine souterraine ou à ciel ouvert) est aussi une donnée à prendre en considération, ainsi que la présence d'un ou plusieurs faciès de minerais (zone superficielle oxydée. zone cimentée, zone non altérée...).
- **La minéralogie** : La connaissance de la minéralogie du minerai permet de prévoir si le minerai étudié aura un comportement simple ou complexe. L'identification des difficultés potentielles permet d'orienter le programme d'essais en conséquence.
- **La nature de la gangue** : La présence de certains éléments (carbone, et pifes...), la granulométrie du minerai, la porosité des fragments etc. sont des informations utiles qui orientent le choix vers certains procédés de traitements ou de prétraitements.
- **la réponse du minerai aux essais de laboratoire** : Bien évidemment le comportement du minerai lors des essais est une donnée essentielle. Les résultats des essais confirment les premiers choix de procédés ou les orientent différemment.

- **Les conditions locales** : De multiples facteurs peuvent intervenir : ✓ Quantité d'eau disponible; ✓ Éloignement du gisement; ✓ Qualité de la main-d'œuvre; ✓ Moyens d'accès; ✓ Présence de gisement d'or en exploitation à proximité; ✓ Climat; ✓ Topographie.

- **Les conditions économiques** : Une appréciation économique doit s'ajouter aux appréciations techniques qui tient compte de :
 - ✓ LE prix de l'or; ✓ Rythme d'exploitation et la durée du gisement; ✓ Coût des réactifs rendus sur place.

1.10 Innovations et axes de recherches

Avec la bonne tenue des cours de l'or et le regain d'activité dont fait preuve cette partie de l'industrie minière, de nombreuses innovations voient le jour et améliorent les procédés existants ou ouvrent la possibilité de traiter des minerais nouveaux.[15]

Pour la dernière décennie, les innovations les plus marquantes déjà en exploitation industrielle sont : la lixiviation de l'or en tas et le procédé d'adsorption de l'or par charbon actif en pulpe. Les améliorations en cours de développement et les axes de recherches principaux sont actuellement basées sur :

- ✓ L'amélioration de la perméabilité des tas par agglomération au ciment et bouletage du minerai.

- ✓ Une amélioration complémentaire consiste à ajouter le cyanure de sodium sous forme de solution très concentrée au moment de l'agglomération. Cette disposition permet d'accélérer la mise en solution de l'or.

- ✓ La recherche de nouveaux réactifs, permettant notamment de travailler en milieu acide. En effet certains prétraitements se font en milieu acide, ce qui oblige à un changement d'eau et une neutralisation coûteuse pour passer en milieu basique cyanure. De même, certains minerais présentent en solution une acidité naturelle pouvant par exemple condamner la lixiviation en tas. Parmi les réactifs examinés, le thiosulfate apparaît comme le plus prometteur. Les avantages de ce réactif sont : la cinétique rapide (2 à 3 h), une sensibilité moindre aux variations de composition de l'alimentation et aux conditions de grillage préalable, une récupération de l'or souvent meilleure qu'avec le cyanure.

- ✓ La lixiviation de l'or sous pression ou une oxydation de concentrés d'or sous pression. Le but de ces travaux est de remplacer le grillage des concentrés de sulfures (problèmes d'environnement), d'améliorer la vitesse d'extraction de l'or ou de traiter directement des minerais réfractaires ou carbonés. Le solvant de l'or, cyanure ou autres réactifs est introduit pendant le traitement sous pression ou seulement après, une fois les sulfures sont oxydés et l'or est libéré[16]. Jusqu'à présent, ces procédés n'ont pas connu de développement industriel, de nombreux autres domaines du traitement des minerais d'or font l'objet de recherche. C'est par exemple l'amélioration de la conception des installations

de charbon en pulpe vers des systèmes plus compacts et plus efficaces, la mise au point d'unités de trainement mobiles, etc.

Deuxième Chapitre

Identification de la mine d'or d'Amesmassa

Chapitre 2

Identification de la mine d'or d'Amesmassa

2.1 Introduction

A l'heure actuelle, la mine d'Amesmassa représente l'unique gisement aurifère en phase d'exploitation en Algérie. Son exploitation se fait par l'ENOR/Spa qui fait partie du groupe MANAL.

Le présent chapitre est une synthèse des différents travaux réalisés sur le gisement, notamment : les travaux de prospection-évaluation, les études de faisabilité et les travaux d'exploitation. Il est axé sur les majeures lignes suivantes :

- Historique des travaux réalisés ;
- Cadre Géologique et minéralogique ;
- Calculs des réserves ;
- Caractéristiques des structures aurifères du gisement Amesmassa ;
- Activités opérationnelles et état d'avancement de l'exploitation.

2.2 Historique de la mine

La découverte des gisements d'or à l'Ahaggar (Hoggar) remonte à l'année 1970. Les projets développés par l'entreprise ENOR concernent les gisements de Tirek et Amesmassa, découverts par la SONAREM respectivement en 1971 et 1978. L'évaluation géologique de ces gisements s'est poursuivie, bientôt relayée par ceux de l'Office National de la Recherche Géologique et Minière (ORGM). Les études de pré-faisabilité de ces projets ont été initiées dès 1989 par l'Entreprise Nationale des Produits Miniers Non Ferreux et des substances utiles (ENOF). Il a fallu attendre l'évaluation géologique complète du gisement d'Amesmassa et la création de l'ENOR en avril 1992 pour parachever les études techniques et économiques nécessaires à la mise en exploitation de ces deux gisements. A cet effet, un contrat a été signé avec un bureau d'étude canadien (SIDAM) pour la réalisation d'une étude de faisabilité. Cette étude fut suivie des études d'ingénierie de base réalisées par la société canadienne KILBORN-TESCULT.

La concession minière est octroyée initialement à l'ENOR SPA par le Ministère de l'Énergie et des Mines par arrêté N°78 / MIM / 92 en date du 21 octobre 1992 pour une durée de vingt (20) ans. Reconvertie en 2012 par l'Agence Nationale de Patrimoine Minier (ANPM) en permis minier de petite et moyenne mine, conformément aux dispositions de la loi minière 01-10 du 03 juillet 2001 pour une période de 10 ans renouvelable. (Titre N°6670 PM DU 31/12/2012.). Le permis couvre une superficie de 1397 km² et porte sur l'exploitation de l'or et argent associé.

Le début de la production de l'or fut en juin 2001 dans le gisement de Tirek et avec le temps, l'entreprise a envisagé d'exploiter le gisement d'Amessmassa dans le cadre d'un projet de partenariat étranger avec la firme australienne GMA jusqu'en 2012 où elle est devenue à 100 % filiale du groupe MANAL. [17]

2.3 Cadre géologique et minéralogique

2.3.1 Situation géographique et économique

Le gisement aurifère d'Amessmassa est situé dans le SW du Hoggar (Sahara Algérien), les coordonnées sont de 2°29' de longitude Est et 20°59' d'altitude Nord .

Le gisement est situé à environ 450 km au sud – ouest de Tamanrasset, à la limite des feuilles topographiques de Tirek (partie sud) et IN-Ouzzal (partie nord) . le relief de la région du gisement et de ses environs est représenté par un plateau désertique faiblement accidenté dont les altitudes maximale atteignent rarement les 600 m et les dénivelés relatifs varient de 5-10 m à 30-50 m.

Les conditions climatiques sont spécifiques pour les régions désertiques du Sahara, les précipitations moyennes sont de l'ordre de 5-10 mm/ans et la température est de 10°-15° en hiver ,en été elle atteint les 50° . Notons que la période la plus favorable pour effectuer les travaux de terrain va du mois d'octobre au mois de mai.

L'approvisionnement en eau potable est effectué à partir du puits d'Iraldiouine et du bassin du Tanezrouft qui se situent à coté du gisement.

Du point de vue économique, la région est faiblement développée, elle ne dispose ni d'infrastructures socio-économiques ni de sources d'énergie ni de gisements de matériaux de construction connus à l'heure actuelle. La main d'oeuvre vient en général du nord du pays[17].



FIGURE 2.1 – Carte de localisation géographique d'Amesmassa

2.3.2 Cadre géologique régional

Le gisement d'Amesmassa est situé dans la partie sud-ouest du bouclier Touareg dans le Hoggar, formé par des terrains précambriens. Il est localisé à l'intérieur de la faille d'In-Ouzal qui sépare deux blocs tectoniques, un bloc Ouest composé de formations archéennes constituant le môle d'In-Ouzal et représentées par des granulites, des gneiss, des schistes et des marbres, et un bloc Est formé de roches d'âge protérozoïque inférieur (suggarien) représentées par des gneiss et des quartzites recoupés par des gabbros. Cette faille régionale se rattache au système de l'accident tectonique majeur méridien et qui met en contact côte à côte deux zones structuro-formationnelles parmi les plus importantes du Hoggar occidental[18].

2.3.3 Minéralogie des minerais

La formation des minéralisations aurifères le long de la faille d'In-Ouzal-Est est associée à un processus hydrothermal à température relativement haute. Ce processus fut très avancé dans les zones de mylonitisation et de broyage sur la bordure orientale du môle archéen d'In-Ouzal.

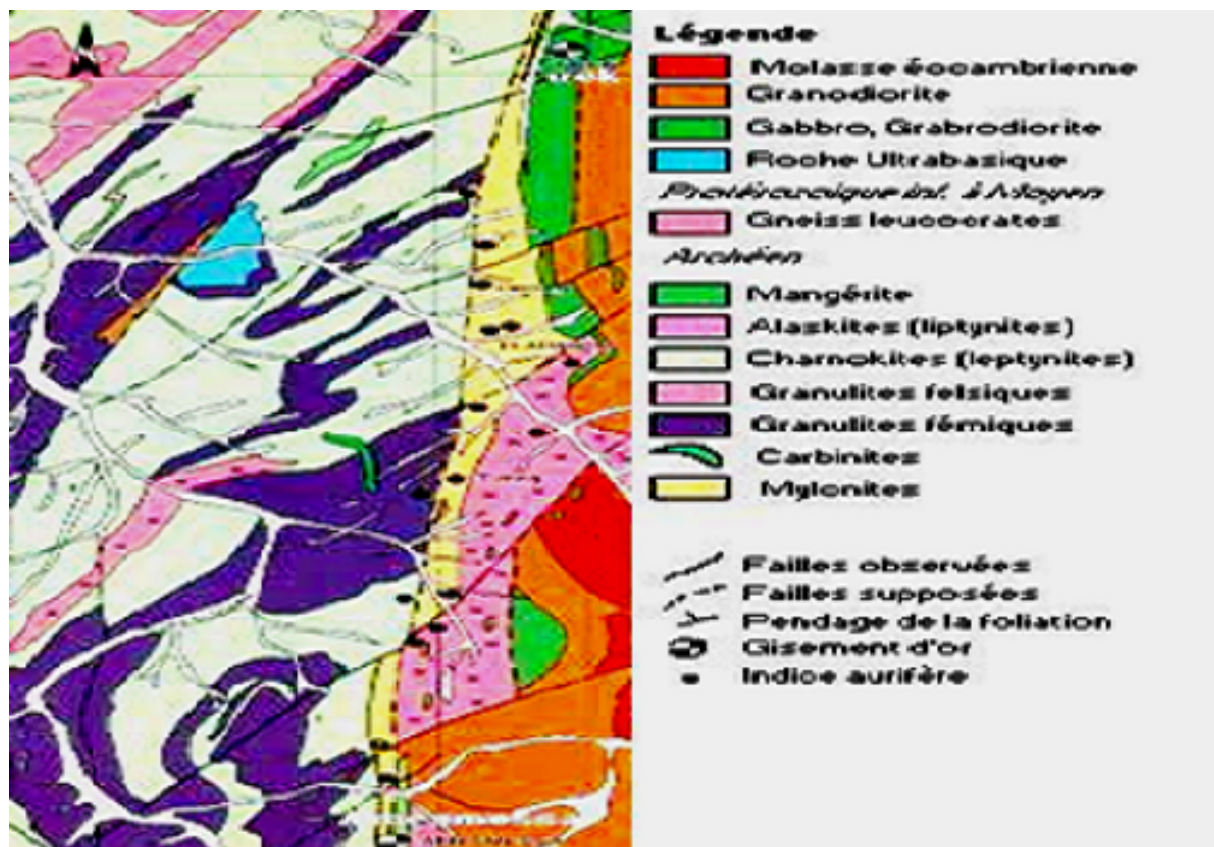


FIGURE 2.2 – Carte géologique de la région d'Amesmassa

L'étude de la composition de la minéralisation, la para-genèse de ses associations minérales permet d'établir la succession et les stades de la formation des différents minéraux. Ces processus sont divisés en étapes hydrothermale et supergène.[19]

2.3.4 Propriétés technologique des minerais

Dans le gisement d'Amesmassa sont signalés deux types de minerais : primaire et oxydé. Ce dernier forme les niveaux supérieurs des corps minéralisés dont l'extension va jusqu'au -20 -30m. Il est constitué de quartz (25-30%) de roches silicifiées, bérésitées (70-75 %) et aussi de minéraux super-gènes (hématite, malachite et azurite).[19]

La masse volumique des minerais oxydés varie entre 2,44 et 2,86 t/m³, en moyenne de 2,62 t/m³ dans les minéraux oxydés, on observe souvent des grains d'or, visibles à l'œil nu et dont les dimensions atteignent parfois quelques mm. Néanmoins, la majeure partie de l'or dans ce type de minerais est représentée par une dissémination fine allant de 0,003 à 0,5 mm. et dont la teneur est extrêmement variable.

En outre, il faut signaler qu'en plus des minerais oxydés dans la zone d'oxydation, on note souvent la présence des minéraux primaires. Les minerais mixtes existent en surface dans les zones de faible fissuration. Dans les filons constitués uniquement par du quartz,

on peut constater des sulfures primaires non affectés par les processus supergènes.[19]

Élément majeur	%	Composition	%
<i>SiO₂</i>	67,5	<i>Quartz</i>	45,6
<i>Al₂O₃</i>	8,56	<i>Mica</i>	29,1
<i>MgO</i>	2,59	<i>Chlorite</i>	8,5
<i>CaO</i>	3,49	<i>Feldspaths</i>	6,7
<i>Na₂O</i>	0,8	<i>Pyrite</i>	3,7
<i>K₂O</i>	2,5	<i>Dolomite</i>	3,3
<i>TiO₂</i>	0,67		
<i>MnO</i>	0,09		
<i>P₂O₅</i>	0,16		
<i>Totale</i>	92,62	<i>Totale</i>	96,8

TABLE 2.1 – Composition chimique et minéralogique.

2.3.5 Minéralisation de gisement

le gisement d'Amesmassa appartient à la formation quartzo-aurifère à paragenèse (pyrite –galène-blende) contenant jusqu'à 5% des sulfures. Le gisement d'Amesmassa est de type filonien où l'or est disséminé dans les filons de quartz accompagné de sulfures métalliques à faible teneur.

Les filons de quartz sont à faible épaisseur (0,2 à 2,0 m, rarement jusqu'à 3m, soit une épaisseur moyenne de 1,66 m) et un fort pendage. les corps minéralisés sont encaissés dans des mylonites.[19]

2.4 Caractéristiques des structures aurifères du gisement Amesmassa

2.4.1 Estimation des réserves

Conformément à la classification des gisements en vigueur (Russie), le gisement d'Amesmassa appartient au groupe III. Ce groupe englobe les gisements dont la géologie est très compliquée. Ils sont du type de zones constituées par de minces filons ou représentées par des zones minéralisées de moyennes importances, c'est à dire la longueur va de quelques centaines à plusieurs milliers de mètres. La puissance des corps minéralisés varie de quelques centimètres à 3 m. La morphologie des corps est très compliquée, alors la répartition de la minéralisation est extrêmement irrégulière.

Pour ce groupe de gisements, les ressources estimées par l'ORGM (1993) et celui de l'étude de faisabilité réalisée par GRD Minproc (2005) pour le compte de l'ENOR des

blocs géologiques en utilisant la méthode des polygones sont classées en catégories géologiques C1 et C2 selon la classification russe.[18] [19]

Catégorie géologique	Tonnage minerais (tonnes)	Teneur g/t
<i>Probable(C1)</i>	1 392 900	18.6
<i>Possibles(C2)</i>	1 025 700	17.1
<i>Total</i>	2 418 600	18.0

TABLE 2.2 – Réserves estimées ORGM (1993)

2.4.2 Structures aurifères du gisement d'Amesmassa

Sur le territoire du gisement, sont mises en évidence 50 zones quartzieuses (filons de quartz), dont 36 furent l'objet de travaux plus au moins détaillés par des tranchées, des sondages et des travaux miniers souterrains, dont l'extension N-S est de 13km divisée en trois secteurs : Centre, Nord et Sud.[19] [20]

- **Le secteur centre** : Ce secteur est constitué par les zones NN 7,8,9,10,11 qui sont les plus importantes aussi bien du point de vue économique. Elles sont aussi les mieux étudiées jusqu'à ce jour. Elles concentrent 74.4% des réserves bilans calculées en catégorie C1+C2. Les zones 7,8,9 sont continués du nord au sud sur près de 3 km. A l'Est, sont parallèles du côté toit des zones 10 et 11, étudiées de manière fragmentaire sur 1 km environ.
- **Le secteur Nord** : Situé à environ 3 km au nord du précédent. Il est constitué par les zones 12,17,18 situées au nord de l'oued Tamesguida et les zones 13,15,16, situées au sud de ce oued. Dans ce secteur sont localisées 19.2 % des réserves totales du, gisement. La longueur de ce secteur est de 3 km. Il est représenté par deux systèmes de zones : à l'Ouest les zones 13,16,17,18 et à l'Est les zones 12 et 15. A ce même secteur sont rattachées les zones 33,34,et 35 situées le long de la bordure occidentale de faille In-Ouzzal Est. au sud de zone 17 et en direction du secteur central sont situées les zones 36 et 32.
- **Le secteur Sud** : Il est séparé du secteur Nord uniquement par des dépôts meubles de l'oued d'Amesmassa, il se prolonge en dessous de ce dernier sans discontinuité . A ce secteur sont rattachées les zones 1,2,3,4, et dont la longueur est de 2 km. Les réserves de ce secteur représentent 6.4% du total.

2.4.3 Les zones (filons) en exploitation

Actuellement, les zones en phase d'exploitation par l'ENOR dans le gisement d'Amesmassa sont les filons 8 et 9, les tableaux suivants représentent les réserves géologiques indi-

quées dans ces deux zones par l'étude de faisabilité réalisée par GRD Minproc (2005)[18]
 [20].

Catégorie	Tonnage minéral (tonnes)	Teneur (g/t)
Probables	237 000	6,9
Possibles	238 000	3,5
Total	475 000	5,2

TABLE 2.3 – Réserves géologiques filon 8 de la mine d'Amesmassa

Catégorie	Tonnage minéral (tonnes)	Teneur (g/t)
Certaines	100 000	19,1
Probables	706 000	12,8
Possibles	572 000	9,9
Total	1 379 000	12,1

TABLE 2.4 – Réserves géologiques filon 9 de la mine d'Amesmassa

2.5 Exploitation de la mine

Le gisement est composé de plusieurs filons aurifères de longueurs variables allant de 200m jusqu'à 1500m. Ces filons affleurent sur un sol à reliefs plat, peu accidenté, ils ont une direction subméridienne et un pendage de 60° à 85° vers l'ouest. La méthode d'exploitation se fait à ciel ouvert appelée excavation globale en fosse emboîtée avec transport. L'exploitation se développe verticalement du haut vers le bas par fosses successives comportant du minerai et du stérile que l'on est obligé d'excaver, et de déplacer au fur et à mesure de l'approfondissement des travaux d'exploitation. L'exploitation avance en succession de tranches horizontales de 5 m pour former des gradins de 15 m de hauteur. L'angle des gradins est de 50° pour le premier gradin car ce dernier contient des terrains meubles et de 60° pour le reste des gradins[21].

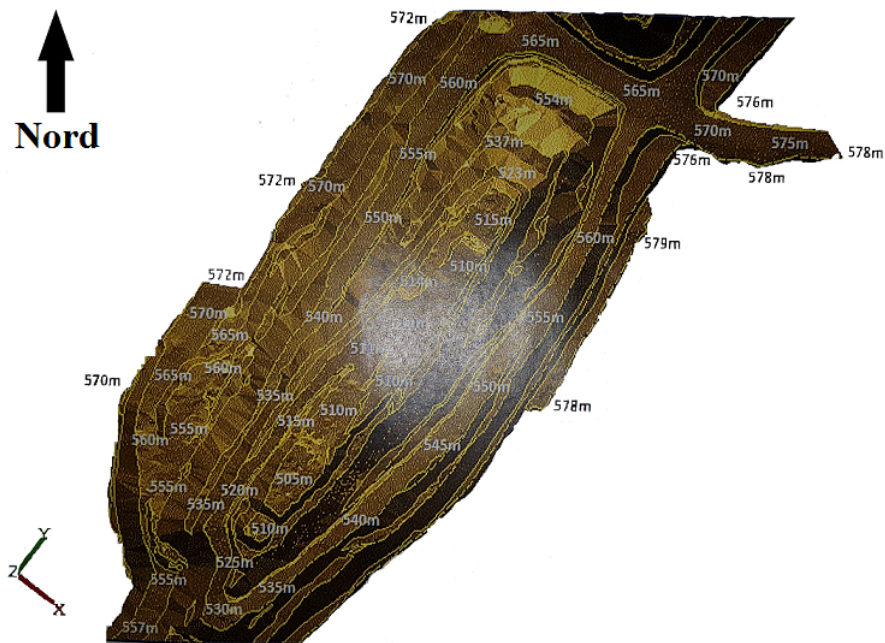


FIGURE 2.3 – État des lieux carrière gisement d'Amesmassa filon-8 (fin 2017)

2.5.1 Paramètres de la mine :

Basé sur l'étude géotechnique préliminaire faite en aout 2005 par "Peter O'Brayan. Consultants en Mining Geomechanicas" et en collaboration avec "George, "Alan Thompson Geotechnology" et "Peter Clifton Associates".

Hauteur des gradins	< 15 m	Pour la carrière
Angle des talus des gradins	50° 60° à 65° 70° à 75°	Pour 10 m de profondeur Profondeur de 10 à 90m Profondeur de 90 à 150m
Largeur de la berme de sécurité	5 m	Pour les hauteurs < 10 m
Angle des bords	47° à 54° 48° à 58°	Pour les bords sans rampe Pour les bords avec rampe
Profondeur finale	170 m	En instance plan de relance
Largeur de la plateforme	$\geq 12m$	/
longueur des gradins	Variable	/

TABLE 2.5 – Les paramètres de la carrière adopté par l'exploitation de la mine d'Amesmassa

2.5.2 Régime de fonctionnement dans la mine :

Le régime de fonctionnement de la mine, est défini comme suit :

Nombre de jours ouvrables par an	366 jours
Nombre de jours ouvrables par semaine	07 jours
Nombre de postes par jour	02 postes
Durée d'un poste de travail	12 heures
Durée effectif d'un poste	11 heures

TABLE 2.6 – Régime de fonctionnement dans la mine la mine d'Amesmassa

2.5.3 Équipements utilisés dans la mine :

Les équipements utilisés à dans la mine d'Amesmassa sont :

2.5.4 Les travaux de foration et de tir :

L'abattage de la roche se fait par des travaux de forage et de tir à l'explosif vu la dureté élevée du minerai de l'or composé de quartz (7) selon l'échelle de Mohs .

La foration des trous de mine se fait par une sondeuse d'une capacité de 30 m/h avec un mode de forage roto-percutant ayant les paramètres suivants :

- Diamètre du trou : 10.5cm;

Opération	Désignation	Marque
Forage	Sondeuse	TAMROCK
Chargement	Pelle hydraulique	CATERPILLAR
Transport	Dumber articulé	CATERPILLAR
Terrassement	Bulldozer, Niveleuse	CATERPILLAR

TABLE 2.7 – Équipements utilisés dans la mine d'Amesmassa

- La profondeur du trou : 5.80m ;
- Distance entre les trous : 2.5m ;
- Distance entre les rangées : 3m .

Une fois forés, les trous seront chargés avec des explosifs (marmanite, anfonile) pour effectuer un tir bouchon en utilisant des outils de liaisons entre les trous :

- Cordeau détonant (10g/m) ;
- Détonateurs électriques ;
- DMR (Détonateur Micro Retard) 20 ms ;
- DEI (Détonateur Électrique Instantané)

2.5.5 Chargement et transport de la masse rocheuse :

Après l'abattage de la masse rocheuse, elle sera chargée et transportée dans des aires de stockage en utilisant des camions et pelles mécaniques ou elle sera répartie en catégories économiques :

- Minerai riche : la teneur en or supérieure à 4g/t .
- Minerai pauvre : la teneur en or varie de 1 à 4g/t .

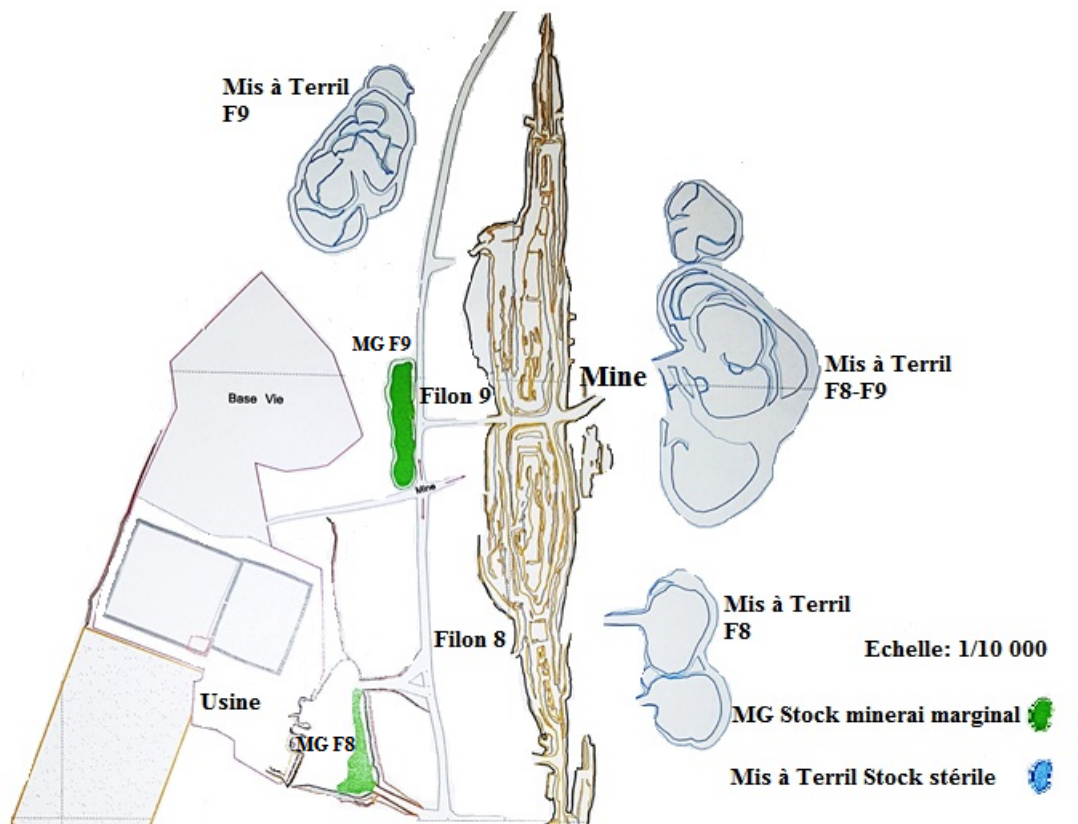


FIGURE 2.4 – Lieux de stockage minéral mine d'Amesmassa

2.6 Traitement du minerai d'Amesmassa (Process)

Le processus du traitement vise à récupérer la quasi-totalité d'or contenue dans le minerai, il se fait suivant deux procédés dépendant de la teneur économique du minerais qui sont :

- Lixiviation en tas : minerais pauvre la teneur en or est inférieure à 4 g/t ;
- Lixiviation en cuve : minerais riche la teneur est supérieure à 4 g/t.

Les deux procédés ci-dessus nécessitent une préparation mécanique du minerai afin de libérer les particules d'or.

2.6.1 Préparation mécanique

C'est une opération qui vise à réduire les dimensions des particules afin de libérer les constituants de minerais et de favoriser la suite du processus de traitement. Elle est constituée d'une succession de concassage et de broyage.

Alimentation :

L'alimentation de la station de concassage est assurée par une trémie d'une capacité de 30 m³ et alimente le concasseur primaire.

Concassage primaire :

Assuré par un concasseur à mâchoire de capacité de 100 t/h , la dimension du minerai à sa entrée est de d'un maximum de 1m, tandis que à sa sortie est de l'ordre de 90 -110mm.

Criblage primaire :

Le minerai issu du concassage primaire sera envoyé au moyen des convoyeurs à bandes vers un crible constitué de trois grilles vibrantes de mailles respectives : 100mm, 55mm, 25mm. La fraction supérieure à 25mm est envoyée au concasseur secondaire (concasseeur à cône) de capacité de 30t/h pour la réduire à 25 mm tandis que celle inférieure est redirigée vers le crible secondaire.

Criblage secondaire :

Contient deux grilles vibrantes de mailles respectives : 25 mm et 10 mm consiste à envoyer la classe [10 ; 25] vers les deux concasseurs tertiaires (concasseeurs à cônes), et la fraction <10mm vers un convoyeur à bande pour les stocker dans des zones de différentes teneurs en or.

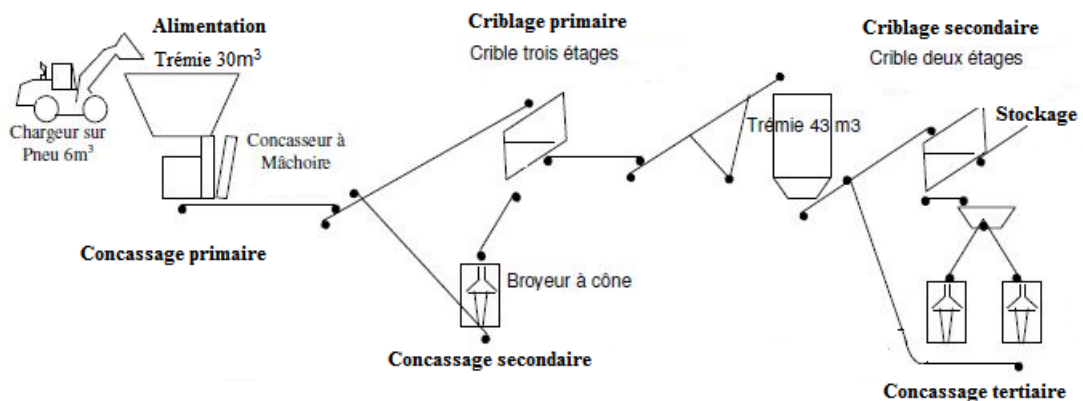


FIGURE 2.5 – Schéma préparation mécanique



FIGURE 2.6 – Préparation mécanique site d'Amesmassa

2.6.2 Traitement du minerai riche par lixiviation en cuves

Dans la lixiviation par cyanuration, le minerai est placé dans des cuves chargées d'une solution de cyanure qui sert à dissoudre l'or contenu dans le minerai. Le calibre des grains, les niveaux d'oxygène et d'alcalinité sont soigneusement contrôlés pour garantir une récupération maximale de l'or, pour cela ce processus nécessite d'abord un broyage, une classification et un épaississement.

Le Broyage :

Le produit final issu du traitement mécanique dont la teneur est supérieure à 4 g/t et sa granulométrie inférieure à 10 mm est acheminé vers une trémie qui alimente au moyen d'un convoyeur à bandes un broyeur à boulets à voie humide d'une capacité de 8t/h. L'ajout de la chaux pendant le broyage est indispensable, pour maintenir le pH entre 10 et 11.5 durant la cyanuration, et cela pour éviter les risques de dégagement du cyanure hydrogéné (gaz toxique HCN).

A la fin de cette opération, la dimension des particules est de l'ordre de 74 microm, c'est la maille de libération formant une boue en solution à 15% (c'est la maille de Taylor).

La Classification :

Cette méthode intervient comme un complément indispensable pour la bonne récupération de l'or. Elle est assurée par un hydro-cyclone et consiste à séparer et classer les minerais broyés en deux classes granulométrique :

- Classe riche en particules fines et légères <74 microm qui sera coulé vers un épaississeur.
- Classe riche en particules denses et grossières >74 microm qui sera re-broyer.

L'épaississement :

Cette phase est réalisée au moyen d'un épaisseur se forme d'un bassin de décantation pour la boue, afin de lui augmenter la densité à 50%. Pour faciliter l'opération on ajoute un flocculant organique sous forme d'une poudre blanche non toxique qui aide à accélérer la sédimentation des fractions en suspension.

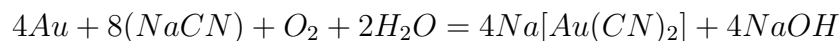
La lixiviation et l'adsorption sur charbon actif CIL (Carbon In Leach)

La lixiviation passe par un ingénieux circuit de six cuves de lixiviations, 6m de hauteur, 4m de diamètre et une capacité de 60m³. Ces cuves sont aérées et possèdent un système d'agitation.

Au niveau de la première cuve LT (Leach Tank) se fait l'introduction de la pulpe issue de l'épaississeur et de la solution de cyanure à une concentration de 300 ppm sous forme de gouttelettes, ce qui permettra la dissolution de l'or pour former un complexe auro-cyanures durant un temps de séjour de 36 heures.

le phénomène de lixiviation et d'adsorption se font simultanément dans les autres cuves CIL (charbon in Leach) qui contiennent des solutions cyanurées et du charbon actif de granulométrie allant de 1.2 à 1.6 mm qui adsorbe les particules d'or dissoutes dans la solution cyanurée grâce au principe du passage à contre-courant, la pulpe se déplace de la première cuve jusqu'à la dernière par gravité, par contre le charbon passe de la dernière cuve jusqu'à la première par le dispositif air lift, en formant des liaisons de type Van Der Waals avec l'or .

L'équation de lixiviation conventionnelle est :



La récupération du charbon chargé en or se fait depuis la première cuve à l'aide d'un tamis vibreur après un temps de séjour de 36 heures dans chaque cuve. Le charbon est lavé et transféré vers la raffinerie tandis que la pulpe est transférée vers un filtre presse qui joue le rôle de la récupération de la solution cyanurée ainsi la boue est conduite vers des aires de stockage pour rejet. Le taux de récupération de la méthode de lixiviation en cuves est de 96%.

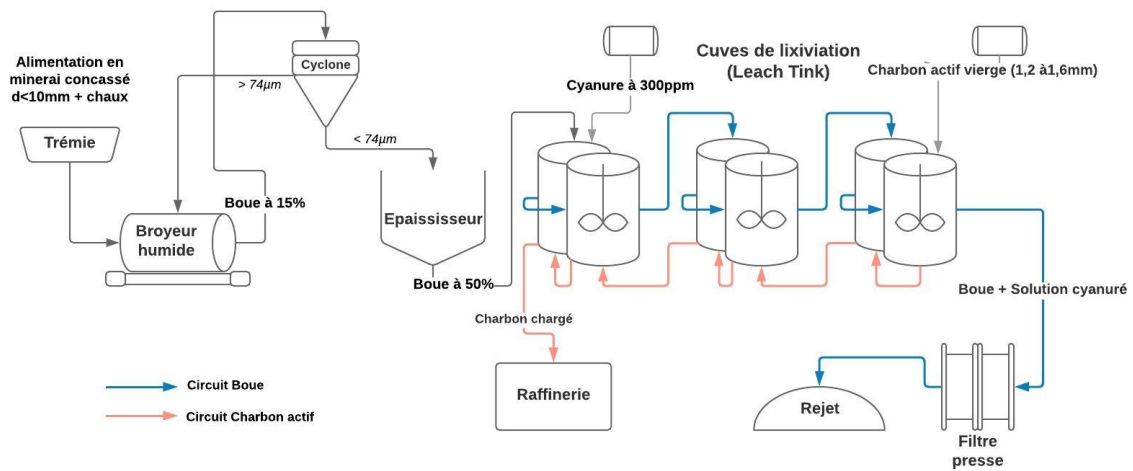


FIGURE 2.7 – Processus de la lixiviation en cuves (LEACH TINK)



FIGURE 2.8 – Processus de la lixiviation en cuves (LEACH TINK) mine d'Amesmassa

2.7 Traitement du minerai pauvre par lixiviation en tas (heap leach)

C'est la technique de traitement des minerais de faible teneur (inférieur à 4g/t) avec un taux de récupération de 70%.

Le minerai après avoir subi une préparation mécanique, c'est-à-dire qu'il passe par un concasseur primaire à mâchoires associé à un concasseur secondaire à cône et à un concasseur tertiaire à cône lui aussi, on obtient un minerai ayant une granulométrie d'environ 10mm. Le minerai à cette dimension est aggloméré avec du ciment (chaux) et envoyé vers le tas de lixiviation (heap leach).

La mine d'or d'Amesmassa possède deux tas de lixiviation d'une capacité de 1,5 millions de tonnes de minerai au total. L'air de lixiviation (Leach Pad) a une structure plane assurant l'isolation du tas vis-à-vis de l'environnement par un dépôt de deux couches d'argile bien compactes étanchées par une géomembrane en polyéthylène d'une épaisseur de 1.5 mm , et pour drainer la solution riche au fond de l'air de lixiviation une couche drainante est installée, elle est composée de tubes perforés intégrés dans une couche de gravier, ce système permet la collecte du lixiviat.

Le minerai est stocké sur l'aire de lixiviation (Leach Pad) sous forme de couches stratifiées où il est arrosé par une solution de cyanure pendant plusieurs semaines (120 jours), la solution cyanurée attaque le minerai et libère l'or, elle percole vers le fond du bassin où elle sera évacuée par pipes vers la fosse de récupération. Ce qui permet donc de récupérer les solutions cyanurées riches en or par pompage vers les colonnes de charbon (CIC). Durant toute l'opération, le pH du bassin est maintenu entre 10 et 11,5 par ajout de ciment ou de la chaux, afin d'empêcher toute émanation de cyanure.



FIGURE 2.9 – L'air de lixiviation (Leach Pad) mine d'Amesmassa



FIGURE 2.10 – Lixiviation en tas mine d'Amesmassa

2.7.1 Colonnes de charbon

La solution chargée en or récupérée après le processus de la lixiviation en tas sera pompée vers les colonnes de charbon, le principe utilisé est comme celui du traitement du minerai riche, grâce au passage a contre courant, le charbon va capter l'or présent dans les solutions cyanurées. L'adsorption de l'or sur le charbon actif se fait dans un circuit de 5 colonnes d'un 1,7m de diamètre et 2,7m de hauteur, l'injection de la solution dans la première colonne à $140m^3/h$, et le charbon dans la dernière, à la fin de l'opération le charbon chargé est récupéré à partir de la première colonne où il sera ensuite envoyé à la raffinerie et la solution après l'adsorption sera pompée pour la réutiliser dans la pulvérisation du tas de lixiviation.

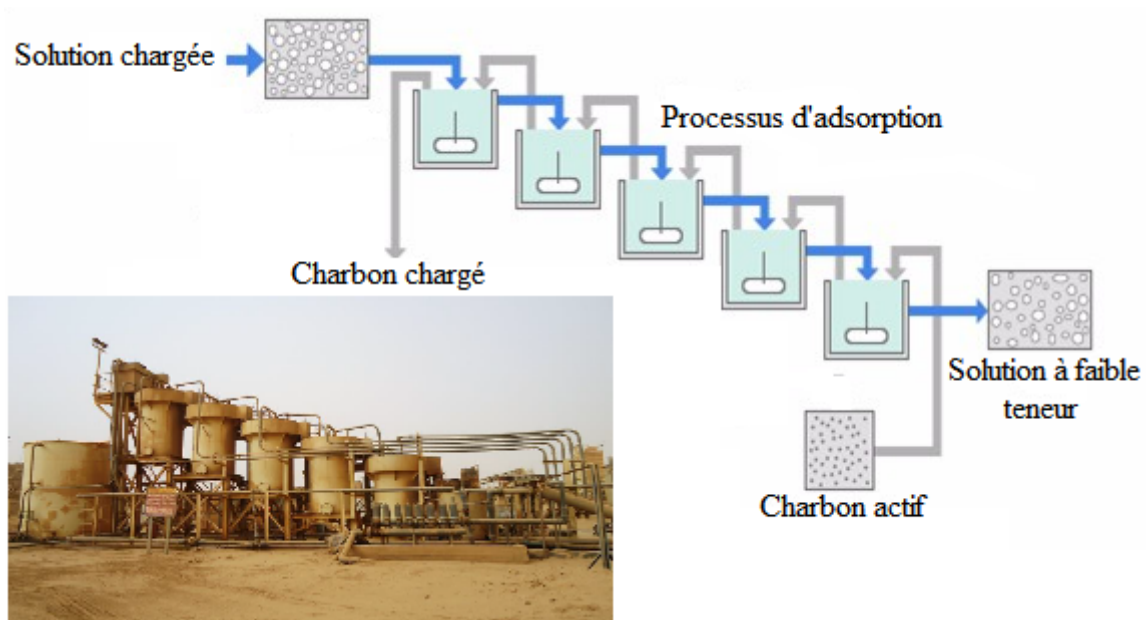


FIGURE 2.11 – Principe d'adsorption colonnes de charbon

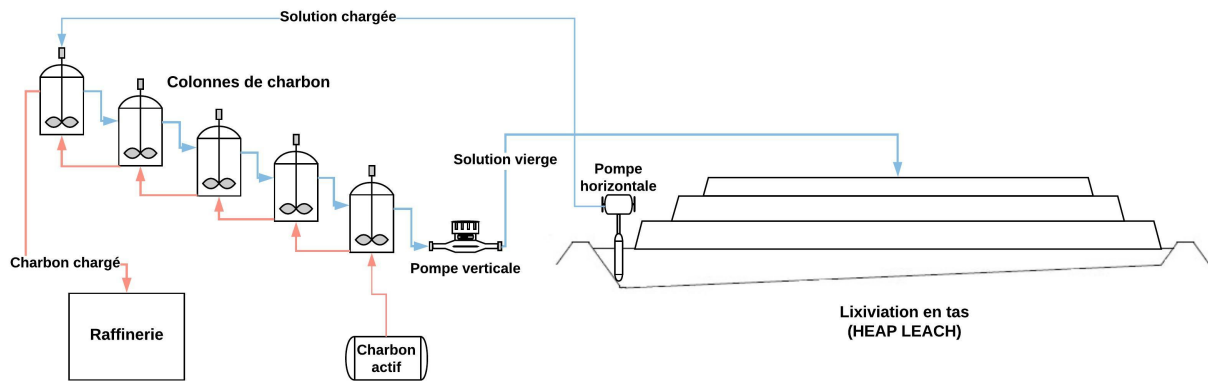


FIGURE 2.12 – Processus lixiviation en tas (HEAP LEACH)

2.8 Le raffinage de l'or

Après la récupération du charbon chargé issu soit des cuves de lixiviation ou des colonnes de charbon, il sera transporté vers la raffinerie qui correspond à la phase finale du processus, en effet c'est ici qu'on obtient le lingot fait du précieux alliage (or-argent). Mais avant d'en arriver à la forme finale de lingot, l'or contenu dans le charbon actif doit encore passer par plusieurs étapes commençant par le lavage du charbon, ensuite l'élution et l'électrolyse et enfin la fusion.

2.8.1 Le lavage du charbon

A la raffinerie le charbon chargé subit un lavage pendant 2 heures avec l'acide chlorhydrique pour éliminer les carbonates et les autres impuretés, on injecte le charbon avec l'eau à haute pression vers une colonne de lavage d'une capacité de 2 tonnes, on ajoute par la suite une solution l'acide chlorhydrique à 3% (HCl) qui monte d'en bas et qui passe à travers les filtres qui retiennent le charbon. L'ajout d'une quantité de la soude caustique (NaOH) à une concentration de 99% est nécessaire pour neutraliser le pH afin d'éviter la formation de gaz HCN.

2.8.2 L'élution

Une fois le charbon est lavé et neutralisé, il passe vers une colonne d'élution, où il sera mélangé avec une solution préparée d'eau ($1-1.5m^3$) + 0.1% de cyanure (NaCN) + 1% de soude caustique (NaOH) chauffée préalablement à l'aide d'une chaudière dans un échangeur de chaleur à une température de $140^{\circ}C$ dans un circuit fermé sous pression de 4 bar. Cette solution sera pompée vers la colonne d'élution avec une pression de 55 psis, ces conditions de température et de pression favorisent la libération des ions d'or des pores de charbon et permet donc de dissoudre l'or adsorbé et pour obtenir à la fin une solution aurifère qui passera ensuite à travers une cellule d'électrolyse.

A la fin de l'élution, le charbon sera recyclé et réactivé (régénération) dans un four à une température de 700° à $750^{\circ}C$. À la sortie, le charbon est refroidi par l'eau pour le réutiliser à nouveau.

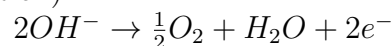
2.8.3 L'électrolyse

La solution aurifère passe dans une cellule d'électrolyse qui opère généralement sous une tension de 3.5 à 5 volts avec un courant continu de 1500 ampères contenant 8 cathodes et 8 anodes pendant au moins 24heures. Les cations Au^+ sont attirés par les cathodes où ils vont capter les électrons (e^-) donnant ainsi le métal d'or (Au). Les réactions d'oxydo-réduction sont :

— Réaction à la cathode (oxydation) :



— Réaction à l'anode (réduction) :



On récupère les cathodes chargées d'or et on les lave avec un jet d'eau à haute pression. La solution enrichie en or passe ensuite à travers un filtre pressé pour obtenir un concentré humide d'or appelé bourbe.

2.8.4 Le séchage

Après la récupération de la bourbe des cathodes, on effectue un séchage (calcination) en mettant la bourbe riche en or (Au) dans un étuve à $300^{\circ}C$ pendant 12 heures.

2.8.5 La fusion

La bourbe obtenue lors du séchage sera mélangée avec un fondant (50 % en masse de Borax, 25 % de Silice et 25 % de carbonates de sodium). Le mélange sera ensuite introduit dans un four à $1200^{\circ}C$ pendant 3 heures. A la fin de la fusion, le fondu obtenu sera versé dans des moules en acier, l'or puisque il est lourd reste au fond du premier moule et les scories passent vers les autres moules. Afin d'obtenir un lingot avec 80 à 85% d'or.

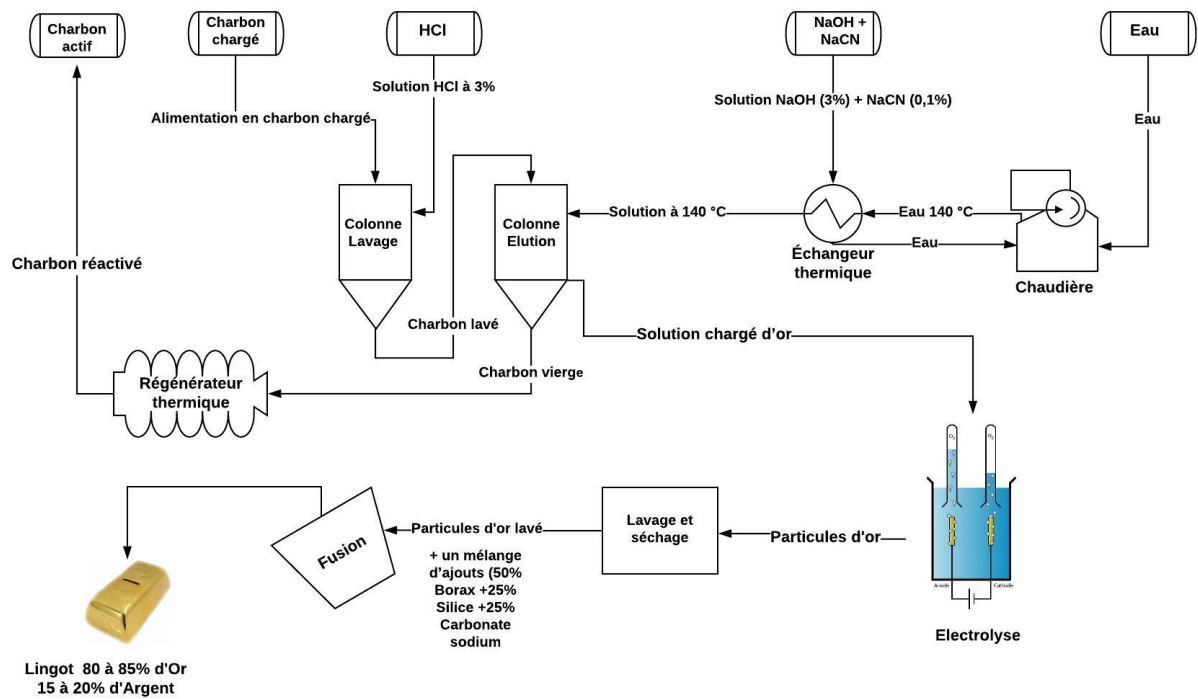


FIGURE 2.13 – Processus raffinage d'or

Troisième Chapitre

Affinage de l'or

Chapitre 3

Affinage de l'or

L'affinage du lingot d'or obtenu dans la mine d'Amesmassa se fait au niveau de l'agence nationale de la transformation et de la distribution de l'or et autres métaux précieux (AGENOR) dans le but d'extraire et de séparer les métaux précieux en les amenant à un très haut degré de pureté.

3.1 Présentation de l'entreprise

L'agence nationale pour la transformation et la distribution de l'or et des autres métaux précieux, par abréviation AGENOR, filiale du groupe MANAL, créée en janvier 1970 pour la prise en charge des opérations de transformation et d'affinage des métaux précieux (or, argent ,platine) pour le marché national . AGENOR est une société par action qui se situe à Barraki , sud de la capitale Alger, dotée d'un capital social de 200 millions de dinars avec un effectif de plus d'une centaine de cadres et travailleurs.[22]

L'entreprise possède une unité de transformation comportant des installations d'affinage de l'or et des métaux précieux et un laboratoire d'analyse et d'expertise qui sont destinés à la fabrication des produits industriels en métaux précieux sous forme de lingots ,grenaille, fil et plané .

3.2 Processus d'affinage de l'or

L'affinage de l'or est une opération qui consiste à la purification de l'or (999,9%) en enlevant l'argent associé et les autres métaux contenus dans le lingot issu de la mine d'or d'Amesmassa. Deux méthodes sont largement répandues à l'échelle industrielles pour affiner l'or qui sont :

- Chimique : via le processus de Miller (l'eau régale)
- L'électrolyse via le procédé Wohlwill

Un stage complémentaire à celui qui a été fait à Amesmassa a été effectué au niveau de l'AGENOR, afin de suivre les différentes étapes du processus d'affinage de l'or, notamment : le grenouillage, l'affinage et la fusion.

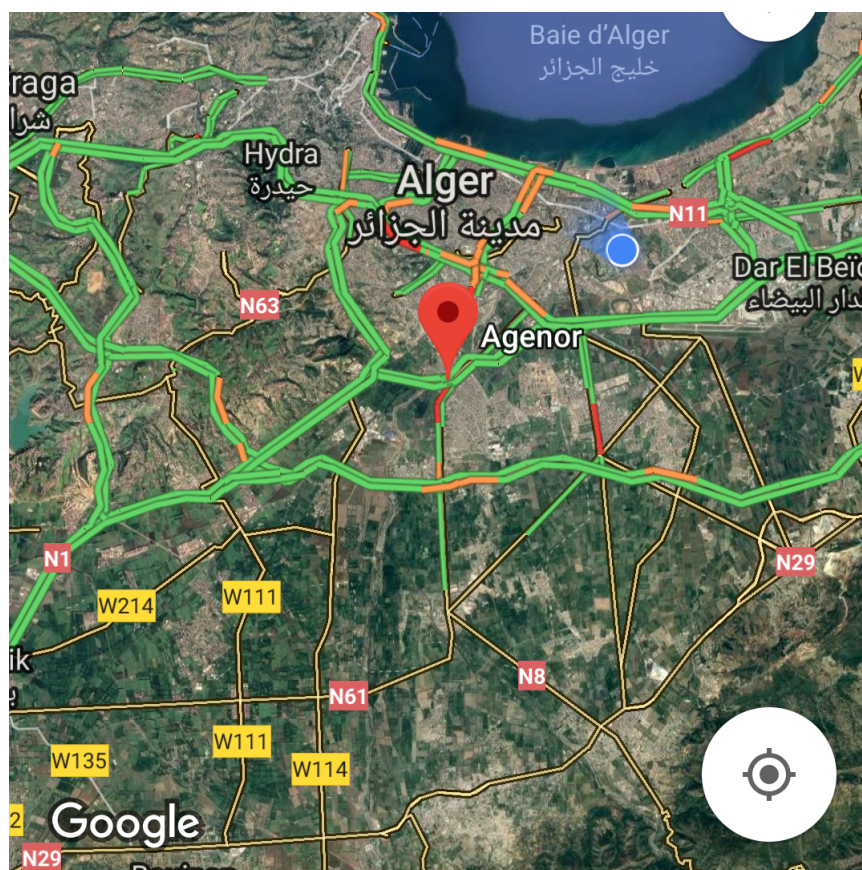


FIGURE 3.1 – localisation géographique Agenor

3.2.1 Le grenouillage

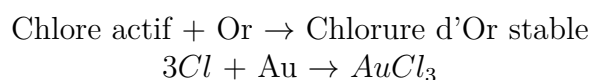
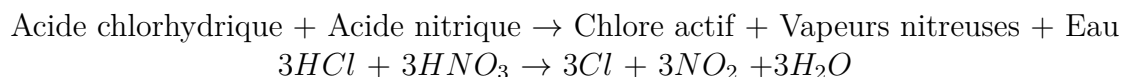
le grenouillage est une opération qui consiste en la réduction du lingot issu de la mine en grains (grenailles) de quelques millimètres, afin d'incrémenter la surface globale d'attaque des acides et donc réduire les temps du cycle d'affinage de l'or et d'assurer que la totalité du métal réagisse avec l'eau régale dans l'opération qui suit. Le grenouillage est assuré par une fusion à 1100°C dans des creusets en graphite, l'or fusionné subira à la sortie du four un jet d'eau à haute pression qui favorise la formation des grenailles.

3.2.2 L'affinage de l'or (attaque chimique par l'eau régale)

L'attaque chimique par l'eau régale (processus de Miller) est celle utilisée à l'AGENOR pour la purification de l'or, le processus est assuré à l'aide d'un dispositif qui contient des réservoirs gradués de stockage d'acides qui alimentent un tonneau d'affinage, ce dernier est un réacteur d'une capacité de 250 L en eau régale, doté d'un système de connexion par des tuyaux et une unité de filtrage.

Une fois le métal fragmenté et chargé dans le tonneau, l'eau régale, qui est constituée de trois parties d'acide chlorhydrique (HCl) et une partie d'acide nitrique (HNO_3) à forte concentration, est introduite graduellement dans le réacteur pour éviter une réaction chimique excessive, de telle façon que pour chaque kilogramme d'alliage d'Or à dissoudre,

il faut une quantité de 3 litres de HCl (acide chlorhydrique à 21°Bé) et 1 litre de HNO_3 (acide nitrique à 36°Bé). Dès que le mélange est préparé, on allume le tonneau qui fait un mouvement de rotation afin d’augmenter la cinétique de la dissolution de l’or et de la précipitation de l’argent[23]. Pour pouvoir vérifier l’évolution de la réaction chimique, des vapeurs rouges peuvent être vues à travers le condensateur de refroidissement des fumées, une fois celles-ci cessées cela signifie que la majeure partie de l’or a été dissoute. Chimiquement la réaction de la dissolution de métal qui se produit dans le réacteur est :



D’une manière scientifique on dit que l’acide nitrique joue un rôle d’oxydant son action est semblable à celle d’un catalyseur nécessaire à la dissolution de l’or dans l’acide chlorhydrique.

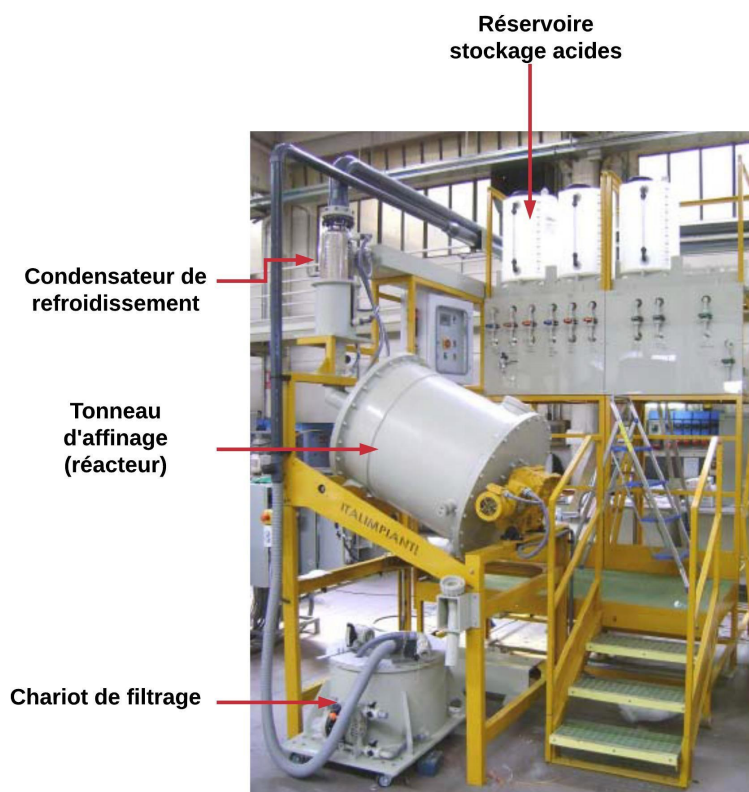


FIGURE 3.2 – Le tonneau réacteur

3.2.3 Le Filtrage de la solution

Il est assuré à l’aide d’un chariot de filtrage muni d’une pompe membrane et d’un papier filtre qui sépare les deux phases obtenues dans le réacteur, il s’agit d’une solu-

tion Aurichlorhydrique et une boue d’argent. La solution est envoyée vers une cellule de précipitation d’or, tandis que la boue d’argent subira un traitement secondaire pour une récupération totale de l’or.

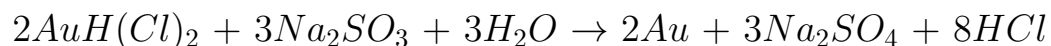


FIGURE 3.3 – Le chariot de filtrage

3.2.4 La récupération de l’or

L’or est facilement déplacé de ces solutions chlorhydriques par les réducteurs, parmi les réducteurs couramment utilisés citons : l’anhydride sulfureux, le sulfate ferrique, le sulfite de sodium, le zinc et l’aluminium.

Au niveau de l’AGENOR, le réducteur utilisé est le métabisulfite de sodium en raison de l’absence de métaux dans sa composition, qui peuvent provoquer une contamination (le cas du sulfate ferreux Fe_2SO_4). La réduction de l’or se fait par une injection manuelle de la poudre du sulfate de sodium (Na_2SO_4) dans la cellule qui contient la solution Aurichlorhydrique filtrée, la réaction totale d’oxydo-réduction est comme suit :



La réaction est contrôlée périodiquement par un appareil de mesure du potentiel d’oxydo-réduction (E), une valeur de $E < 0.400$ V indique que l’or est totalement réduit sous forme de boue qui subira par la suite un filtrage à l’aide d’un chariot de filtrage, un lavage à l’eau déminéralisée et enfin un séchage dans un étuve à $120^\circ C$ afin de récupérer une poudre de l’or pur à 999.9 ‰ . [23]



FIGURE 3.4 – Cellule de réduction, filtrage et séchage

3.2.5 La fusion

C’est la dernière étape du processus de l’affinage de l’or, la poudre de l’or séchée préalablement est introduite directement sans aucun ajout dans le creuset du four qui assure la température du point de fusion de l’or (1064°C). Après la fonte totale de la poudre, l’or fondu est versé dans des moules en graphite préchauffés, quelques secondes après, l’or se solidifie et prend la forme du lingot.



FIGURE 3.5 – La fusion de l’or

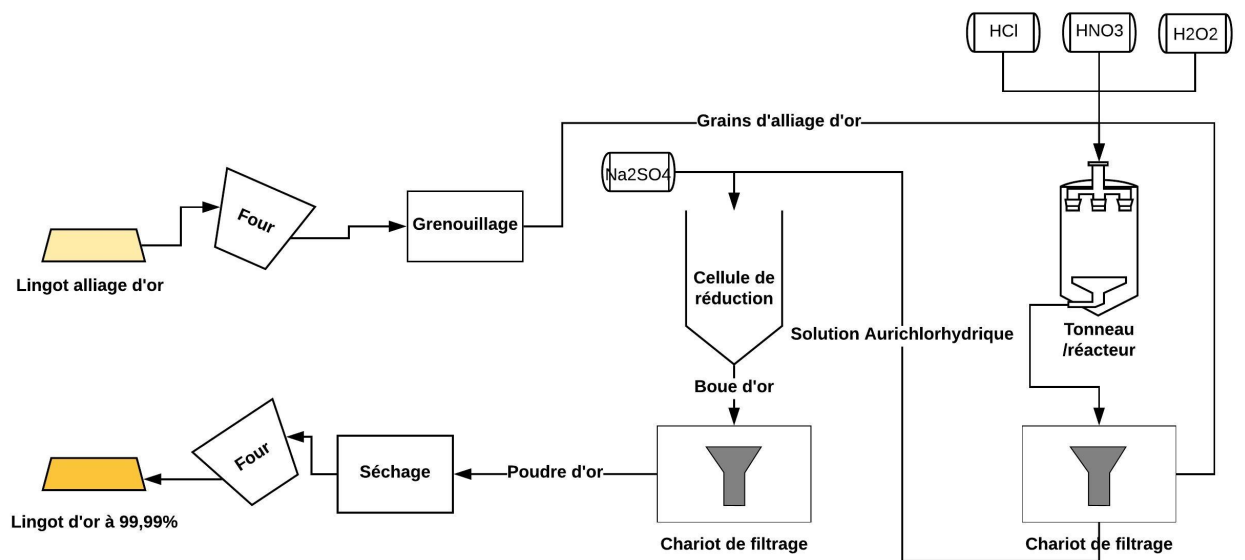


FIGURE 3.6 – Processus de l’affinage de l’or AGENOR

Partie expérimentale

Chapitre 4

Caractérisation de minerais d'or d'Amesmassa (Essais de laboratoire)

Ce présent chapitre a pour objet l'identification et la caractérisation du minerai d'Amesmassa en déterminant les différents paramètres physiques, chimiques et physicochimiques caractérisant notre minerais comme :

- La masse volumique apparente et absolue, la porosité et le taux d'humidité ;
- La teneur en or ;
- La composition minéralogique chimique.

4.1 Échantillonnage

L'échantillonnage est une étape très importante dans toute étude géologicominère. IL permet de réduire la fraction à étudier à partir d'un lot primaire en le divisant en plusieurs sous-échantillons selon divers processus, que ce soit manuellement ou bien mécaniquement. Cette opération assure la représentativité de notre minerai prélevé.

4.1.1 Prélèvement des échantillons

Une mission fut organisée le 25 décembre 2017 en vue d'effectuer un prélèvement d'échantillons du minerai de la mine d'Amesmassa provenant du filon 9, avec la présence du géologue de la mine. Les échantillons ont été prélevés à partir du tranché 9 du gisement d'Amesmassa. Ces échantillons représentatifs devaient subir des tests de caractérisation et de traitement en laboratoire, dans le cadre de nos travaux de projet de fin d'étude d'ingénieur (Génie Minier).

Echantillon	Cordonnées topographiques (X;Y)		Poids kg	Nature d'échantillon
Filon de quartz	447700.00	2324000.00	10	Minerais de high grade

TABLE 4.1 – Données de prélèvement d'échantillons Amesmassa

4.2 Préparation mécanique

La préparation mécanique regroupe les opérations qui se situent en amont de l'enrichissement des minerais par les procédés minéralurgique, ces opérations sont couplées avec des opérations de classement, visant soit à obtenir un simple calibrage de la matière fragmentée, soit à soustraire à la fragmentation les grains de dimension requise. Les opérations mécaniques sont caractérisées par le degré de réduction R , qui représente le rapport entre la dimension des plus grands blocs avant et après fragmentation :

$$R = \frac{D_{max}}{d_{max}}$$

4.2.1 Concassage

Le procédé de concassage consiste à la fragmentation de la masse rocheuse prélevée du filon 9 dans le but d'obtenir une composition granulométrique voulue et aussi afin de libérer les particules fines composant le minerai. Le concassage est un enchaînement d'opérations délivrant des particules de dimensions généralement inférieures à 1cm. Les opérations sont pratiquées toujours à sec, on distingue deux stades de concassage, le concassage grossier et le concassage secondaire.

Le concassage grossier

Assuré par un concasseur à mâchoire, il diminue la taille des blocs de 200 mm jusqu'à atteindre une dimension inférieure à 20mm, il est constitué de deux plaques en acier placées en angle (aigu), l'une fixe et l'autre pouvant pivoter autour d'un point d'ancrage, lui permettant d'exécuter un mouvement de va-et-vient. Le matériau alimenté entre les mâchoires est alternativement écrasé et relâché par leur mouvement de va-et-vient, jusqu'à ce qu'il sorte par l'extrémité inférieure (plus étroite).

Le concassage secondaire

C'est à l'aide d'un concasseur cylindrique, formé de deux cylindres tournant qui écrasent le matériau, ils réduisent la dimension issu du concasseur à mâchoires jusqu'à une valeur inférieure à 5mm.



FIGURE 4.1 – Concasseur à mâchoires

4.3 Échantillonnage au laboratoire

L'échantillonnage ayant autant d'importance que les essais, on doit prendre toutes les précautions nécessaires pour obtenir des échantillons représentatifs du gisement, et de l'état du matériau. On utilise diverses techniques, les plus utilisées étant le quartage manuel et le diviseur à couloirs.

4.3.1 Quartage manuel

Ce procédé consiste à partager le minerai homogénéisé en quatre quarts ayant la même proportion, dont les deux quarts opposés seront ceux qui formeront notre échantillon. On peut considérer cette technique comme première réduction de l'échantillon dont le principe consiste à :

- Étaler l'échantillon en galette, tout en le mélangeant (homogénéisation) ;
- Diviser la galette de matériau en quatre quadrants ;
- Prélever deux quadrants opposés ;
- Remélanger et étaler le reste en galette ;
- Prélever pour la deuxième fois, deux quadrants ;
- Répéter l'opération jusqu'à l'obtention d'un échantillon de poids convenable aux essais de laboratoire.

4.3.2 Diviseur à couloirs

On utilise des diviseurs à couloirs où chaque couloir doit avoir une longueur $l \geq 2.D$, D est le diamètre maximal des grains. Ce procédé est utilisé pour des matériaux secs ou légèrement humides. Le nombre de chutes ou de couloirs doit être pair, avec un changement périodique de couloir à échantillonner. On répète l'opération jusqu'à l'obtention de la masse désirée.



FIGURE 4.2 – Échantillonnage diviseur à couloirs

4.4 Caractérisation physique et chimique et physico-chimique

4.4.1 La masse volumique

La masse volumique apparente

La masse volumique apparente, souvent appelée improprement densité apparente, est une grandeur utilisée essentiellement avec les substances se présentant sous forme de

granulés afin de rendre compte de la masse de matériau contenue dans un volume donné, comprenant le volume d'air interstitiel.

Pour la déterminer, on a utilisé la méthode de l'éprouvette graduée

$$\rho = \frac{M}{V}$$

M : La masse de granule.

V : Le volume observé dans l'éprouvette.

Résultat : $\rho = 2.7g/ml$

La porosité

La porosité désigne l'ensemble des vides (pores) d'un matériau solide, c'est une grandeur physique qui varie de 0 à 1 définie comme étant le rapport entre le volumes des vides sur le volume total d'une roche, qui conditionne la capacité d'écoulement et de rétention d'une roche. Pour la détermination de la porosité de l'échantillon, on utilise la formule suivante :

$$P(\%) = \frac{(M_1 - M_0) \times \rho \times 100}{M_0}$$

M1 : La masse sèche ;

M0 : La masse après trempage dans l'eau ;

Résultat : P=0.23 %.

Taux d'humidité

Le taux d'humidité est défini par le pourcentage d'eau contenu dans l'échantillon. Il est calculé selon la formule suivante :

$$T(\%) = \frac{(M_1 - M_0) \times 100}{M_1}$$

M1 : Poids avant séchage ;

M0 : Poids après séchage.

4.5 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique permet de répartir quantitativement (masse) les différentes tranches granulométriques d'un tout-venant (minerai) fragmenté, afin de connaître le comportement de la roche lors du concassage qui dépend principalement de la constitution des grains et de leur dureté, ainsi que de fournir des fractions granulométriques qui serviront aux prochaines étapes de valorisation et de traitement.

On effectue une analyse granulométrique selon la norme européenne EN 933-1. Cette analyse consiste à établir un classement des différents grains de l'échantillon à l'aide de plusieurs tamis selon leurs dimensions dont les mailles sont décroissantes du haut vers le bas.

On place notre échantillon dans la partie supérieure des tamis (le tamis ayant la plus grande dimension) et on lance le processus de l'analyse granulométrique qui nous permettra d'obtenir un classement des grains par vibration de la colonne des tamis.

Pour atteindre notre objectif, on doit calculer les coefficients suivants :

— Coefficient de Hazen :

Permet de savoir si la granulométrie est étalée ou serrée (uniforme). Ce coefficient est obtenu par la relation suivante :

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

où :

-Cu < 2 : la granulométrie est serrée (uniforme).

-Cu > 2 : la granulométrie est étalée.

— Coefficient de courbure :

Permet de savoir si la granulométrie est bien graduée ou non. le coefficient de Courbure est donné par l'équation suivante :

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}}$$

Où :

-1 < Cc < 3 : la granulométrie est bien graduée.

-Cc < 1 et Cc > 3 : la granulométrie est mal graduée.

D_{10} , D_{30} , D_{60} : représentent respectivement 10%, 30%, 60% des échantillons qui passent par les tamis.

4.5.1 Mode Opérateur

Afin de procéder à l'analyse granulométrique, notre échantillon doit impérativement être sec, il sera versé dans le tamis qui se trouve en haut de la colonne, il correspond au tamis dont la maille a la plus grande ouverture. Dans la série utilisée, les ouvertures ont une relation constante les unes avec les autres, il s'agit d'une échelle métrique, une racine deuxième de 2, chaque dimension de maille d'un tamis correspond donc à la dimension du précédent multipliée par 1.41, ce qui permet un dimensionnement étroit des particules.

Le nombre maximal de tamis pouvant être utilisé dans une analyse granulométrique est de 6, afin que l'analyse ait un rendement optimal. La durée d'un essai de l'analyse granulométrique est en fonction du nombre de tamis utilisé, à raison de 3 minutes par tamis.

Après avoir effectué l'analyse granulométrique, on met le produit de chaque tamis dans un sac et on les pèse pour de réaliser une courbe granulométrique. Les outils à utiliser pour réaliser cette analyse sont : • 1000g de l'échantillon à analyser • Un plateau ; • Une balance électronique ; • Une série de six tamis de la norme AFNOR en inox ayant les

diamètres qui seront cités dans les tableaux suivants (2 ; 1.25 ; 0.8 ; 0.5 ; 0.315 ; 0.250) • Une tamiseuse ; • Des bacs, des broches et des sacs.



FIGURE 4.3 – Tamiseuse

4.5.2 Résultats et interprétation

Les résultats de l'analyse granulométrique par tamisage sont résumés dans le tableau (4.2) et présentés dans la courbe granulométrique de la figure (4.4). D_{10} , D_{30} , D_{60} sont déterminés graphiquement tel que : $D_{10}=2\text{mm}$, $D_{30}= 2\text{mm}$, $D_{60}= 1.25\text{mm}$, ce qui nous a permis de calculer les deux coefficients :

- Coefficient de Hazen : $C_u = 0.81$ (granulométrie serrée (uniforme)).
- Coefficient de courbure : $C_c = 1.23$ (granulométrie bien graduée.)

Ouverture tamis (mm)	Masse des tamis (g)	Masse des tamis (%)	Refus cumulé (%)	Passant cumulé (%)
5	0	0	0	100
2	327	32,7	32,7	67,3
1.25	165	16,5	49,2	50,8
0.8	115	11,5	60,7	39,3
0.63	158	15,8	76,5	23,5
0.315	100	50,8	86,5	13,5
0.16	60	6	92,5	7,5
0.08	45	4,5	97	3
Fond	30	3	100	0
Total	1000	100		

TABLE 4.2 – Résultats de l'analyse granulométrique

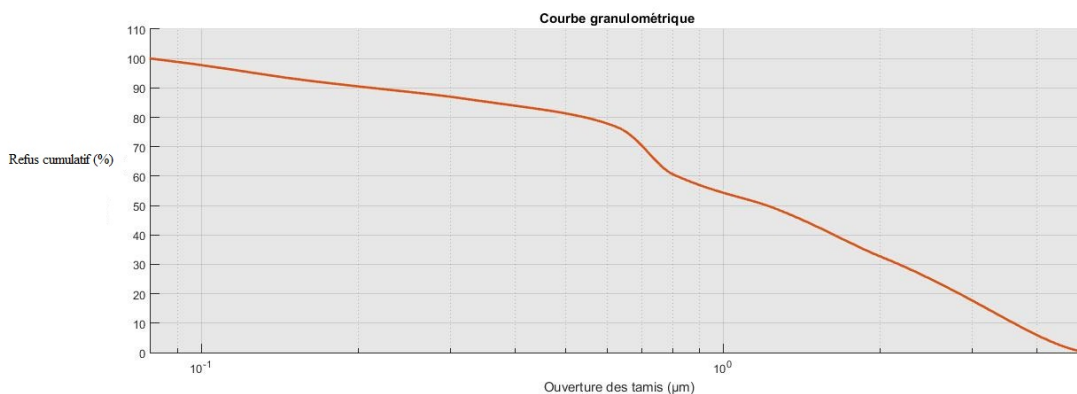


FIGURE 4.4 – La courbe granulométrique

4.6 Analyse minéralogique

L'analyse minéralogique de l'échantillon du filon 9 a été réalisée au Centre d'Etudes et des services Technologiques de l'Industrie des Matériaux CETIM Boumerdes au moyen de la diffraction des rayons X et le spectromètre de fluorescence X.

4.6.1 Diffraction des rayons X

La Diffraction des Rayons X (DRX) est une technique de caractérisation des matériaux cristallisés, qu'ils soient massifs, sous forme de poudre ou de dépôts. En laboratoire, cette technique est principalement appliquée aux matériaux inorganiques (minéraux, métaux, alliages, céramiques).[24]

Le principe est le suivant : les faisceaux de Rayons X produits par le tube sont envoyés sur l'échantillon dans lequel ils sont déviés par les atomes. Ces faisceaux diffractés interfèrent entre eux, conduisant à la production d'un signal intense dans certaines zones précises de l'espace. C'est ce signal qui est collecté par le détecteur, et tracé sous forme

d'une courbe (diffractogramme) qui présente des pics à des angles bien spécifiques de diffraction. La position de ces pics est une véritable signature de l'arrangement des atomes à l'intérieur d'un cristal (distance entre atomes, entre plans intracristallins). Un faisceau de rayons X incident de longueurs d'onde λ ne sera réfléchi par une famille de plans (h,k,l) que dans la mesure où il rencontre ces plans sous un certain angle θ dit angle de Bragg. La relation empirique qui relie les angles auxquels sont observés les pics et les distances entre plans atomiques est la loi de Bragg tel que :

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta$$

Avec n, nombre entier, qui est l'ordre de diffraction.

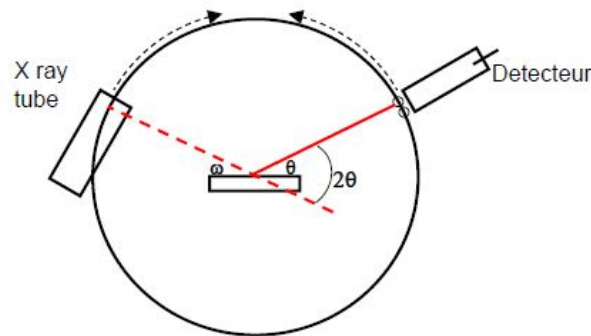


FIGURE 4.5 – Géométrie de Bragg

Un balayage d'angle de diffraction est obtenu à l'aide d'un goniomètre où l'échantillon plan effectue une rotation avec un mouvement uniforme de vitesse angulaire ω . En balayant le domaine angulaire (dans notre cas de 20° à 80°), on obtient un spectre entier présentant des pics d'intensité caractéristiques des différents plans réticulaires si le matériau est cristallisé. Si le matériau est amorphe en revanche, on n'obtiendra aucun pic seulement un signal très large.

Les spectres expérimentaux sont ensuite comparés au spectre théorique d'un composé de référence selon la base de données PDF (Powder Diffraction file), mise à jour annuellement et distribuée par «l'International Center for Diffraction Data». Ceci permet d'attribuer les différents pics caractérisant les composés cristallins[24]. Le résultat de la DRX de notre minéral est illustré dans la figure.

Date: 16/05/2018Time: 11:18:37 File: ECH 2 User: DIFFRACTION

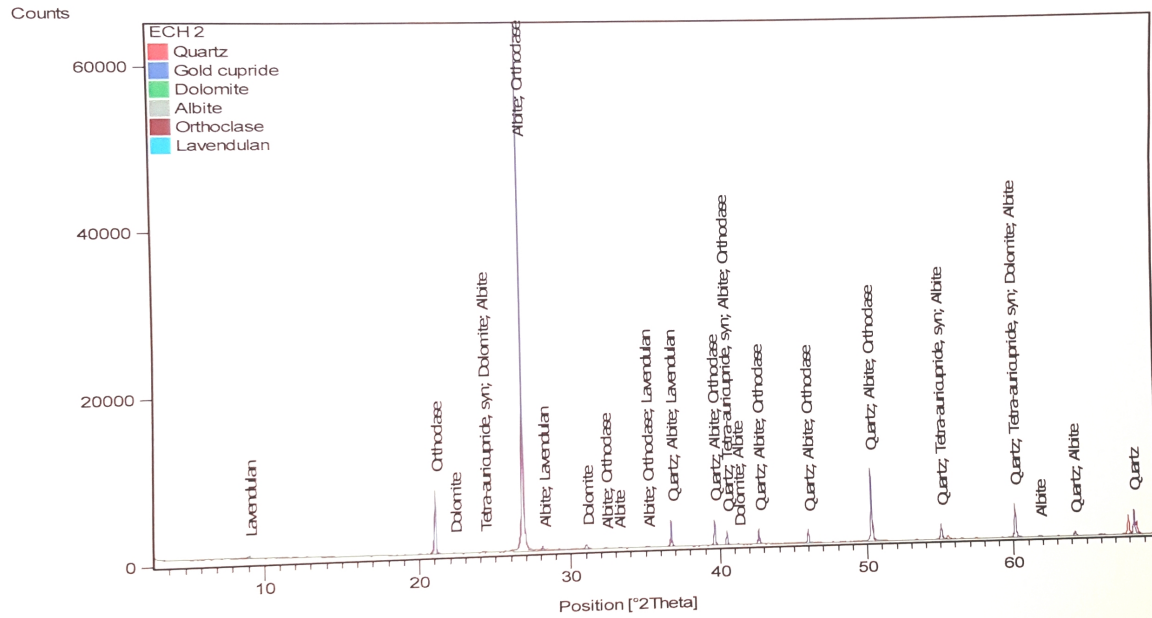


FIGURE 4.6 – Spectre de la diffraction X (minéral)

Date: 16/05/2018Time: 11:19:27 File: ECH 2 User: DIFFRACTION

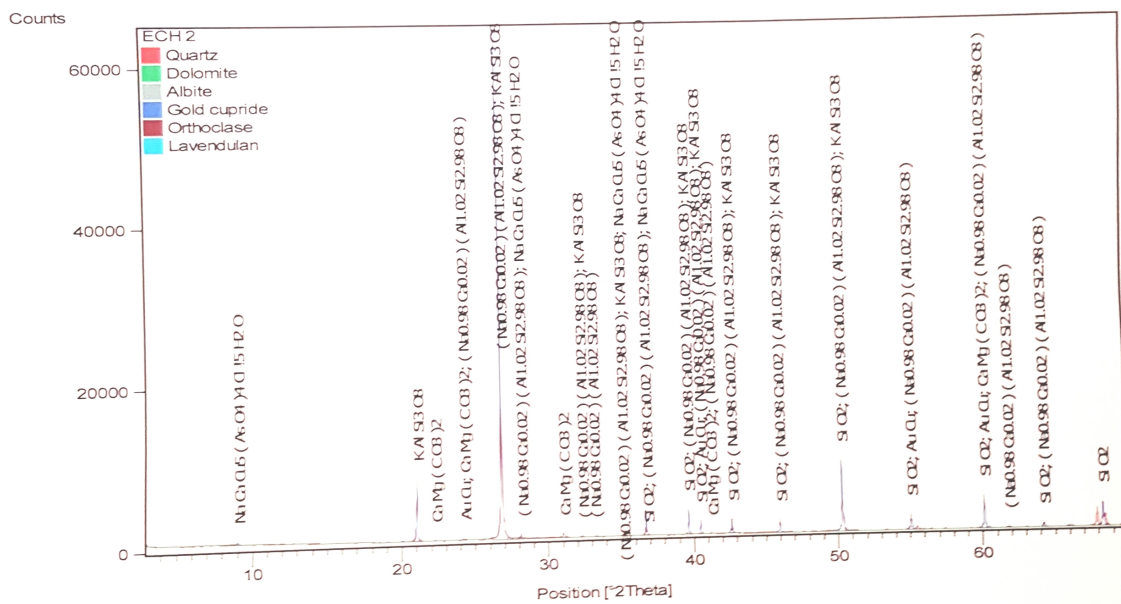


FIGURE 4.7 – Spectre de la diffraction X (formules chimiques)

Interprétation des résultats

Les spectres de l'analyse DRX réalisés sur notre échantillon, nous ont permis d'identifier la composition minéralogique des différentes phases cristallines, qui sont le quartz, la dolomite, l'albite, l'orthose, le lavendulan et le cupride d'or.

- Le quartz (SiO_2) : c'est la phase cristalline qui présente la majeure partie de l'échantillon, on remarque que presque tout les pics d'intensité représentent le quartz, la majorité de l'or est disséminée dans ce minéral.
- L'albite ($NaAlSi_3O_8$) et l'orthose ($KAlSi_3O_8$) : deux espèces minérales du groupe des silicates sous-groupe des tectosilicates se présentent mais avec une quantité inférieure au quartz, ces minéraux peuvent contenir l'or mais à une faible concentration.
- La dolomite ($CaMg(CO_3)_2$) et le lavendulan ($CaAl_2Si_2O_7(OH)_2 - H_2O$) : ce sont des minéraux accompagnateurs détectés en traces.
- Le cupride d'or (Au-Cu) : l'existence des pics de cette phase cristalline confirme la présence de l'or dans notre échantillon.

4.7 Détermination de teneur

La détermination de la teneur de l'échantillon de minerai d'Amesmassa suit tout un protocole qui passe par une préparation mécanique, une préparation thermique et une préparation chimique. La préparation mécanique consiste à transformer l'échantillon pris du terrain en une poudre d'une granulométrie inférieure à $75\mu m$ destinée à l'étude, cette opération comporte :

- Concassage (à mâchoire) : pour réduire la taille de l'échantillon initiale à 6-10 mm.
- Division (Quartage) : permet d'obtenir un échantillon homogène et représentatif ainsi que diminuer le volume de l'échantillon initial.
- Broyage : réalisé à l'aide d'un broyeur, il fournit des fractions d'une granulométrie inférieure à $75\mu m$, destiné à l'étude dans lequel l'or est libre.

4.7.1 Préparation thermique

La préparation thermique est à la base d'un procédé pyrométallurgique à haute température qui consiste à collecter les métaux précieux présents dans l'échantillon (l'or et l'argent) sous forme d'une perle qui suivra par la suite une autre préparation chimique. La préparation thermique se fait en deux étapes la fusion et la coupellation :

La fusion :

La fusion est assurée par un four à $1100^\circ C$, elle consiste à fusionner le minerai à l'aide d'un mélange de fondant et collecter l'or et l'argent dans un bouton de plomb, ce dernier sera traité dans la deuxième étape par coupellation. Une prise de 30gr de l'échantillon du minerai d'or à une granulométrie de $75\mu m$ est prélevée et mélangée à 105g de fondant dans un creuset de fusion en graphite. Le fondant est constitué d'un mélange de :

- Oxyde de plomb (40g) qui collecte tous les métaux qui existent dans l'échantillon.
- Borax (30g) + poudre de maïs (5g) spécial pour les fours de fusion.
- Carbonate de sodium 30g nécessaire pour augmenter la température de fusion.



FIGURE 4.8 – Préparation du creuset de fusion

Une fois le fondant et le minerai mélangés dans le creuset, 2ml de nitrate d'argent ($AgNO_3$) solution à 0.01% est rajoutée, afin d'obtenir une perle après coupellation. Le creuset est mis dans le four (préchauffé) pour fusion à $1100^{\circ}C$. Après une heure de temps de fusion, le creuset est versé dans un moule puis laissé refroidir pendant 10 minutes, ensuite le scorie est brisé avec un marteau, on récupère le bouton de plomb résultant de la fusion puis on l'applatit pour lui donner la forme cubique et le mettre dans une coupelle.

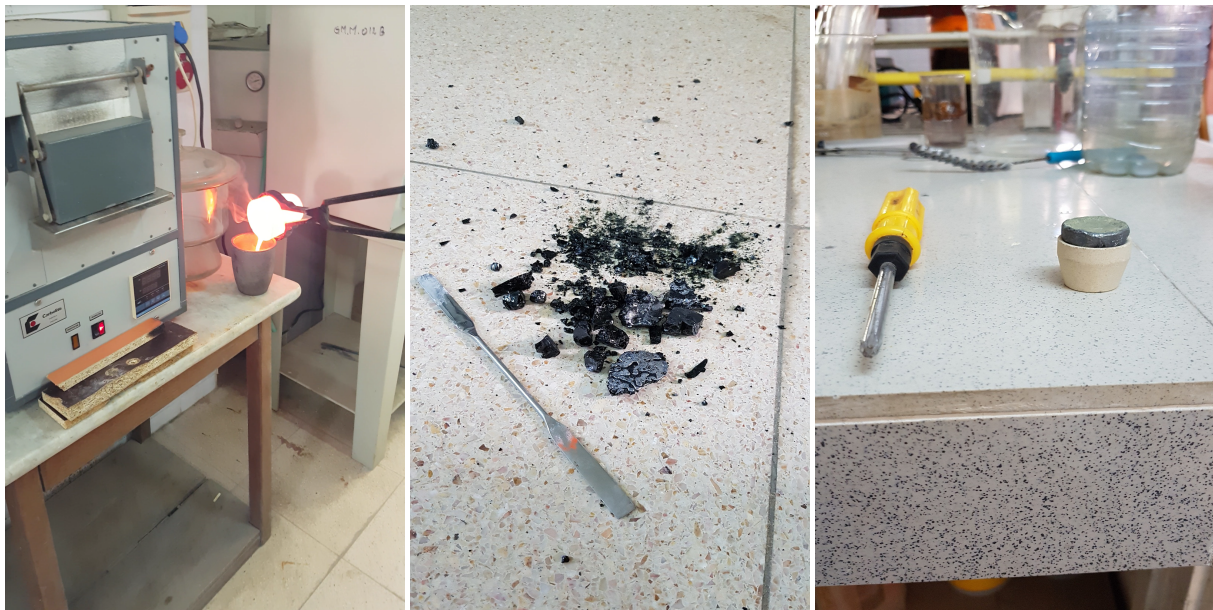


FIGURE 4.9 – Récupération du bouton de plomb

La coupellation :

La coupellation se fait dans un deuxième four à 920°C pendant 1 heure, le bouton de plomb obtenu de la fusion est mis dans une coupelle. A 920°C le plomb fusionne, il sera absorbé par la coupelle, et comme les points de fusion de l'or et l'argent sont respectivement 1064°C et 961°C , ils vont rester donc à l'état solide et former une perle après l'absorption totale du plomb. La perle est transférée vers le laboratoire de chimie pour la préparation de la solution d'analyse.



FIGURE 4.10 – Perle de l'or et l'argent après coupellation

4.7.2 Préparation chimique

La préparation chimique a pour but la dissolution de la perle dans une solution d'eau régale afin d'être analysée par le spectromètre d'absorption atomique SAA pour déterminer la teneur totale en or de notre échantillon. La perle est mise dans une fiole de 25ml elle sera attaquée dans un premier temps par une solution d'acide nitrique HNO_3 (5ml à 37%) et laissée pendant 20 minutes à une température ambiante afin d'assurer la digestion totale de l'argent (Ag), ensuite l'ajout de 15ml d'acide chlorhydrique HCl à 37% et laissée pendant 20 minutes. Le produit est énergiquement mélangé à chaud pour l'obtention d'une solution homogène.

4.7.3 Spectroscopie d'absorption atomique (SAA)

La spectroscopie atomique comprend plusieurs techniques analytiques utilisées pour déterminer la composition élémentaire d'un échantillon en examinant son spectre électromagnétique ou son spectre de masse.

Les techniques de spectroscopie d'absorption atomique (SAA) reposent sur le fait qu'un élément atomisé absorbera la lumière d'une longueur d'onde caractéristique, le faisant quitter l'état fondamental vers un état excité.

La quantité d'énergie lumineuse absorbée est proportionnelle au nombre d'atomes analytes dans le trajet optique. La technique est étalonnée en introduisant des concentrations connues d'atomes analytes dans le trajet optique et en faisant un graphique d'absorption par rapport à la concentration.

— La lampe émet de la lumière pour l'élément d'intérêt ;



FIGURE 4.11 – Installation générale SAA

- L'atomiseur convertit l'échantillon liquide en atomes libres qui absorbent l'énergie de la lampe ;
- Le monochromateur sélectionne la longueur d'onde utilisée pour la mesure ;
- Le détecteur mesure la lumière absorbée par les atomes libres.

Les photons absorbés étant caractéristiques des éléments absorbants, et leur quantité étant proportionnels au nombre d'atomes d'élément absorbant selon la loi de distribution de Boltzmann, l'absorption permet de mesurer les concentrations des éléments à doser. L'analyse par absorption atomique utilise la loi de Beer-Lambert. S'il y a plusieurs éléments à doser, on réalise cette manipulation pour chaque élément de l'échantillon en se plaçant à une longueur d'onde fixée. Il faut donc à chaque manipulation choisir une source adaptée pour éclairer l'élément que l'on cherche à exciter.

Loi de Beer- Lambert :

$$A = \epsilon l C = \text{Log} \frac{p}{p_o}$$

A : Absorbance ;

ϵ : Constante caractéristique, dépend de l'atome absorbant en (l/mole cm) ;

l : La longueur de la flamme ;

C : concentration de solution en élément absorbant ;

p : La puissance incidente ;

p_o : La puissance absorbée.

Détermination de la teneur par SAA

La solution obtenue après la dissolution totale de l'or dans 20ml d'eau régale est analysée par spectromètre d'absorption atomique à flamme modèle ThermoSCIENTIFIC iCE 3000 Series. Les paramètres du spectromètre sont réglés par rapport à l'élément d'analyse (l'or), une longueur d'onde de 242,8nm et une énergie d'excitation de 300V.

Les solutions utilisées pour la courbe d'étalonnage sont à la base des chlorure d'or ($AuCl_3$) à différentes concentration massique en ppm représentées dans le tableau (Table 4.3).



FIGURE 4.12 – Spectromètre d'absorption atomique à flamme modèle ThermoSCIENTIFIC iCE 3000 Series

Résultats et interprétation :

La caractérisation par Spectromètre d'absorption atomique (SAA) de la solution d'or issu de l'essai de la préparation thermique (coupellation) et la préparation chimique (dissolution dans l'eau régale) a donnée une absorbance de 0,08.

L'échantillon du minerai d'or utilisé dans cet essai est de 30g, la dissolution de la perle d'or est faite dans une solution de 20ml d'eau régale qui correspond à une concentration massique en or de 18 mg/l par rapport à la courbe d'étalonnage, ce qui donne une teneur totale en or de 12 gramme par tonne de minerai.

Le calcul de la teneur totale en or de notre minerai se fait par l'équation suivante :

$$T(g/t) = \frac{C_m V 10^3}{m}$$

T(g/t) : Teneur totale en or par une tonne de minerai ;

C_m : La concentration massique (mg/l) ;

V : Le volume de la solution analysée en litre ;

m : La masse d'échantillon du minerai d'or en gramme.

Echantillon	Concentration (ppm)	Absorbance
Blanc	0,0	0,002
Étalon 1	4	0,017
Étalon 2	6	0,028
Étalon 3	8	0,033
Étalon 4	10	0,038
Étalon 5	12	0,052
Étalon 6	14	0,063
Étalon 7	16	0,07
Étalon 8	18	0,08
Étalon 9	20	0,087

TABLE 4.3 – Données typiques de la courbe d'étalonnage pour Au

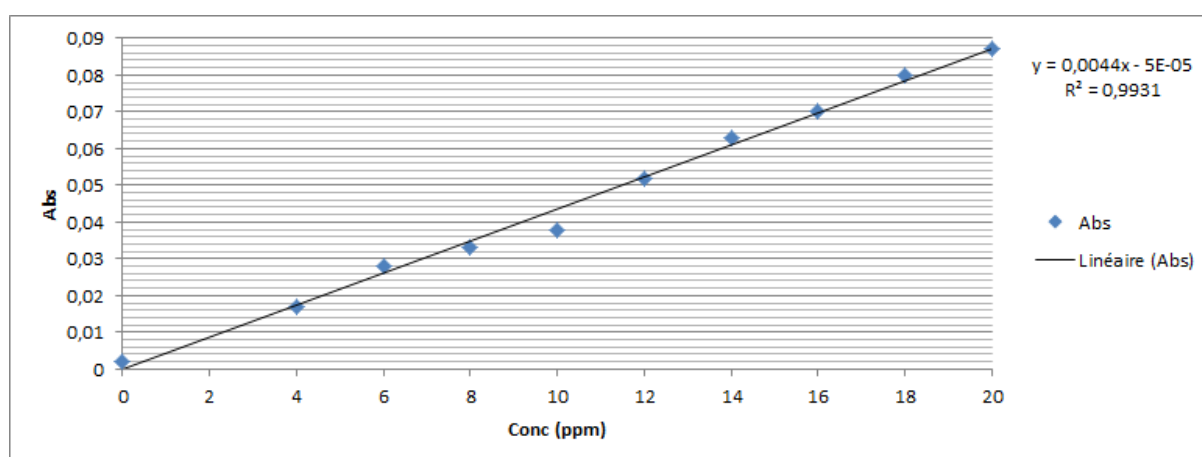


FIGURE 4.13 – Courbe d'étalonnage

Cinquième Chapitre

Méthodes de traitement hydrométallurgique

Chapitre 5

Méthodes de traitement hydrométallurgique

5.1 Introduction

Les minéraux d'or possèdent quelques propriétés caractéristiques qui ont conduit au développement des méthodes de traitement des minerais d'or.

Ces propriétés sont principalement les suivantes :

- La densité de l'or et de ses minéraux porteurs est en général très élevée, elle atteint 13 à 19 suivant la proportion en argent. Cette grandeur a conduit au développement de concentration gravimétrique connue depuis longtemps et toujours d'actualité aujourd'hui.
- Le caractère naturellement hydrophobe de la surface de l'or natif lui confère une excellente flottabilité.
- L'or et certains de ses minéraux porteurs sont solubles dans des solutions diluées et alcalines de cyanure. Cette prospérité a donné naissance à la lixiviation au cyanure, technique de traitement la plus courante pour le minerai d'or.
- L'or est aussi soluble dans d'autres solvants parmi lesquels on cite l'hypochlorite et l'eau régale en milieu acide .ces deux composés feront l'objet de nos essais car ils pourront connaître un développement industriel dans les prochaines années.

Dans tous les cas, il faut noter qu'en plus de la présence d'un solvant il est nécessaire que la solution d'attaque ait un potentiel d'oxydo-réduction suffisamment élevée pour pouvoir mettre l'or en solution. La présence d'un agent oxydant est donc indispensable et c'est l'oxygène de l'air qui joue ce rôle dans notre cas.

5.2 Traitement par cyanuration

La méthode de cyanuration a une haute sensibilité, de faibles coûts d'exploitation et est capable d'extraire l'or jusqu'à 98%. Cependant, elle possède quelques inconvénients comme la toxicité élevée du cyanure et les pollutions environnementales engendrée par le dite méthode.

Contrairement au cyanure utilisé dans la mine d'Amesmassa qui est le cyanure de sodium, dans nos essais nous avons choisi d'utiliser les cyanures de potassium en raison de leurs faibles couts par rapport au cyanure de sodium, mais aussi car il présente des effets moins néfastes que ce dernier, celui-ci étant difficile à manipuler vu qu'il est plus réactif sous contact avec d'autres éléments comme les nitrates ou les chlorates exposant à des risques d'explosions.

Les essais de cyanuration ont été pratiqués sur un tout-venant provenant d'un échantillon de minerais d'or d'Amesmassa au niveau du laboratoire du département de génie minier. Les essais ont pour but d'évaluer l'influence des paramètres de la concentration du cyanure de potassium, la granulométrie (surface de contact) et le temps de cyanuration et d'agitation sur le taux de récupération.

5.2.1 Influence de la concentration de cyanure de potassium (KCN)

Le cyanure est un élément essentiel à la mise en solution de l'or. Il est ajouté sous forme d'une solution de cyanure de potassium (KCN) au minerai d'or.

Un manque de cyanure, soit par diffusion ou concentration insuffisante peut aussi être responsable d'un ralentissement de la vitesse de mise en solution[14].

Mode opératoire

Une quantité de minerais appartenant à la classe granulométrique en μm [71 ; 125] est repartit dans trois fioles de 500ml contenant une masse de 200 g de minerai et qui seront attaquées par trois solution de KCN de concentration différentes 1 ; 0.5 ; 0.3 g/l du PH respectivement de l'ordre de 9.75 ; 10 ; 10 .5 avec un rapport solide /liquide de 1/2 pendant une durée d'agitation de 3heures.

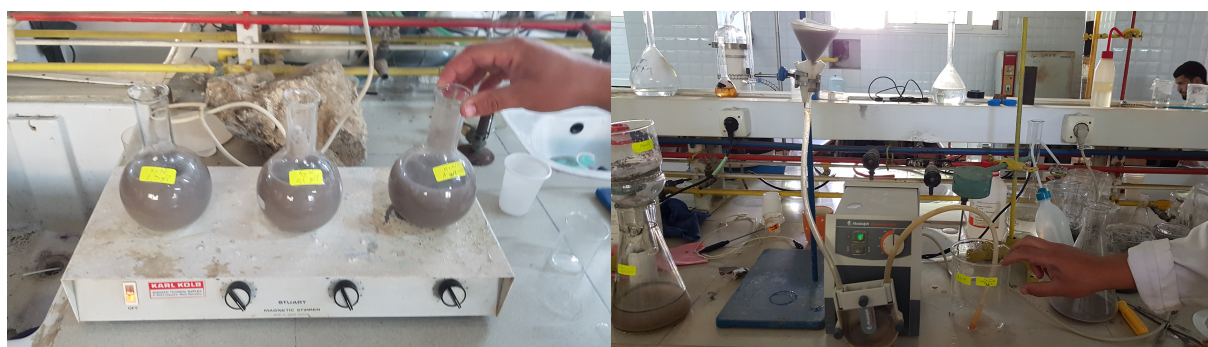


FIGURE 5.1 – Fioles de lixiviation (Influence de la concentration KCN)

La solution récupérée est filtrée puis mise dans des tubes à essais pour l'analyse à spectromètre d'adsorption atomique.

5.2.2 Influence de l'agitation

L'agitation est un facteur important pour la dissolution de l'or, elle sert à maintenir les particules en suspension pour éviter la sédimentation et la perte de volume et aussi pour favoriser un maximum de contact entre la solution cyanurée et la surface des particules.

Conduite de l'opération

Dans ces essais nous allons suivre l'influence de l'agitation sur la dissolution et la récupération de l'or. Une masse de 200 g de minerai appartenant à la classe [71;125] est répartie en trois récipients qui seront attaqués par les cyanure de potasse d'une concentration de 500ppm d'une façon à ce que le premier récipient subisse l'attaque d'une durée d'agitation de 3 heures, tandis que le deuxième et le troisième seront agités, pendant 6 heures pour le 2^{ème}, et 12 heures pour le 3^{ème}. Un rapport solide /liquide de (1/2) est adopté pour ces essais.

A la fin de l'expérience les solutions seront filtrées et versées dans des tubes pour l'analyse par spectromètre d'absorption atomique (SAA).



FIGURE 5.2 – Récipients de lixiviation (Influence de l'agitation) et filtration

5.2.3 Influence de la granulométrie (surface de contact)

La granulométrie du minerai a une relation direct avec la surface spécifique de contact et indirect avec la vitesse de mise en solution de l'or.

La surface de contact entre l'or et les réactifs affecte la vitesse de la réaction et le niveau de mise en solution, un gramme d'or passe plus rapidement en solution qu'une pépite.

Conduite de l'opération

Cet essai montre l'influence de la granulométrie du minerai sur la dissolution de l'or dans les deux modes de cyanuration en cuves ou en tas. Pour ce faire le test est divisé en deux catégories, la première contient trois classes de granulométrie comprises entre 3 à 10 mm pour le procédé de cyanuration en tas et la deuxième possède aussi trois classes

densimétriques comprises entre 71 et 500 μm .

Pour les premières catégories l'essai est réalisé à l'aide de mini-colonnes ,ou on dispose dans chacune une masse définie de minerai dont la classe densimétrique est connue,qui seront attaquées par une solution de cyanure de potassium d'une concentration de 1 g/l. La solution lixiviante percole dans le minerai, puis est récupérée au dessous de l'éprouvette dans un bécher et elle sera de nouveau recyclée et injectée dans le minerai au moyen d'une pompe hyperstatique qui assure un circuit fermé pour la solution pendant une durée de temps de 36 h .

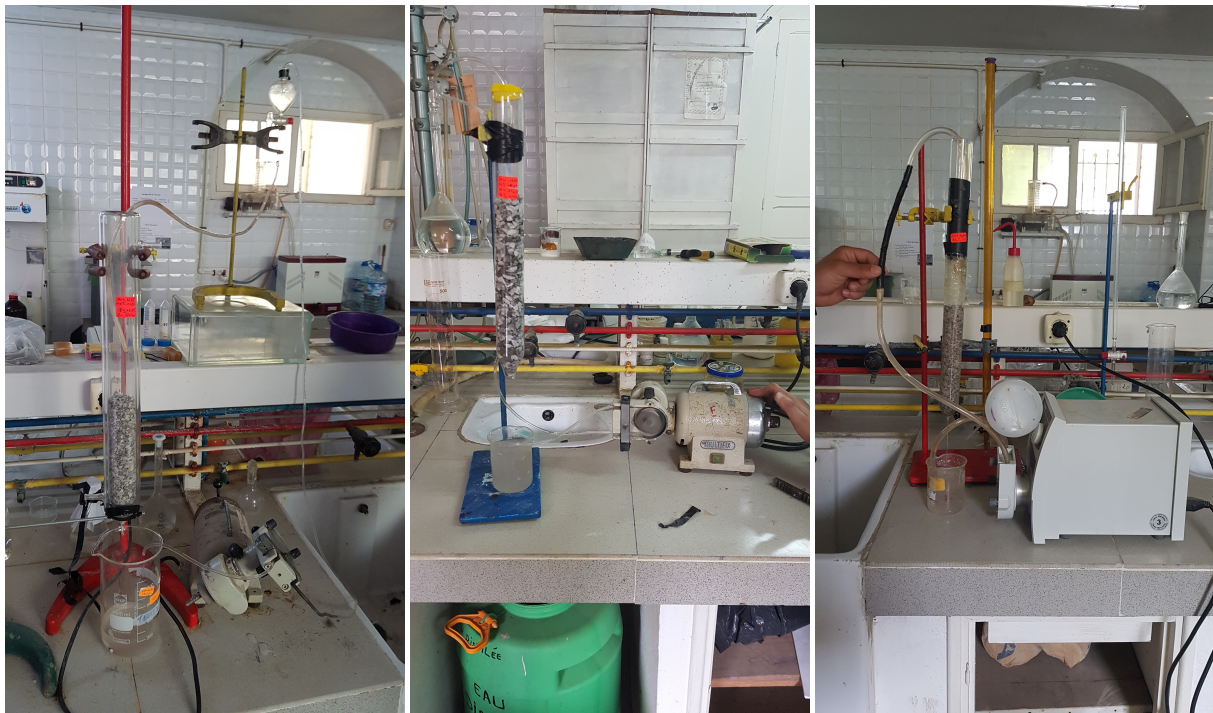


FIGURE 5.3 – Mini-colonnes de lixiviation (Influence de la granulométrie)

Tandis que pour la deuxième l'essai est effectué à l'aide de trois earlen mayer ou la masse du minerai est attaquée par la même solution et soumis à un système d'agitation durant une période de 12 h.

A la fin de l'expérience, les solutions sont filtrées afin de les caractériser par le spectromètre d'absorption atomique.

5.2.4 Résultats et interprétation :

Les solutions obtenues à partir des trois essais d'optimisation en utilisant les cyanures de potassium (KCN) comme agent de lixiviation d'or sont analysées à l'aide d'un spectromètre d'absorption atomique à flamme, modèle ThermoSCIENTIFIC iCE 3000 Series. Les paramètres du spectromètre sont réglées par rapport à l'élément d'analyse (Au). La courbe d'étalonnage est réalisée à partir des étalons de chlorure d'or de concentration à l'ordre de 4 à 20 ppm de raison de 2 ppm (cette courbe est utilisée pour tout les essais effectués dans ce chapitre). les tableaux(5.1 ; 5.2 ; 5.3) suivants représentent les résultats obtenues.

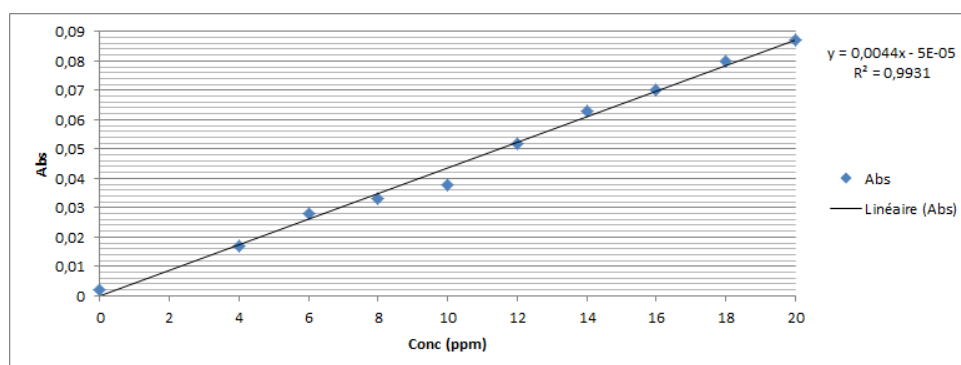


FIGURE 5.4 – Courbe d'étalonnage

Concentration de KCN (ppm)	Absorbance	Concentration en or (mg/l)	Taux de récupération (%)
300	0,051	11,60	72,50
500	0,055	12,51	78,19
1000	0,045	10,34	64,62

TABLE 5.1 – Effet concentration de KCN, 200g de minerai à 12g/t, 200ml de solution KCN, 3H d'agitation à 400rpm.

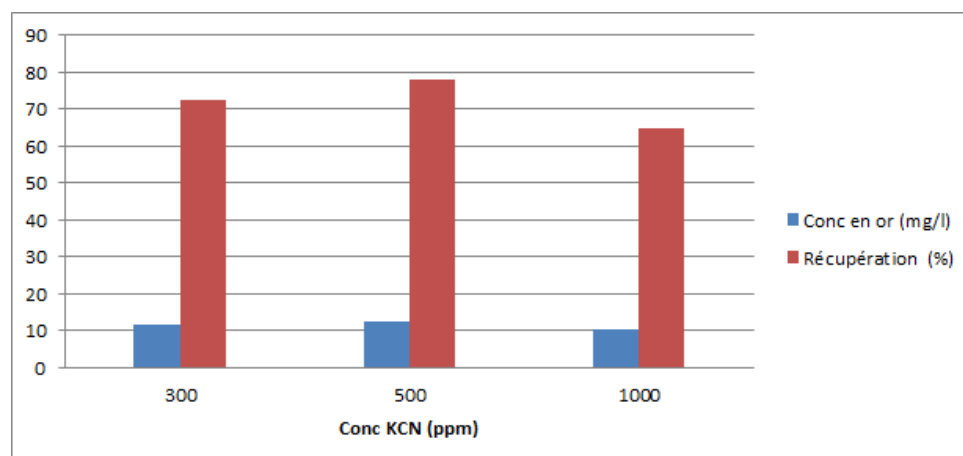


FIGURE 5.5 – Effet concentration de KCN

Durée d'agitation (heures)	Absorbance	Concentration en or (mg/l)	Récupération (%)
3	0,05	11,45	71,56
6	0,67	15,23	95,24
12	0,067	15,23	95,24

TABLE 5.2 – Effet durée d'agitation, 200g de minerai à 12g/t, 150ml de solution KCN à 500ppm, agitation à 400rpm.

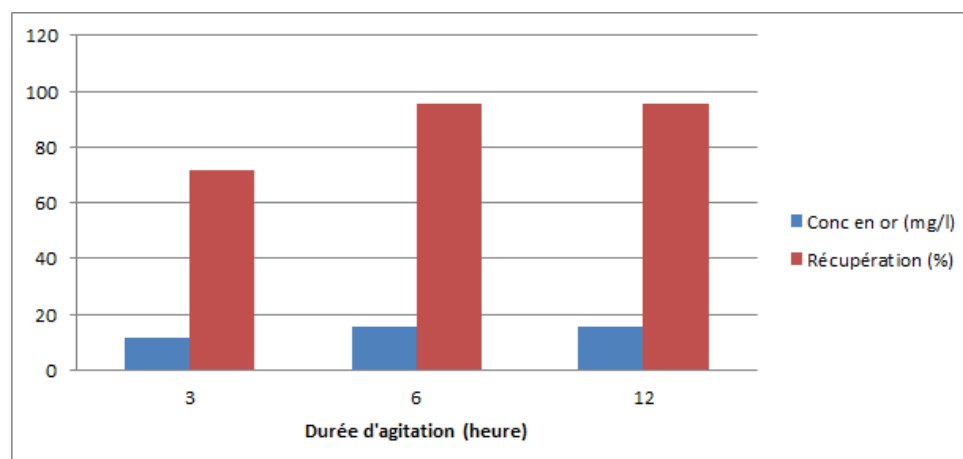


FIGURE 5.6 – Effet durée d'agitation

Classe granulométrique (mm)	Absorbance	Concentration en or (mg/l)
[5 ;8]	0,0086	1,9725
[3 ;5]	0,0174	3,9755
[2 ;3]	0,0418	9,5213
[1,25 ;2]	0,0455	10,3663
[0,250 ;0,315]	0,0725	16,4907
[<0,250]	0,1056	24,0194

TABLE 5.3 – Effet de granulométrie, 200g de minerai, 150ml de solution KCN à 500ppm.

Selon ses résultats on peut conclure que :

- La concentration de KCN à 500 ppm s'avère adéquate pour la bonne récupération de l'or, en effet une baisse de concentration ou une éventuelle augmentation peut rebaisser ce taux de récupération.
- La dissolution de l'or augmente avec l'augmentation de temps et de la durée d'agitation, puis il stagne après d'une durée de 6 heures de cyanuration.
- La dissolution de l'or augmente avec la finesse de broyage, pour les deux procédés de cyanuration la récupération est importante lorsque les grains sont très fins. Il semble qu'un broyage à 250 mm serait suffisant pour la lixiviation en cuve tandis qu'un concassage à l'ordre de 3 mm paraît mieux adéquat et plus performant pour une récupération bonifiée par le cas de la lixiviation en tas.

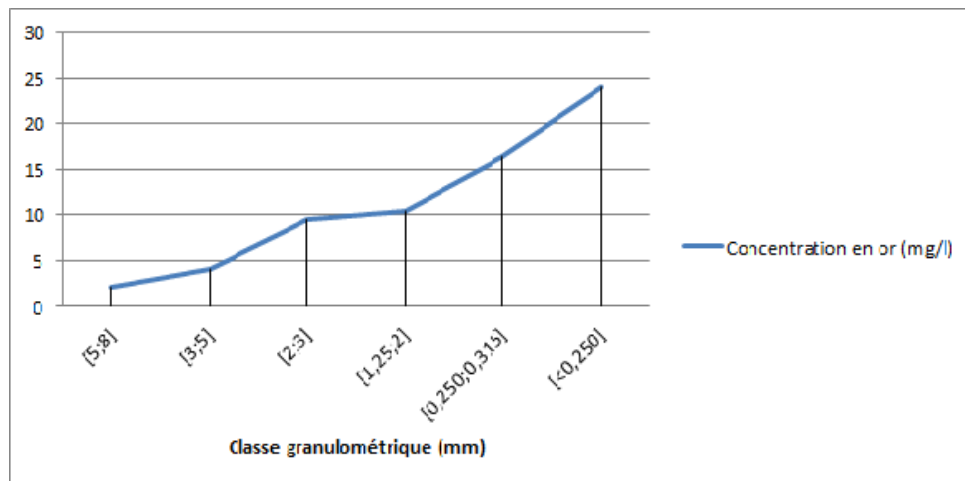


FIGURE 5.7 – Effet de granulométrie

5.3 Traitement par l'hypochlorite

La lixiviation des minerais d'or par la méthode hydrométallurgique a été développée en utilisant plusieurs réactifs. Un des réactifs commerciaux les plus utilisés pour l'extraction de l'or du minerai est le cyanure. La méthode de cyanuration a une haute sensibilité, de faibles coûts d'exploitation et capable d'extraire l'or jusqu'à 98%. Cependant, ce processus a quelques inconvénients comme le temps de séjour élevé (36heurs), la toxicité élevée du cyanure et les pollutions environnementales.

Par conséquent, nous devons développer un nouveau processus d'extraction pour améliorer l'efficacité d'utilisation du minerai d'or. Aujourd'hui, Le chlore est devenu un agent alternatif dans la métallurgie de l'or en raison des problèmes environnementaux considérables induits par le cyanure. La lixiviation par chloration présente plusieurs avantages tels que le taux élevé de dissolution de l'or, le temps court de lixiviation, le faible prix de réactifs de lixiviation et le plus important c'est qu'elle présente un caractère non polluant.[26]

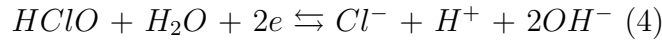
5.3.1 L'hypochlorite

l'hypochlorite comme agent oxydant pour l'or, des hypochlorites de sodium (NaClO) ou de calcium (CaClO) peuvent être utilisés[25]. Lorsqu'il est mis en contact avec de l'eau ou une solution alcaline, le chlore se disperse selon les équations :



La constante d'équilibre de la réaction (1) est $K_{\text{eq}} = 4,2 \cdot 10^{-4}$, et la concentration d'équilibre de HClO dans l'eau à 25°C est de 0,030 M (1,06 g/l). La solubilité du chlore $\text{Cl}_2(\text{aq})$ à 25°C est de 0,0921 M (3,26 g/l). La constante d'équilibre de la réaction de dissolution du chlore dans des solutions aqueuses, $\text{Cl}_2(\text{g})/\text{Cl}_2(\text{aq}) = 0,062$.

Dans une solution acide, la demi-réaction du couple $Cl^-/HClO$ est comme suit :



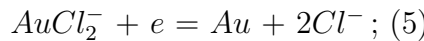
Selon l'équation de Nernst, qui donne la tension d'équilibre (E) de l'électrode par rapport au potentiel standard (E^0) du couple redox mis en jeu[25].

$$E = E^0 + \left(\frac{RT}{nF}\right) \log\left(\frac{a_x}{a_{red}^n}\right)$$

- R est la constante des gaz parfaits, égale à $8,3144621 \text{ J.mol}^{-1}.K^{-1}$
- T la température absolue en kelvin
- a l'activité chimique de l'oxydant et du réducteur
- F est la constante de Faraday, égale à $96\,485 \text{ C.mol}^{-1} = 1 \text{ F}$
- n est le nombre d'électrons transférés dans la demi-réaction.

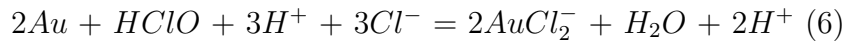
$$E(4) = 1,494 + (2.303\frac{RT}{2F})\log[HClO] - (2.303\frac{RT}{2F})\log[Cl^-] - (2.303\frac{RT}{2F})pH.$$

Le potentiel de la demi-réaction de l'or métallique dans des solutions de chlorure



$$E(5) = 1,130 + (2.303\frac{RT}{F})\log[AuCl_2^-] - (2.303\frac{RT}{F})\log[Cl^-]$$

La différence des potentiels d'équilibre en fonction du pH de la réaction redox de la dissolution de l'or :



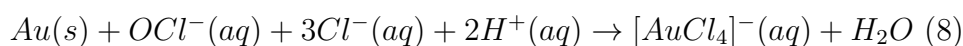
$$\delta E(6) = 0,364 + (2.303\frac{RT}{2F})\log[HClO] - (2.303\frac{RT}{F})\log[AuCl_2^-] + 3(2.303\frac{RT}{F})\log[Cl^-] + 1,5(2.303\frac{RT}{F})pH \quad (7)$$

L'équation (7) a été utilisée pour calculer la constante d'équilibre de la réaction (6) aux concentrations (M) : $[HClO] = 0,1$; $[HCl] = 0,3$; $[AuCl_2^-] = 0,1$. Dans ce cas, $E(6) = 0,346 \text{ V}$ et $K_{\acute{e}q} = 7,15.10^{-5}$. Le résultat la valeur de $K_{\acute{e}q}$ indique que la dissolution totale de l'or dans les solutions d'hypochlorites acides est thermodynamiquement possible.[25]

5.3.2 La lixiviation de minerai d'or par l'hypochlorite

La lixiviation des minerais de l'or a été effectuée en utilisant une solution d'hypochlorite-chlorure ($HClO$). Plusieurs facteurs ont été optimisés dans cette expérience, y compris l'influence du pH par la concentration de l'acide chlorhydrique (HCl) dans la solution d'attaque, l'influence de la concentration d'hypochlorite de sodium ($NaOCl$) et le rapport solide-liquide (S/L) minerai d'or (broyé à $74\mu\text{m}$) et la solution d'attaque. Le chlorure de sodium ($NaCl$) utilisé été de 5g pour toutes les solutions d'attaque afin d'améliorer le taux de récupération.

La dissolution de l'or en utilisant une solution de chlorure d'hypochlorite suit la réaction (8).



Influence de la concentration de l'hypochlorite de sodium (NaClO) :

Dans cet essai, le pH et le rapport liquide-solide sont fixés à 5 et (1/10) respectivement. L'or dans le minéral est oxydé par l'ion hypochlorite, de sorte que la concentration de OCl^- est très importante donc on a fait varier les concentrations du NaClO (10%, 12% et 15%) et laisser réagir pendant une durée d'agitation de 12heures à 400 tpm.

Influence du rapport solide-liquide (S/L) :

L'optimisation du rapport solide-liquide a été effectuée pour obtenir la masse maximale de minerai d'or à un certain volume de solution de lixiviation. Dans cet essai, on a effectué 3 solutions de lixiviation en hypochlorite à 12% avec des rapports solide-liquide (S / L) différents (1/20; 1/10; 1/6) ,la réaction est faite pendant une durée d'agitation de 12heures à 400 tpm en fixant le pH à 5.



FIGURE 5.8 – Lixiviation en hypochlorite (Influence du rapport solide-liquide) et filtration

Toutes les solutions filtrées sont récupérées dans des tubes à essais afin de les caractériser par le spectromètre d'absorption atomique SAA pour déterminer les différentes concentrations en or.

Influence du pH :

A température ambiante, , un rapport solide-liquide de (1 /10) du minerai d'or et une solution de NaClO à 12% et 5g de NaCl dans 3 earlen meyer. La stabilisation du pH de la solution a été contrôlée par l'ajout des solutions d'HCl de 5ml en différentes concentrations (0.5M; 1M; 1.5M) pendant une durée d'agitation de 12heures à 400 tpm. L'influence de la concentration de HCl est présentée à la figure. La dissolution de l'or augmente par l'augmentation de la concentration HCl. En absence de HCl, l'extraction de l'or est relativement faible, car le pH initial de la solution de lixiviation est de 12,5. L'acide hypochloreux (HClO) est un oxydant puissant qui se forme à un pH de 3 à 7.

Résultats et interprétation :

Les solutions obtenues à partir des trois essais d'optimisation sont analysées avec un spectromètre d'absorption atomique à flamme afin de déterminer l'efficacité de lixiviation d'or en utilisant une nouvelle méthode de lixiviation qui se base sur l'utilisation de l'hypochlorite de sodium comme agent d'attaque. Les résultats obtenus sont illustrés dans les tableaux (5.4 ; 5.5 ; 5.6) suivants :

Concentration NaClO (%)	Absorbance	Concentration en or (mg/l)	Récupération (%)
10	0,00182	0,425	31,87
12	0,00259	0,6	45
15	0,00215	0,55	41,25

TABLE 5.4 – Effet concentration hypochlorite de sodium (NaClO), 10g du minerai d'or à 12g/t, rapport solide/liquide (1/10), agitation pendant 12 heures à 400rpm

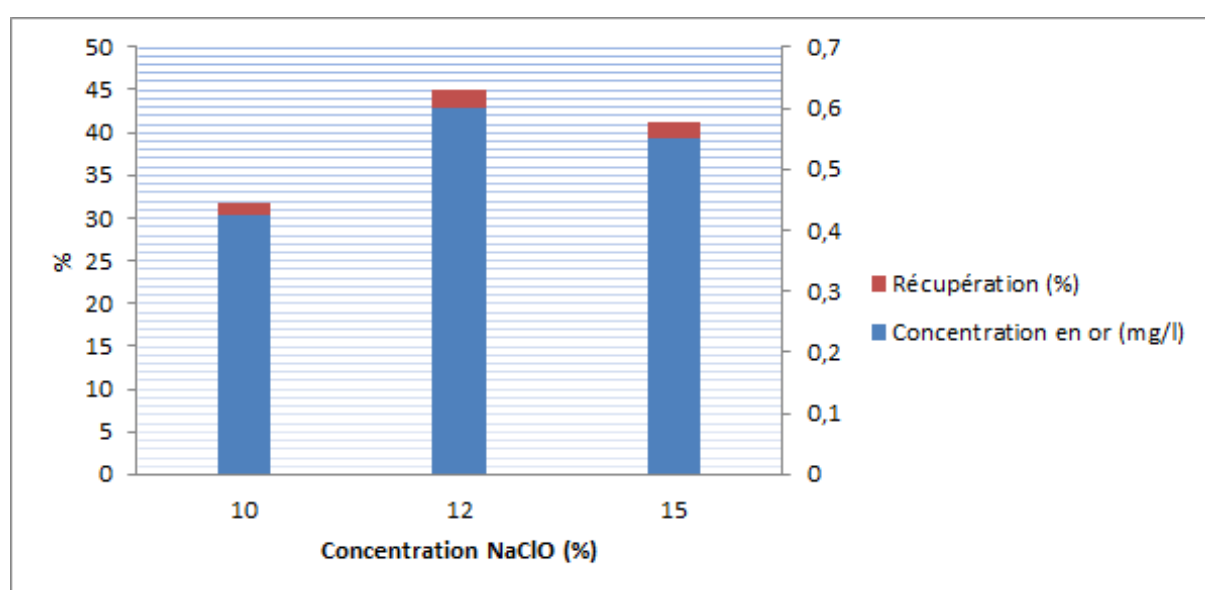


FIGURE 5.9 – Effet concentration hypochlorite de sodium (NaClO)

Rapport (solide/liquide)	Absorbance	Concentration en or (mg/l)	Récupération (%)
1/5	0,00175	0,41	27,33
1/10	0,00259	0.6	45
1/20	0.00105	0,25	39,58

TABLE 5.5 – Effet rapport solide/liquide, minerai d'or à 12g/t, solution hypochlorite à 12%, pH=5, agitation pendant 12 heures à 400rpm

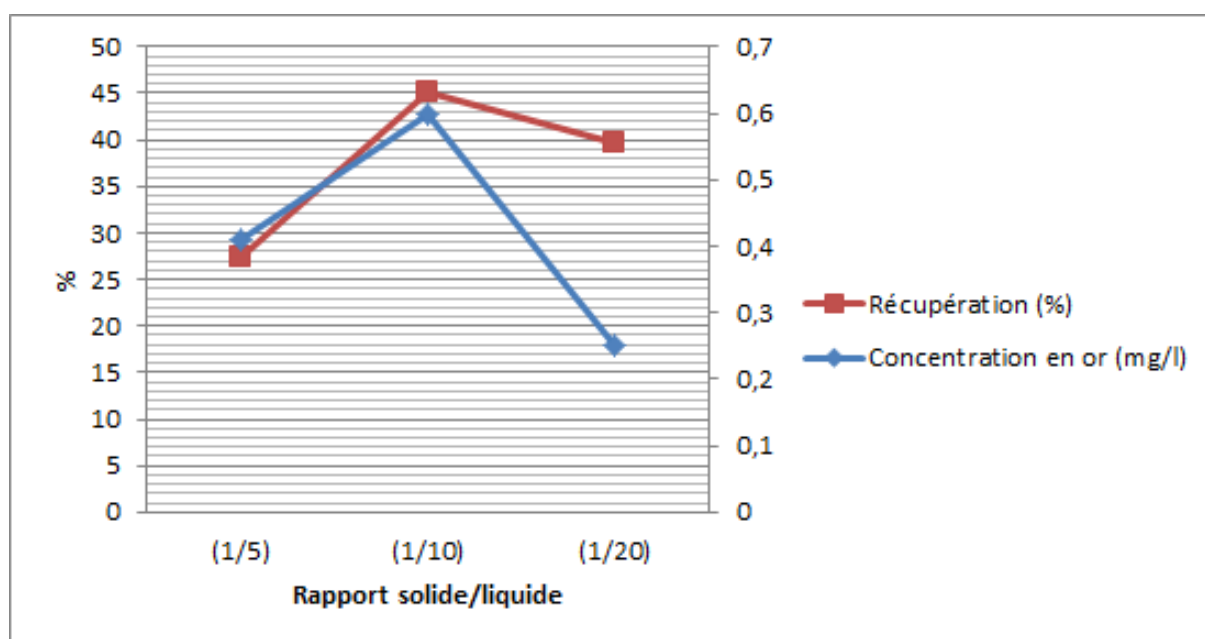


FIGURE 5.10 – Effet rapport solide/liquide

Concentration HCl (M)	pH	Absorption	Concentration en or (mg/l)	Récupération (%)
0,5	7	0,00175	0,41	31,15
1	5	0,00259	0,6	45
1,5	3	0,0047	1,081	81,12

TABLE 5.6 – Effet pH, 10g du minerai d'or à 12g/t, solution hypochlorite à 12%, rapport solide/liquide (1/10), agitation pendant 12 heures à 400rpm

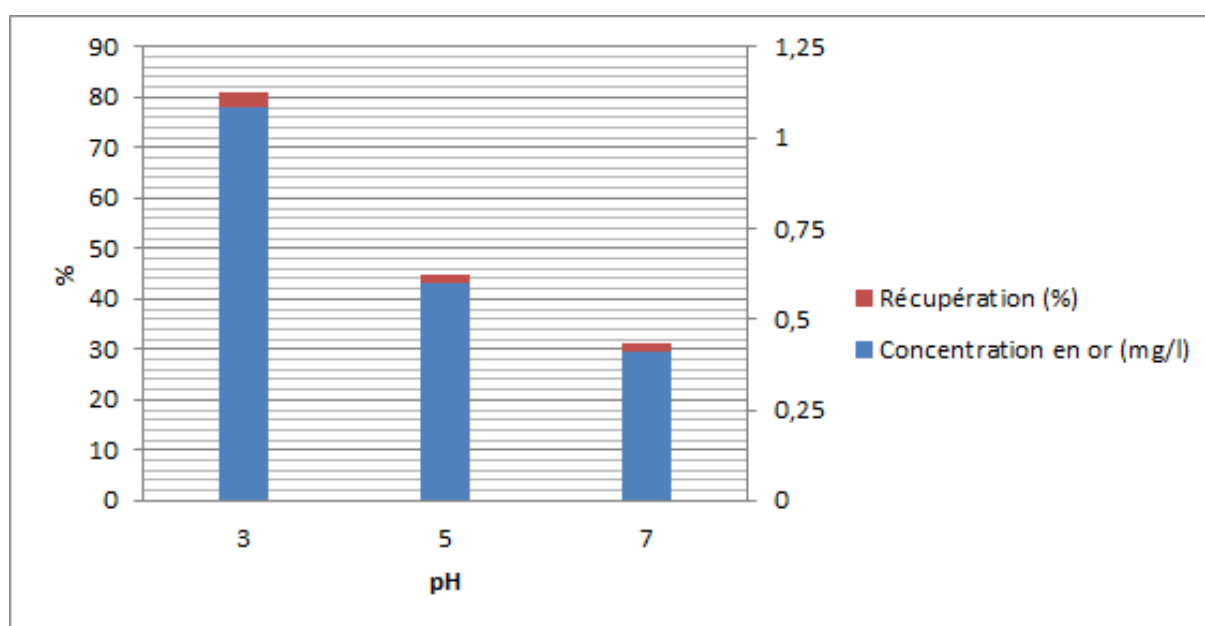


FIGURE 5.11 – Effet du pH

Compte tenu des résultats de lixiviation obtenue par ce solvant, où la récupération de l'or a été admissible pour ce genre de traitement. Il paraît qu'il serait alléchant pour ce prototype d'industrie minière relativement à son faible prix et sont taux de récupération adoptable, toute en respectant les optimums des paramètres acquis lors de ses expériences.

Conformément aux résultats obtenus, la récupération de l'or est maximale (d'ordre de 81%) pour :

- Une concentration d'hypochlorite (NaClO) à 12% ;
- Un rapport solide/ liquide de 1/10 ;
- un PH de 3.

5.4 Traitement par l'eau régale

L'idée d'appliquer Ce type de traitement hydrometalurgique est procurée du processus d'affinage de l'or. Le même processus opéré chez l'AGENOR sur le lingot d'or de la mine d'Amesmassa est reconduit pour le traitement des minerais de cette mine pour bénéficier de l'efficacité de ce procédé contre la dissolution de l'or.

Contrairement aux essais précédants, une pré concentration gravimétrique précède ce traitement pour jouir de la densité élevée du minerai et pour l'enrichissement de notre échantillon.

5.4.1 Préconcentration gravimétrique

La concentration par gravité ou gravimétrique est une voie importante de la minéralurgie. Les méthodes de séparation gravimétriques sont parmi les plus anciennes et les plus utilisées encore de nos jours en raison de leurs fonctionnements simple et leur efficacité ainsi que les coûts de fonctionnement moindres par rapport aux autres méthodes.

Son principe repose sur la différence de vitesse de sédimentation entre les grains ou particules constituant le minerai en exploitant le gradient de densité entre les minéraux pour les séparer grâce à l'action combinée des forces de gravité, la force centripète, la poussée d'Archimède et la force de traînée).

Les objectifs de la séparation gravimétrique sont en fonction des paramètres physiques du minerai qui sont :

- d'une part l'obtention de concentrés définitifs pour munir par la suite une attaque sélective sur le minerai.
- d'autre part la production de préconcentrés permettant de réduire le coût global de la valorisation et très souvent d'augmenter le rendement métallurgique et de réduire la gangue (minéraux sans valeur économique pour l'exploitation).

La concentration ou l'enrichissement du minerai par gravité dans notre cas s'effectue à l'aide d'une table à secousse. Les tables à secousses sont parmi les principaux appareillages utilisés pour la séparation gravimétrique, et plus précisément pour la séparation par nappe pelliculaire fluente, avec soutirage continu.

Cette méthode est basée sur la longueur du parcours effectué par une particule sur un plan incliné à la surface duquel elle s'écoule par gravité. Les tables comprennent une alimentation et un système de récupération des particules Classifiées (compartiments séparés). Elles sont constituées d'une surface plane légèrement Inclinée dans les sens longitudinal et transversal. Des riffles parallèles en bois sont fixés sur la table.

Le matériau à séparer est introduit au sommet de l'appareil les particules sont entraînées par un courant d'eau, la table est animée d'un mouvement cyclique asymétrique dans le plan horizontal. Les particules plus denses sont retenues par les redans des riffles, ou elles cheminent sous l'impulsion des secousses de la table.

De plus, le plan incliné est sujet à des secousses asymétriques et longitudinales dont l'amplitude de mouvement d'aller est moins important que celle du retour, ce type de secousses améliore la classification et permet aux grains similaires de se placer au même niveau et

d'être récupérés par la même évacuation vers différentes zones de récupérations, ces zones sont décrites dans le tableau ci-dessous :

Nom de la zone	Description
Zone lourds	C'est la zone des concentrés où se trouvent les particules fines et denses
Zone mixtes	C'est la zone qui appartient encore à la zone des concentrés, on y trouve des particules denses et grossières avec quelque particules mixtes
Zone légers	C'est la zone des particules mixtes mélangées à des particules légères

TABLE 5.7 – La description des différentes zones table à secousses

Mode opératoire :

L'essai consiste à alimenter la table à secousses (KHD Humboldt Wedag) par une masse de 500 g de minerai d'une granulométrie comprise entre des valeurs inférieures à $100\mu\text{m}$. Suivant le mouvement de va et vient de la table on récupère le minerai le plus riche dans la zone (1), et pour la zone 2 qui est une zone mixte on va avoir de concentrés et des particules denses et grossières avec quelques particules mixtes, alors que le minerai le plus léger probablement stérile sera récupéré dans les zones 3 et 4.



FIGURE 5.12 – Alimentation table à secousses

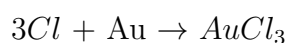
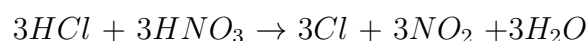
5.4.2 Attaque par l'eau régale

L'eau régale ou l'eau royale est un mélange d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique concentrés de proportions de 3 volumes pour HCL contre 1 volume de HNO_3 , elle est



FIGURE 5.13 – Concentré du minerai d'or dans les rifles

capable de dissoudre certains métaux nobles comme l'or. La dissolution de l'or se fait suivant les réactions suivantes :



Mode opératoire

La masse concentrée obtenue de la zone(1),(2) et (3) feront l'objet d'une attaque chimique via une solution d'eau régale préparée à partir de deux solutions filles concentrées HCL (à 32%)et HNO3 (à 22%). L'essai est réalisé dans trois earlen mayer ou on dispose les masses à solubiliser par l'eau royale soumise une agitation à l'aide d'un barreau magnétique, les esquisses de l'expérience sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Essai	Masse (g)	HNO_3 (ml)	HCl (ml)
Zone 1	20	15	45
Zone 2	65	30	90
Zone 3	135	50	150

TABLE 5.8 – Les esquisses de l'expérience

Résultats et interprétation :

Zone	Absorbance	Concentration en or (mg/l)
Zone 1	0,072	16,375
Zone 2	0,005	1,14
Zone 3	0,002	0,47

TABLE 5.9 – Concentration en or dans les zones de récupérations après attaque par l'eau régale

Les résultats de cet essai ont certifiés l'efficacité de ce réactif prodige à l'échelle industrielle dans la dissolution de l'or si le minerai est procédé par une pré-concentration gravimétrique.

Les résultats prouvent que la récupération est plus importante dans la zone des denses (1), avec un moins degré dans la zone des mixtes (2) et assez faible dans la zone des légers (3).

Conclusion

Conclusion

Ce projet de fin d'études a pour objectif l'amélioration du schéma de traitement d'Or provenant du gisement aurifère de la mine d'Amesmassa et par l'introduction de nouveaux réactifs autres que les cyanures qui sont toxiques et qui causent des dégâts à l'être humain et l'environnement. Ces nouveaux réactifs très prometteurs sont moins coûteux d'une part et nous permettent de travailler dans un milieu acide, d'autre part.

Après un stage de terrain au niveau du site minier d'Amesmassa, dans le sud algérien, et de nos déplacements aux laboratoires d'AGENOR qui nous ont permis de nous familiariser avec les différents procédés, nous avons souhaité apporter notre humble contribution à l'amélioration du flowsheet existant, et ce, pour deux raisons principales :

- Économique : En utilisant des réactifs moins coûteux et susceptibles de donner les mêmes ou meilleurs résultats ;
- Environnemental : Les réactifs utilisés jusque là à Amesmassa sont les cyanures ! Ils sont toxiques et causent des dégâts important à l'environnement.

A travers le travail expérimental que nous avons totalement mené au laboratoire pédagogique de valorisation des minéraux utiles, département de Génie Miner de l'École Nationale Polytechnique sous la direction De Dr OULD HAMOU Malek, nous estimons que l'objectif a été totalement atteint et les résultats obtenus sont scientifiquement, environnementalement et économiquement satisfaisants.

Une caractérisation physique et chimique de minerai a procédé nos essais de traitement afin d'apprécier les paramètres caractérisant le minerai en terme de teneur en or et composition de la gangue et granulochimique qui mènent à des essais de traitement mieux adaptés à ce type de minerai. Trois procédés de lixiviation ont été proposés en utilisant trois solvants (cyanure de potassium (pour comparaison et comme référentiel), hypochlorite et l'eau régale qui est composée de 3 parts d'acide chlorhydrique HCl et d'une part d'acide Nitrique NHO_3) afin de déterminer pour chacun des réactifs utilisés les paramètres optimaux pour obtenir une meilleure récupération d'or.

Les résultats de nos expériences nous ont permis de proposer un schéma technologique (flow sheet) pour chaque procédé de traitement qui pourra répondre aux exigences économiques en terme de teneur de coupure. A titre de recommandation, ces travaux d'investigation doivent continuer pour une éventuelle amélioration par rapport à ce que nous proposons, à savoir :

-
- Promouvoir l'utilisation des autres solvants telle que l'hypochlorite qui est aussi pas chère et efficace.
 - Investiguer un autre paramètre technologique important à l'instar de la température en introduisant d'autres appareils qui la dissolution de l'or comme l'extracteur à vapeur (Meca-gawa).
 - Développer un nouveau produit qui permet à une récupération rapide et efficace de l'or ; il s'agit d'un réducteur qui permettra une précipitation immédiate de l'or dissout dans la solution de lixiviation (lixiviat).

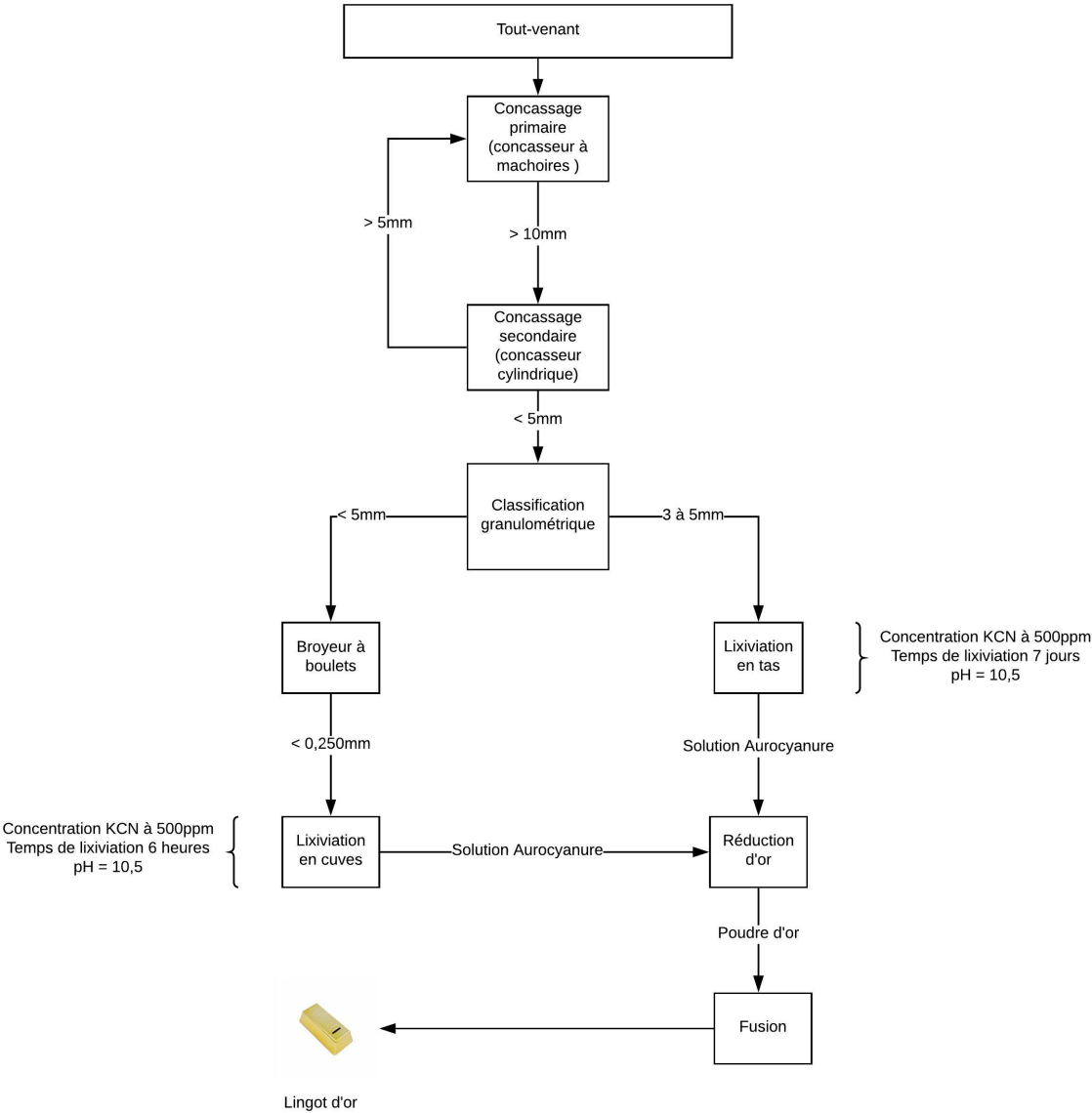


FIGURE 5.14 – Flow sheet traitement des minerais d'or par cyanuration

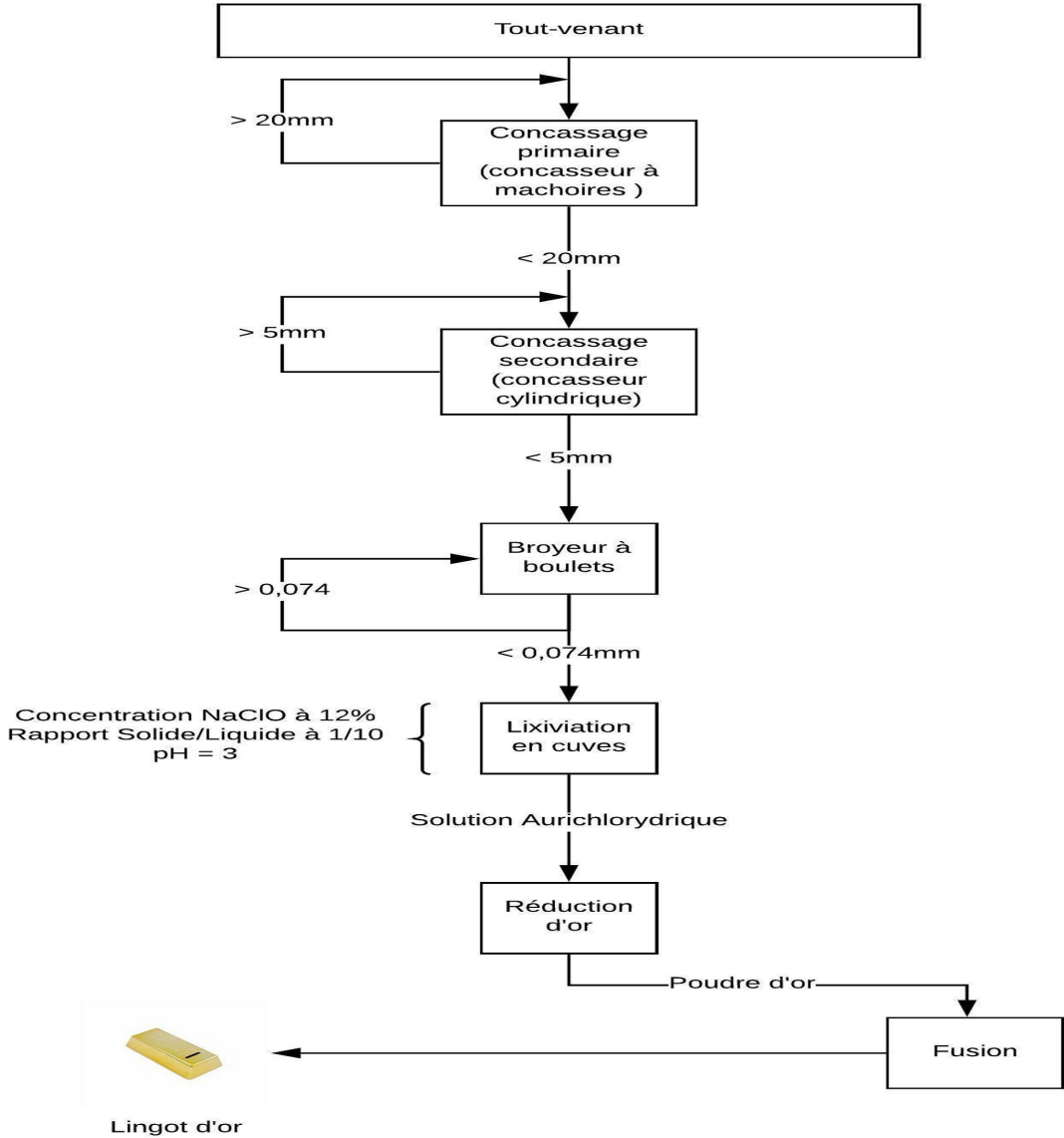


FIGURE 5.15 – Flow sheet traitement des minerais d'or par l'hypochlorite

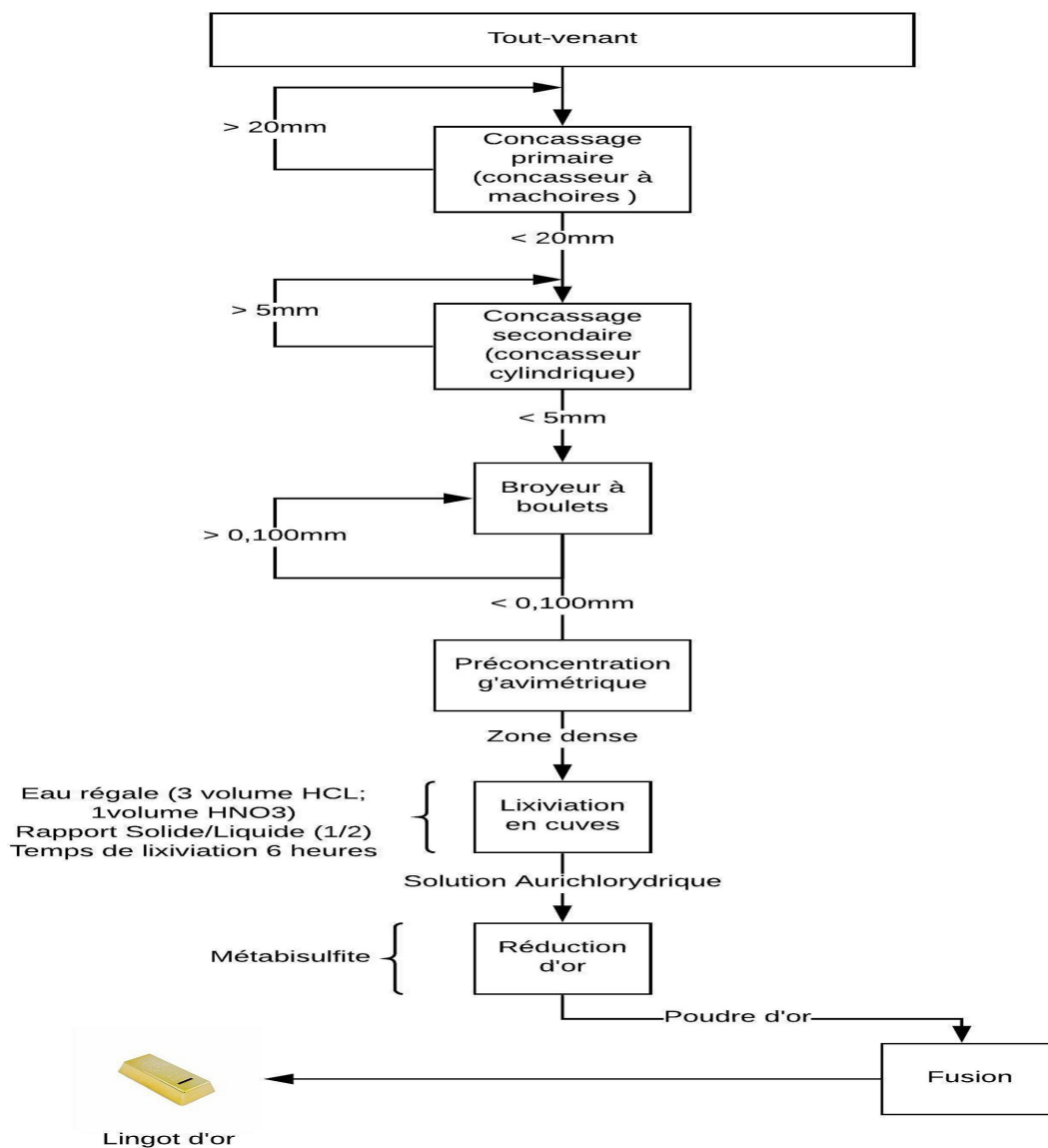


FIGURE 5.16 – Flow sheet traitement des minerais d’or par l’eau régale

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **Ministère de l'énergie- Algérie- L'or** (www.energy.gov.dz).
- [2] **Lucas Burel** , L'OBS, Pour comprendre d'où vien l'or, publier le 28 Septembre 2015.
- [3] **Bullion Volt**, Les propriétés de l'or, (www.or.bullionvolt.fr).
- [4] **Or - Argent**, Les plus gros producteur d'or du monde, (www.or-argent.eu).
- [5] **CMO Rapport du conseil mondial de l'or 2016**, La ruée vers l'or algérien (El-Ayam).
- [6] **2003 Sky Guide**, Sydney Observatory - Powerhouse Museum, 2003.
- [7] **Orkidé de Guyane**, la journée de l'or 16 Mai 2014.
- [8] **L D Michaud**, Gold extraction, 31 Aout 2016.
- [9] **Charles Kubach**, Mining and Mineral Processing Engineer, (<http://www.mine-engineer.com>).
- [10] **A Practical Guide to Reducing Mercury Use in Artisanal and Small-Scale Gold Mining** ,<https://www.epa.gov>.
- [11] **Thomas Varley**, Process of ore treatment, Us dept of interior, Bureau of mine, (www.911metallurgist.com).
- [12] **ZADRA J B**, A process for the recovery of gold from activated carbon by leaching and electolysis, Us dept of interior, Bureau of mine.
- [13] **LAXEN P A**, Development in the application of carbon in pulp to the recovery of gold from South Africa ores, juin 1979.
- [14] **J LIBAUDE et MORIZOT**, BRGM, Le traitement des minerais d'or.
- [15] **VANLIERDE A. OLIVIER and LESOILLE M**, Developement de nouveau procédé de traitement pour le minerai d'or.

[16] **HANS VON MICHAELIS**, Innovations in gold and silver recovery, octobre 1982.

[17] **L'entreprise nationale de l'exploitation des mines d'or (ENOR)**.

[18] **Amesmesa Gold Project**, Bankable Feasibility Study, Section 5, Geology, Geotechnics and Geohydrology. AS GRDM inproc. Vol 1 of 4, 2005.

[19] **POZDNIAKOV**, Rapport de fin des travaux sur l'évaluation du gisement d'Amesmesa avec récapitulatifs des réserves, Office Nationale de Recherche Géologique et Minière (ORGM), division sud, volume 01, 1993.

[20] **J. DE VISSER, Neil INWOOD**, Amesmesa Veins 8 and 9, Tirek Veins II, III, XIV and XV, Geological Modelling and Ressource Estimation, Prepared by RSG Global on behalf of ENOR spa, PAME01, PAME02, 2005.

[21] **L'entreprise nationale de l'exploitation des mines d'or (ENOR)**, Documentation sur l'exploitation de la mine d'or – Amesmesa, 2017.

[22] **L'Agence Nationale pour la transformation et la distribution de l'or et des autres métaux précieux (AGENOR)**

[23] **COMPTOIR DE LYON ALEMAND LOUYOT**.

[24] **Jean-Philippe PERRILLAT** (Diffraction de rayons X et structures cristallines.

[25] **L. F. Kozin and V. T. Melekhin**, Extraction of Gold From Ores and Concentrates by Leaching with the Use of Cyanides and Alternative Reagents, Vernadskii Institute of General and Inorganic Chemistry, National Academy of Sciences of the Ukraine, Kiev, Ukraine, June 2004.

[26] **Vaikuntam Iyer Lakshmanan Raja Roy V. Ramachandran**, Innovative Process Development in Metallurgical Industry, Process Research Ortech, Inc. Mississauga , ON, Canada.

Annexes

Annexes

A. Calcul de la masse volumique :

Appareils utilisés :

- Balance ;
- Pelle ;
- Deux récipients A et B, le premier est muni de trop plein, le deuxième peut être un bicher ;
- Une éprouvette graduée.

Mode opératoire :

1. Mettre dans une éprouvette graduée un volume V1 d'eau ;
2. Peser une masse M du minerai, et l'introduire dans l'éprouvette. Bien éliminer les bulles d'air ;
3. Lire le nouveau volume V2 ;

Le volume absolu est : $V = V2 - V1$

$$\rho = \frac{M}{(V_2 - V_1)}$$

M= 100 g

V1= 150 ml

V2=188 ml

La masse volumique absolue est : $\rho = 100/(188 - 150) = 250/93 = 2.68g/ml$.

B. Calcul de la porosité :

Appareils utilisés :

- Balance numérique ;
- Récipients métalliques pour séchage,
- Étuve ;
- Bicher ;
- Plaque chauffante ;
- Un chiffon ;
- Agitateur.

Mode opératoire :

1. Peser l'échantillon à étudier et ne pas avoir plus de 10 g de grains trop petits ;

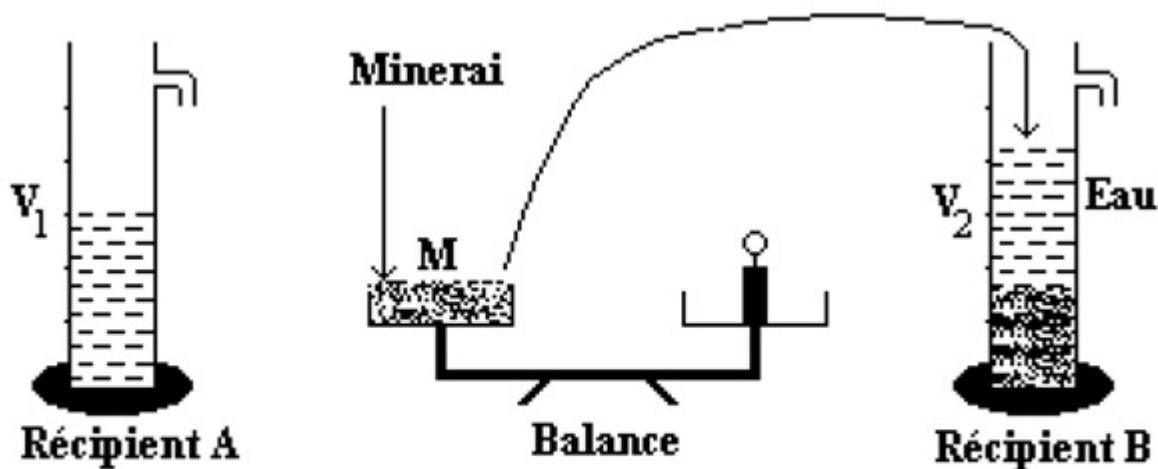


FIGURE 5.17 – Mode opératoire calcul de masse volumique

2. Sécher l'échantillon dans son récipient, à l'étuve jusqu'à masse constante, en remuant de temps en temps ;
3. Peser la masse sèche (M_0) ;
4. Placer l'échantillon sec dans un bicher rempli d'eau froide et porter à ébullition pendant deux heures ;
5. Laisser refroidir, et peser la nouvelle masse (M_1) après avoir extrait la part d'eau et essuyer chaque grain avec un chiffon.

$$P(\%) = \frac{(M_1 - M_0) \times \rho \times 100}{M_0}$$

$M_0 = 95.4532 \text{ g}$

$M_1 = 96.5410 \text{ g}$

$P = (96.5410 - 95.4532) \times 2.63 \times 100 / 100 = 0.23$

C. Calcul du taux d'humidité :

Appareils utilisés :

- Balance ;
- Etuve ;
- Récipients métalliques ;
- Agitateurs pour remuer la prise d'essai durant la période de séchage.

Mode opératoire :

1. Peser l'échantillon à 0.1 % près ;

2. Sécher à fond l'échantillon dans son récipient dans l'étuve en remuant jusqu'à masse constante, en prenant bien soin d'éviter la perte de la moindre particule ;
3. Peser la prise d'essai séchée à 0.1 près, aussi tôt qu'elle est suffisamment refroidie afin de ne pas endommager la balance.

$$T(\%) = \frac{(M_1 - M_0) \times 100}{M_1}$$

M_0 = masse séchée ;

M_1 : masse initiale ;

T : $T = (100 - 98.9763) \times 100 / 100 = 1.02 \%$.

