

N° d'ordre :FS / UMBB / 2020

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أمحمد بوقرة بومرداس

Université M'hamed Bougara – Boumerdès



Faculté des Sciences

Département de Chimie

Spécialité chimie analytique

Mémoire de projet de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de
MASTER

Réalisé par :

ANIBA Souad

MOUACI Narimane

Soutenu le 03/11/2020

Thème

**L'affinage de l'or et l'optimisation des paramètres du processus
d'affinage de l'argent par voie chimique**

Devant les jurys composé de :

Mme R. SOUAG	Maître de conférences A-FS-UMBB	Président
Mme N. GHEMIT	Maître de conférences A-FS-UMBB	Examineur
Mme H. BAGHLI	Maître Assistant A-FS-UMBB	Promoteur
Mr M. MAOUEL	Ingénieur-Doctorant AGENOR	Co-Promoteur

Année universitaire 2019/2020

Remerciements

Toute notre gratitude, grâce et remerciement vont à « ALLAH » le tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

C'est avec profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions notre promotrice M^{me} Houda BAGHLI pour la sollicitude avec laquelle elle a suivie et guidée ce travail.

Nous remercions beaucoup Mr. Mahdjoub BERADOUANE et Mr. Mahmoud MAOUEL qui nous ont bien reçus au sein de l'AGENOR l'unité de baraki et qui nous ont guidé et nous ont aidé durant notre stage pour réaliser ce modeste travail, ainsi qu'au personnel de l'AGENOR sans exception.

Nous remercions les membres de jury M^{me} Rafika SOUAG et M^{me} Naima GHEMIT d'avoir accepté d'évaluer notre mémoire de fin d'étude.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude envers tous les enseignants de L'université M'hamed Bougara de Boumerdès « Département de Chimie » qui ont contribué à notre formation et à l'élaboration de ce travail.

Et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail en signe de respect,
reconnaissance et de remerciement :*

*À mon cher père « Abdelwahab », ma chère mère « Rabia »,
qui m'ont soutenu tout au long de ma vie, qu'ils trouvent ici
l'expression ma reconnaissance.*

*À mes chères sœurs : Soumia, Nourhane et mes petits neveux
'firas, Rahil'.*

À mon promotrice madame Houda Baghli

À mes amis : Keltoum et mon binôme Narimane

À tous mes amis qui me connaissent de près ou de loin.

SOUAD

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail en signe de respect,

reconnaissance et de remerciement :

A mon cher père « Hamid », ma chère mère « Kira », qui m'ont

soutenu tout au long de ma vie, qu'ils trouvent ici

l'expression ma reconnaissance.

A mon cher frère : Yacin

A mon promotrice madame Houda Baghli

A mon binôme Souad

A tous mes amis qui me connaissent de près ou de loin.

NARIMANE

TABLE DES MATIERES

Liste des figures	viii
Liste des tableaux.....	x
Liste des abréviations.....	xi
Introduction générale.....	1
CHAPITRE I.....	3
GENERALITES SUR LES METAUX PRECIEUX	3
I.1 Généralités sur l'Or.....	3
I.2 Caractéristiques physico-chimique de l'or.....	3
I.3 Le rôle de l'or dans les économies.....	4
I.4 La production de l'or dans le monde.....	6
I.5 L'apport économique de l'or.....	8
I.6 La fixation des prix de l'or sur le marché mondial	9
I.7 Méthodes d'extraction d'or	9
I.8 Méthodes de récupération d'or.....	10
I.8.1 Précipitation sur zinc ou aluminium	10
I.8.2 Adsorption sur charbon actif.....	11
I.9 Utilisation de l'or dans l'industrie.....	11
I.9.1 Le secteur électronique	12
I.9.2 Le secteur dentaire	13
I.10 Généralités sur l'argent	13
I.10.1 L'argent et la lumière.....	15
I.10.2 La sensibilité du métal à la lumière	15
I.10.3 La sensibilité du métal à la couleur	16
I.10.4 L'argent et la chaleur	16
I.10.5 L'argent et l'électricité.....	16
I.10.6 L'argent et les forces mécaniques.....	17
I.11 Caractéristiques physico-chimique de l'argent	17
I.11.1 Propriétés physiques	17
I.11.2 Les propriétés chimiques de l'argent	18
I.12 L'argent et le domaine du vivant	19
I.13 Utilisations et consommation de l'argent	19

I.14	Substituabilité, recyclage et Prix de l'Argent	23
I.15	Applications industrielles de l'argent et de ses sels.....	25
I.15.1	Argent dans les catalyseurs	25
I.15.2	La demande d'argent dans le photovoltaïque	26
I.16	L'extraction de l'or et de l'argent avec les biomatériaux	27
I.16.1	Extraire de l'or naturellement avec des plantes	27
I.16.2	Les nanotechnologies.....	29
I.17	Conclusion.....	29
CHAPITRE II		30
PROCESSUS INDUSTRIEL DE L’AFFINAGE DE L’OR ET L’ARGENT		30
II.1	Introduction	30
II.2	Présentation de l'entreprise.....	30
II.2.1	Historique de l'entreprise	30
II.2.2	Mission et objectif de l'entreprise	31
II.2.3	Objectifs.....	31
II.2.4	Organigramme	32
II.3	Ateliers entreprise	33
II.3.1	Atelier fusion	33
II.3.2	Atelier laminage tréfilage	34
II.3.3	Atelier traitement déchets	34
II.3.4	Atelier affinage or.....	36
II.3.5	Atelier affinage argent	37
II.3.6	Laboratoire.....	38
II.4	Affinage de l'or	39
II.4.1	La réception	39
II.4.1.1	La coupellation	39
II.4.2	Processus d'affinage de l'or.....	40
II.4.2.1	Le grenailage	42
II.4.2.2	L'affinage de l'or (attaque chimique par l'eau régale).....	42
II.4.2.3	Le Filtrage de la solution	43
II.4.2.4	La récupération de l'or	44
II.4.2.5	La fusion.....	45
II.5	Affinage de l'argent (Le passivé).....	47
II.6	Conclusion.....	47

CHAPITRE III	48
PROCESSUS DE TRAITEMENT DE L'OR ET D'AFFINAGE D'ARGENT	48
III.1 Traitement des bullions d'Or	48
III.1.1 Introduction.....	48
III.1.2 Réception du bullions	49
III.1.2.1 La pesée	49
III.1.2.2 Détermination du titre d'or.....	49
III.1.3 Grenailage.....	52
III.1.4 L'attaque chimique.....	53
III.1.5 Fusion.....	55
III.1.6 Mise en lingots.....	56
III.1.7 Coupellation.....	56
III.1.8 Récupération du reste de l'or et d'argent.....	58
III.2 Résultats et discussions	59
III.2.1 La réception du bullions	59
III.2.2 La coupellation interne	60
III.3 Processus de traitement d'argent.....	63
III.3.1 Réduction	63
III.3.2 La fusion réductrice	64
III.3.3 Fusion.....	64
III.3.4 Titrage	64
III.4 Conclusion.....	64
CHAPITRE IV	67
OPTIMISATION DES PARAMETRES D'AFFINAGE DE L'ARGENT	67
IV.1 Introduction	67
IV.2 Affinage par ajout de la soude et de dextrose	67
IV.2.1 Calcul des quantités théorique à ajoutés des réactifs.....	68
IV.2.2 Manipulation.....	69
IV.3 Optimisation de quantités ajoutées de la soude.....	70
IV.3.1 Expérience 1 :	70
IV.3.2 Expérience 2 :	70
IV.3.3 Expérience 3 :	71
IV.3.4 Représentation graphiques des résultats	72
IV.3.5 Interprétation des résultats	73
IV.4 Optimisation des quantités de dextrose ajoutées.....	73

IV.4.1	Expérience 1 :	73
IV.4.2	Expérience 2 :	74
IV.4.3	Expérience 3 :	76
IV.5	Affinage par cémentation avec le cuivre.....	77
IV.5.1	Expérience 1 : Réalisation de mode statique	77
IV.5.2	Expérience 2 : Réalisation de mode dynamique	78
IV.5.3	Interprétation des résultats	79
IV.6	Etude économique des deux procédés.....	79
IV.7	Proposition d'affinage par le processus combiné (cémentation/soude et dextrose).....	80
IV.8	Conclusion.....	82
	Conclusion générale.....	83
	Bibliographie.....	85
	Annexes.....	87

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Répartition des réserves mondiales d'or, février 2020 (%).....	5
Figure I.2 : Classement des pays producteurs de l'or.....	7
Figure I.3 : Production mondiale par tonnes d'or depuis 1995.....	8
Figure I.4 : Cours de l'Once d'Or depuis 1970 à Londres.....	9
Figure I.5 : Procédé Merrill-Crowe.....	11
Figure I.6 : Demande d'or par le secteur de l'électronique, par répartition géographique, 2014 (%).....	12
Figure I.7 : Consommation mondiale d'argent par utilisation en 2016.....	21
Figure I.8 : Répartition de la production minière mondiale en 2016.....	21
Figure I.9 : Répartition réserves minières mondiales d'argent en 2016.....	22
Figure I.10 : Evolution de la production minière d'argent par pays depuis 1995.....	22
Figure I.11 : Cours de l'argent en US\$/OZ.....	24
Figure I.12 : Globale Solaire PV, par pays et région (2006-2016).....	27
Figure I.13 : L'agromine et la phitoextraction.....	28
Figure II.1 : Localisation géographique AGENOR.....	31
Figure II.2 : Organigramme présente la société AGENOR.....	32
Figure II.3 : Fours à induction.....	33
Figure II.4 : Four a coulée continue.....	33
Figure II.5 : Les parties principales des fours présidents.....	34
Figure II.6 : Station neutralisation des eaux usée.....	35
Figure II.7 : Station déminéralisation.....	36
Figure II.8 : Chariots de filtrage.....	37
Figure II.9 : Tonneau réacteur.....	37
Figure II.10 : Appareille d'analyse XRF.....	38
Figure II.11 : Méthode de coupellation lors de l'extraction de l'or.....	41
Figure II.12 : Le Grenailage.....	42
Figure II.13 : Le chariot de filtrage.....	44
Figure II.14 : La récupération de l'or.....	45
Figure II.15 : La fusion et mise en lingot.....	45

Figure II.16 : Organigramme des différentes étapes du processus d'Affinage de l'Or.....	46
Figure II.17 : Les différentes étapes de Traitement du passivé.....	47
Figure III.1 : Analyseur X.R.F.....	49
Figure III.2 : Coupelle en magnésie.....	50
Figure III.3 : Four à coupelles.....	51
Figure III.4 : Boutons de la fusion.....	51
Figure III.5 : Laminoir.....	51
Figure III.6 : Boutons après laminage et recuit.....	51
Figure III.7 : Hotte réactions chimiques.....	52
Figure III.8 : Dissolution de l'argent.....	52
Figure III.9 : Boutons d'or.....	52
Figure III.10 : Four de grenailage.....	53
Figure III.11 : Les grenailles.....	53
Figure III.12 : Réacteur d'attaque.....	54
Figure III.13 : Poudre d'or après filtration.....	54
Figure III.14 : Poudre d'or après séchage.....	55
Figure III.15 : Fusion de la poudre d'or.....	55
Figure III.16 : Lingots d'or fin.....	56
Figure III.17 : Affinage d'or.....	64
Figure III.18 : Réduction d'or.....	65
Figure III.19 : Récupération de l'or et l'affinage d'argent par la fusion réductrice.....	66
Figure IV.1 : Protocole d'affinage d'argent par la soude et le dextrose.....	69
Figure IV.2 : Quantités obtenues lors des trois essais.....	71
Figure IV.3 : Rapport S: L = 1: 2.....	76
Figure IV.4 : Rapport S: L = 1: 0.5.....	76
Figure IV.5 : Représentation de mode statique.....	78
Figure IV.6 : Représentation de mode dynamique.....	79
Figure IV.7.a : Organigramme du processus combiné d'affinage de l'Argent.....	81
Figure IV.7.b : Organigramme du processus combiné d'affinage de l'Argent.....	82

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Caractéristiques physico-chimiques et thermiques de l'or.....	4
Tableau I.2 : Utilisations et consommation de l'argent en industrie.....	20
Tableau I.3 : Substituabilité de l'argent	23
Tableau I.4 : Le Taux de recyclage.....	23
Tableau I.5 : Les prix.....	24
Tableau III.1 : Le poids des trois échantillons, en gramme.....	49
Tableau III.2 : Le poids final des trois échantillons, en gramme.....	52
Tableau III.3 : Le poids des trois échantillons, en gramme.....	56
Tableau IV.1 : La quantité théorique de NaOH à ajouter.....	68
Tableau IV.2 : La quantité théorique de dextrose à ajouter.....	68
Tableau IV.3 : Ajout de 40 % de la soude caustique / 80 % de dextrose.....	70
Tableau IV.4 : Ajout de 60 % de la soude caustique / 80 % de dextrose.....	70
Tableau IV.5 : Ajout de 80 % de la soude caustique / 80 % de dextrose.....	71
Tableau IV.6 : Ajout de 60 % de la soude caustique et 80 % de dextrose.....	73
Tableau IV.7 : Influence du temps d'agitation.....	75
Tableau IV.8 : Mode Statique.....	77
Tableau IV.9 : Mode Dynamique.....	78
Tableau IV.10 : Coûts d'affinage de 1000 g d'argent par la soude caustique et le dextrose.....	80
Tableau IV.11 : Coûts d'affinage de 1000 g d'argent par Cémentation.....	80

LISTE DES ABREVIATIONS

AGENOR : L'Agence Nationale pour la transformation et la distribution de l'Or et des autres métaux précieux.

AMS : Amesmassa

ENOR : Entreprise d'exploitation des mines d'or

HCL : Acide chlorhydrique

HNO₃ : Acide nitrique

NaOH : La soude caustique

XRF : La fluorescence des rayons X

Pi: Poids d'or initial

Pf: Poids d'or final

T (Au) : La teneur en Or

T (Ag) : La teneur en argent

P' : Poids de témoin

F : Facteur de correction

AgNO₃ : Nitrate d'argent

CuNO₃ : Nitrate de cuivre

NaCl : Chlorure de potassium

AgCl : Chlorure d'argent

C₆H₁₂O₆ : Dextrose

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

L'or est l'un des plus anciens métaux connu et exploité. Sa rareté et son inaltérabilité en font une substance recherchée dont le prix, par rapport aux autres substances minérales, a toujours été relativement élevé. [1]

L'or, comme l'argent, le platine et le palladium fait partie de la catégorie des métaux précieux. Ce sont des métaux lourds dont les propriétés chimiques de moindre réactivité et de bonne résistance à l'oxydation confèrent un caractère rare. Les métaux précieux sont « négociés » quasi 24 h sur 24 sur différents marchés financiers dans le monde au travers de leurs cotations de prix futures et des prix spot.

L'utilisation de certains métaux précieux, est orientée principalement vers l'industrie, ce qui sous-entend une demande plus sensible à la conjoncture économique.

D'autres, comme l'or, ont une demande plus hétérogène ; outre la composante industrielle, elle est influencée par les décisions des spéculateurs, par les politiques des banques centrales dans le monde et même par les consommateurs particuliers (bijoux). [2]

La mise en évidence de gisement d'or en Algérie dans la région du Hoggar, a incité l'état à entreprendre des études d'exploitation et de traitement en tenant compte de la situation géographique et des conditions climatique. [1]

L'argent est un métal malléable et ductile plus dense que le fer. Il est extrait de mines exploitant aussi bien le zinc, l'or, le cuivre ou le plomb. L'argent étant souvent associé à ces éléments, il est nécessaire de traiter les roches pour séparer ces différents métaux. L'électrum est un alliage naturel d'or et d'argent fin que l'on trouve dans les mines d'or exclusivement.

Comme les autres métaux précieux (or et platine) l'argent est très résistant à l'oxydation, et se caractérise par son éclat blanc une fois poli. Sa ductilité le rend facile à travailler à l'état solide, à tel point qu'il est nécessaire de le lier avec d'autres métaux, le cuivre dans la plupart des cas, pour augmenter la résistance mécanique du métal et pouvoir l'utiliser pour la fabrication de bijoux et d'argenterie.

Sans allier l'argent avec le cuivre, vous pourriez aisément plier vos bijoux ou votre argenterie entre vos doigts. C'est parce que l'argent est un métal précieux et qu'il est allié à d'autres métaux, que l'on cherche toujours à contrôler le titre (la pureté) du métal. [3]

L'affinage de l'or et l'argent sont les principaux processus qui s'opèrent à l'agence nationale pour la transformation et la distribution des métaux précieux, AGENOR. C'est une opération qui signifie la purification ou séparation des métaux précieux en les amenant à un très haut degré de pureté.

Pour cela, on a effectué un stage pratique au sein de l'agence AGENOR l'unité de baraki dans le but d'étudier l'affinage de l'or et l'optimisation des paramètres du processus d'affinage de l'argent par voie chimique.

Le présent mémoire est divisé en quatre (4) chapitres :

1- Dans le premier chapitre I, Généralités sur les métaux précieux ; l'or et l'argent.

2- Le chapitre II est destiné à la Présentation de l'entreprise AGENOR dans tous ses cadres ; historique, mission et objectif, situation, ainsi que les processus d'affinage de l'or et l'argent.

3- Le chapitre III présente Les processus de traitement de l'or et d'affinage d'argent ; traitement, réactions, avec les résultats.

4- Et le dernier chapitre IV, nous déterminons la proposition des méthodes d'optimisation des paramètres d'affinage de l'argent ; affinage par ajout de la soude et de dextrose, affinage par la cémentation avec le cuivre avec des interprétations des résultats.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale qui résume l'essentiel de notre travail.

Chapitre I

Généralités sur les métaux précieux

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES METAUX PRECIEUX

I.1 Généralités sur l'Or

L'or est considéré comme étant le métal le plus précieux sur terre, 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. [4]

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 "croute 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.

I.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.

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 $D=19.3$ ce qui lui donne un poids atomique très élevé de 196.9665 g/atome.

Tableau I.1 : Caractéristiques physico-chimiques et thermiques de l'or

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

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. [5]

I.3 Le rôle de l'or dans les économies

L'or joue un rôle multidimensionnel vital, à la fois dans les économies locales et au niveau international. Dans les pays en développement producteurs, l'or peut représenter une large part des recettes d'exportations de marchandises.

Par exemple, il représentait plus de 40 % des revenus d'exportation au Mali, au Burkina Faso et en Guyane entre 2009 et 2013 et environ 56 % au Suriname en 2013.

L'or représente également une source substantielle de revenus pour les gouvernements au travers du prélèvement de taxes et de redevances sur les activités d'extraction et de transformation. En outre, bien que les activités liées à l'exploitation aurifère soient généralement très gourmandes en capital, elles constituent également une source importante d'emploi au niveau local, avec environ 50 000 personnes travaillant directement ou indirectement pour le secteur aurifère en Australie et environ 300 000 en Afrique du Sud. Dans le monde, environ 100 millions de personnes seraient dépendantes des activités minières aurifères pour leur subsistance.

Selon le dernier rapport du Conseil Mondial de l'Or (WGC) publié en ce début d'année 2020, reprenant le classement des pays de la région MENA (Moyen Orient, Afrique du Nord) en terme de réserves d'or, l'Algérie est classée en 3ème position.

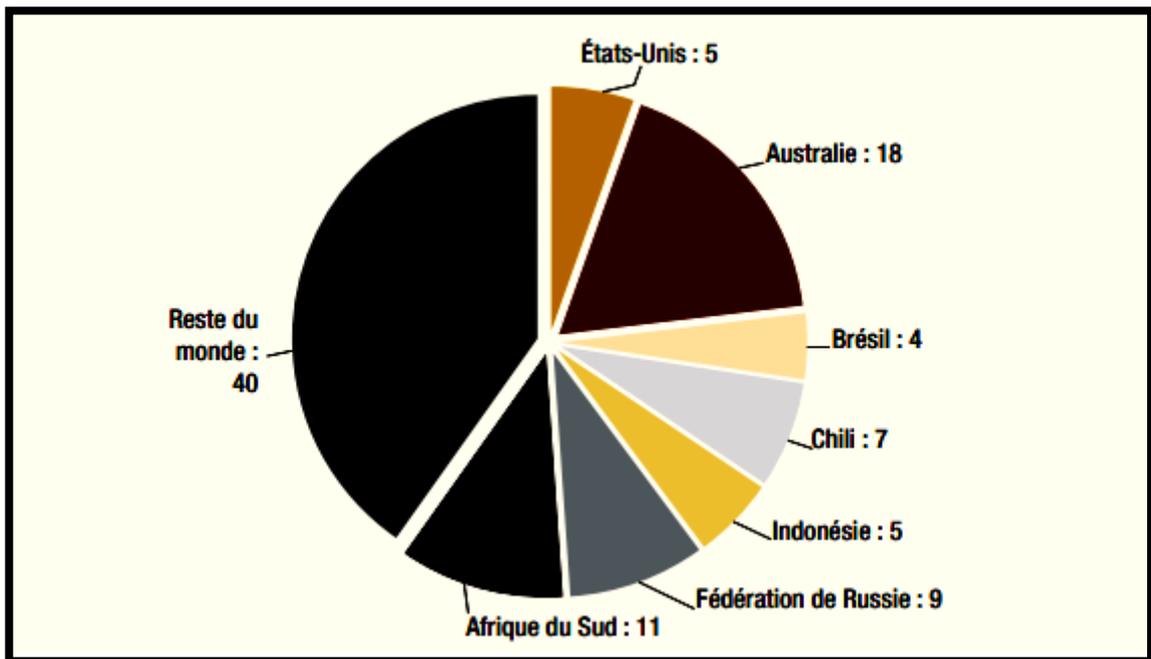


Figure I.1 : Répartition des réserves mondiales d'or, février 2020 (%).

En effet, L'Algérie vient après l'Arabie Saoudite et le Liban avec des réserves d'or s'élevant à 173,6 tonnes. Elle est suivie par la Libye avec 116,6 tonnes, et par l'Irak avec 96,3 tonnes puis l'Egypte qui détient une réserve aurifère estimée à 79 tonnes.

En tête du classement mondial, ce sont les États-Unis d'Amérique qui restent indétronables avec des réserves d'or estimées à 8.133,5 tonnes. Les USA sont

suivis par l'Allemagne qui avec 3.370 tonnes puis par l'Italie qui détient 2.452 tonnes. La France vient ensuite avec une réserve qui s'élève à 2.436 tonnes.

La Russie se positionne à la 5ème place en ce début d'année 2020 portant ses réserves totales à 2.270,56 tonnes, tandis que la Chine se classe 6ème avec des réserves d'or estimées à pas moins de 1.948 tonnes, clôturant ainsi le classement mondial.

En dehors des dépôts de métaux précieux, l'or peut également être extrait au cours des processus de fusion et de raffinage de certains autres métaux. Il est généralement admis qu'entre 5 % et 15 % de l'or extrait dans le monde seraient le résultat de cette seconde activité. [6]

I.4 La production de l'or dans le monde

La production mondiale est sur une pente ascendante depuis des années, cela préfigure une élévation progressive du cours de l'Or sur le moyen et le long terme, 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.

La Chine domine ce classement aujourd'hui, 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 d'Or totale. [7]

La Chine est donc, depuis 2007 le premier producteur mondial d'Or avec un total annuel de 462 tonnes d'Or 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 : Driefonteinet mine de Tau Tona
- Canada : mine d'Hemlo (Ontario)
- Mexique : mine de Los Filos

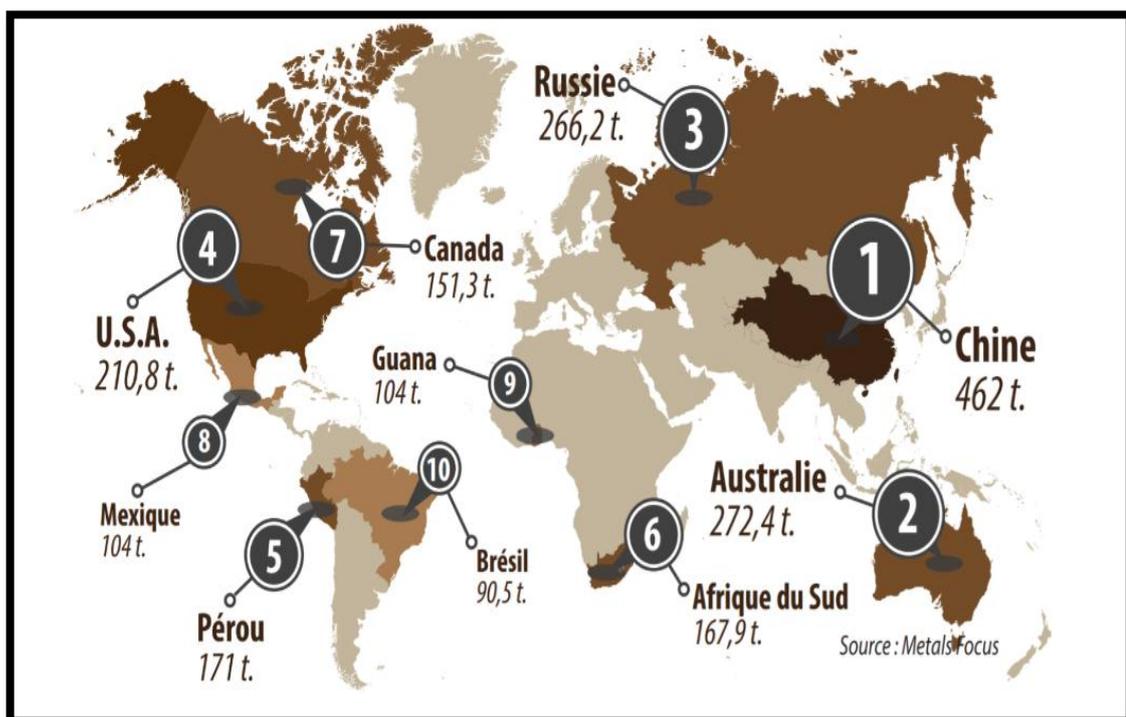


Figure I.2 : Classement des pays producteurs de l'or.

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.

L'Algérie occupe le 25ème rang mondial et le 3ème 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 998kg d'or.[8]

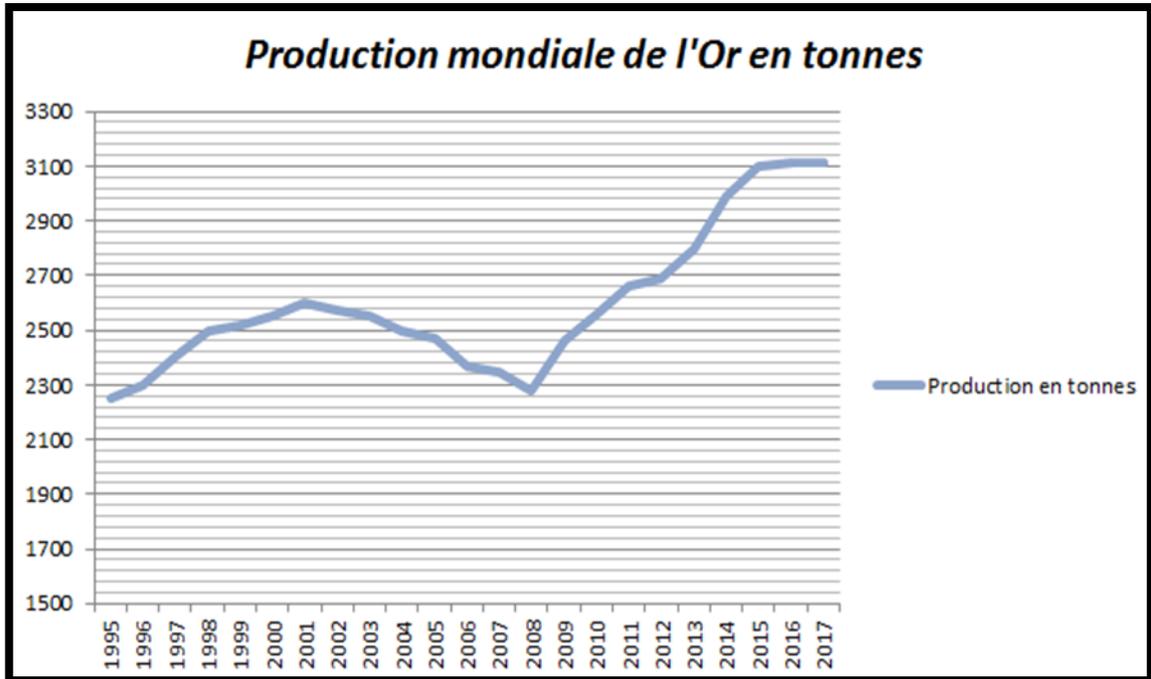


Figure I.3 : Production mondiale par tonnes d'or depuis 1995.

I.5 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.

I.6 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. [9]

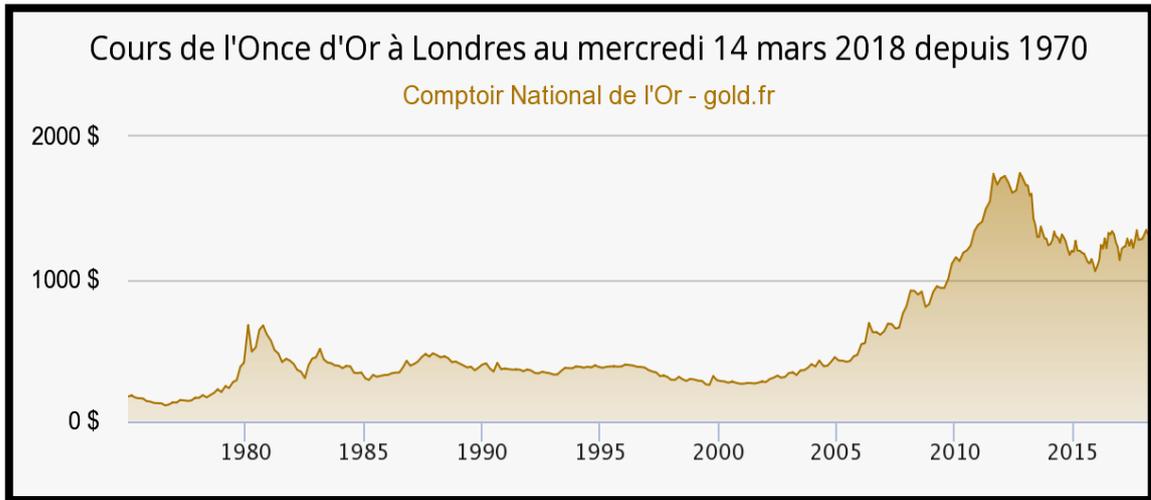


Figure I.4 : Cours de l'Once d'Or depuis 1970 à Londres.

I.7 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 débuter 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. [10]

I.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 traitements ont 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.

I.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.

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.



Figure I.5 : Procédé *Merril-Crowe*.

I.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. [11]

I.9 Utilisation de l'or dans l'industrie

Les applications industrielles ont représenté 450 tonnes d'or par an en moyenne au cours de la dernière décennie (2005–2014), soit environ 12 % de la demande

mondiale. Cette part est demeurée relativement stable au cours de la période, principalement soutenue par le secteur électronique (76,8 %) et le secteur dentaire (12,2 %).

I.9.1 Le secteur électronique

Au cours des dix dernières années (2005–2014), les cinq principaux pays consommateurs d'or dans le secteur électronique ont compté pour environ 86 % de la demande sectorielle totale. Il s'agissait, par ordre d'importance du Japon, de la Chine (y compris Taiwan, province de Chine), des États-Unis, de la République de Corée et de la Fédération de Russie (figure I.6).

La demande a principalement été soutenue par la forte augmentation de la consommation chinoise dont les volumes ont quasiment doublé au cours de la dernière décennie, principalement sous l'effet de l'expansion du marché intérieur. L'évolution de la demande dans les autres grands pays consommateurs a suivi des modèles variés avec, par exemple, une augmentation de 1,6 % aux États-Unis, en dépit de la crise économique et financière, et une baisse de la demande enregistrée au Japon et en République de Corée, de 26,6 cent et 23,6 %, respectivement.

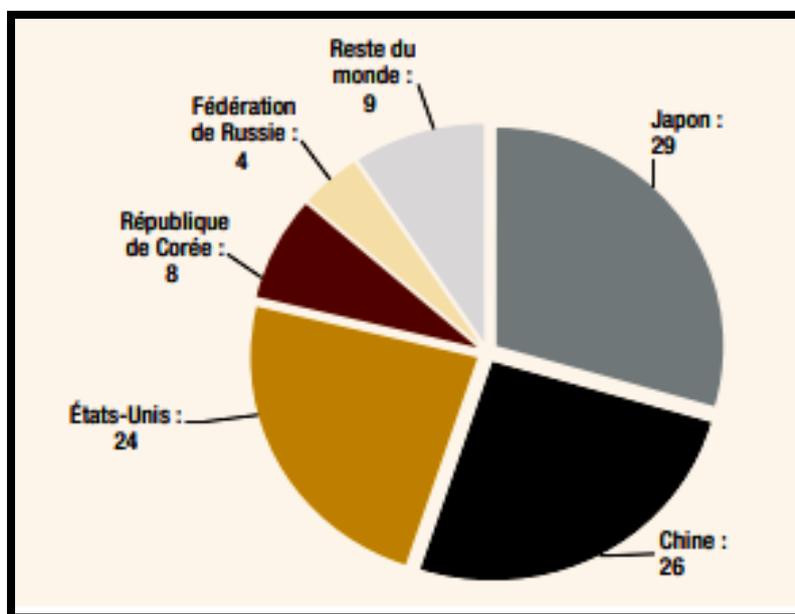


Figure I.6 : Demande d'or par le secteur de l'électronique, par répartition géographique, 2014 (%).

La demande d'or dans le secteur de l'électronique est attendue en baisse de plus de 15 % d'ici 2018, principalement sous l'effet de la poursuite de la tendance vers une adoption de substituts à l'or, en particulier dans le domaine des câbles de connexion.

I.9.2 Le secteur dentaire

En raison de sa durabilité, de sa polyvalence, de son esthétisme, de sa biocompatibilité et de sa facilité d'utilisation, l'or pur ou allié est utilisé depuis longtemps en dentisterie. Dans ce secteur, l'or est notamment employé pour garnir des cavités ou pour la fabrication de couronnes et de bridges.

Contrairement aux autres secteurs utilisateurs, la demande d'or dans le secteur dentaire semble être principalement soutenue par la demande en provenance des pays développés. Ceux-ci ont, en effet, représenté une moyenne de 85% de la demande sectorielle mondiale au cours des dix dernières années.

Toutefois, sous l'effet de la mise au point de substituts meilleur marché que l'or (céramique, alliages à base de cobalt et de chrome, porcelaine, par exemple), la part de l'or dans le secteur dentaire a eu tendance à diminuer depuis 2005, année pendant laquelle ce secteur représentait environ 14% des utilisations technologiques totales. Selon les prévisions, cette baisse devrait se poursuivre d'ici 2018.

En dehors des principaux secteurs industriels examinés précédemment, l'or est également utilisé dans d'autres domaines tels que l'industrie aéronautique, par exemple, où il est notamment apprécié pour sa capacité à réfléchir les rayons infrarouges. Dans le secteur automobile, l'or trouve également des débouchés croissants dans la production de pots catalytiques. Il est également utilisé dans diverses applications médicales. [12]

I.10 Généralités sur l'argent

L'argent a, depuis toujours, été considéré comme le métal le plus précieux après l'or mais on le trouve rarement à l'état pur dans la nature. Il adopte souvent de véritables formes artistiques, apparaissant en des structures délicates ressemblant à des mousses ou des fougères.

Les minerais d'argent sont également très rares. Nous trouvons tout d'abord des minerais sulfuriques avant tout l'argentite ou argyrose, puis les minerais antimoniques, comme la pyrargyrite ou argyritrose, la myrargyrite, la stéphanite ; ensuite viennent les minerais contenant de l'arsenic et de l'antimoine. Et, pour

terminer, on peut mentionner les tétraédrites contenant du cuivre, de l'argent, du fer, du zinc, du mercure, de l'antimoine et du soufre.

En résumé, il manque à l'argent la capacité de former des gisements individuels importants. C'est pourquoi il nous apparaît lié à la formation de trois sortes de gisements différents :

- de grandes quantités d'argent sont souvent mêlées aux gisements d'or.
- toute galène contient de l'argent et représente ainsi à vrai dire, le minerai d'argent le plus important.
- les plus importants minerais de cuivre de nature sulfurique recèlent de l'argent.

Dans l'organisme terrestre, la répartition des gisements d'argent est la suivante : MEXICO est le secteur le plus riche en argent, puis viennent les Etats-Unis, l'Amérique du Sud, Pérou et Chili, et le Canada. Auprès d'eux, les autres gisements d'argent de la Terre sont à peine existants. Au Moyen-Age, les régions minières de l'Europe Centrale, de la Suède, du Hartz, de la Bohême et de la Hongrie en procuraient les plus grandes quantités ; dans l'Antiquité, c'était l'Espagne.

Le tableau comparatif suivant, comportant les pourcentages en 1931, donnera une idée de cette répartition :

Europe : 459 tonnes 8%

Asie : 417 tonnes 7%

Afrique : 40 tonnes 1%

Amérique : 4 878 tonnes 80%

Australie : 260 tonnes 4%

Mais la plus grande proportion d'argent du globe est extraite de l'eau des mers, toutefois sous une forme extrêmement-diluée.

Lorsque nous considérons la terre ferme, nous constatons que la plus grande partie de l'argent est fournie par l'Ouest, surtout par le Nouveau Monde ce qui provoqua, depuis les temps les plus anciens, un flux de ce métal vers l'Est. Dans l'Antiquité déjà, l'Espagne alimentait l'Orient en argent.

L'Inde et la Chine demeurent encore les plus grands consommateurs. Leur défense repose sur l'argent. Inversement, la majorité de l'or découvert afflue vers l'Ouest. L'Amérique consomme le plus d'or ; bien que l'Afrique recèle les plus importants gisements. Dans la sphère sociale, l'or suit le cours du soleil ; l'argent parcourt la voie inverse.

Mais considérons tout d'abord le métal à l'état pur. Dans ses échanges avec les substances et les forces du monde extérieur il nous révèle des phénomènes très particuliers.

I.10.1 L'argent et la lumière

Dans l'éclat noble et froid du métal pur vit une force réfléchissante accomplie. Sur ce plan, aucun autre métal ne peut lui être comparé. Il renvoie la lumière non troublée, presque inchangée. Il refuse de prendre en lui un peu de cette lumière. Il ne mêle à elle rien de son essence propre, ni couleur comme le ferait l'or ou le cuivre, ni opacité comme le ferait le plomb ou l'antimoine. Un regard jeté vers un miroir d'argent ne montre qu'une image pure. L'argent lui-même se retire totalement derrière ce reflet. Les miroirs actuels sont presque exclusivement de verre recouvert d'une mince couche d'argent.

Lorsqu'on laisse se former progressivement de telles couches réfléchissantes, par exemple lorsque l'on fait passer de la vapeur d'argent dans un tube de quartz, les parois se recouvrent d'un mince revêtement de buée transparente dans lequel apparaissent des couleurs radieuses : tout d'abord, un rouge-rose, puis un rouge-violet, un violet-bleu et finalement un merveilleux bleu.

Que l'on regarde, à travers un prisme, une fine bande noire sur un fond blanc. L'obscurité va se dissoudre en couleurs dans la lumière : du pourpre sur les bordures, puis là où l'obscurité rayonne dans la clarté, ce pourpre passe progressivement au violet et au bleu. On peut constater que là où la lumière entre en interaction avec une matière d'argent, la plus fine possible, il apparaît d'abord du pourpre. En se densifiant peu à peu, la coloration passe au bleu, révélant ainsi progressivement la force d'obscurité de la matière. Pour terminer, la couche métallique devient opaque et commence à réfléchir.

I.10.2 La sensibilité du métal à la lumière

Malgré sa nature noble, l'argent se laisse facilement dissoudre par les acides. Les sels d'argent se montrant alors présentent une certaine analogie, en certaines de leurs propriétés, avec les sels des métaux alcalins dont nous reparlerons plus tard. Ce phénomène pourrait faire dénommer l'argent un "métal alcalin devenu noble".

Sous cette forme de sels, il ne lie de rapports qu'avec l'obscurité ; la lumière lui donne immédiatement la tendance à l'état métallique.

Les bases de la photographie reposent sur cette extraordinaire sensibilité à la lumière. Ce sont avant tout le chlorure : le bromure et l'iodure d'argent qui possèdent cette sensibilité à l'élément lumière. Mais ils ne ressemblent pas aux combinaisons alcalines citées plus haut. Par exemple, inversement au chlorure de sodium, au sel gemme, le chlorure d'argent est une substance insoluble, n'apparaissant pas dans la nature sous forme de minéral cristallisé, mais de substance cornée. C'est la cérargyrite.

I.10.3 La sensibilité du métal à la couleur

Si l'on expose le chlorure d'argent, que l'on a fait apparaître en minces couches sur une plaque d'argent, à des lumières différemment colorées, il se montre réceptif à cette coloration. Il devient rouge sous une lumière rouge, vert sous une lumière verte, ...etc. Il passe, en même temps, d'un état salique à une fine dilution colloïdale.

Il possède ainsi la capacité d'être un reflet parfait des subtiles interactivités de la lumière et de l'obscurité dont les couleurs sont l'expression. Malheureusement, ce phénomène est très fugitif et ne peut être fixé, ne pouvant ainsi servir à la photographie en couleur.

I.10.4 L'argent et la chaleur

Parmi tous les métaux, l'argent s'avère être le meilleur conducteur de la chaleur. Dans des récipients métalliques exposés à la même température, l'eau arrive à ébullition en premier dans celui en argent, ensuite dans celui en cuivre, puis en or. Finalement dans ceux en fer, étain et plomb. L'argent laisse passer le plus librement la chaleur parce qu'il renonce à en accaparer pour lui-même. C'est lorsqu'elle est conduite par l'argent que la chaleur se propage le plus vite. Une barre de plomb peut fondre à une extrémité alors que l'autre est encore froide. Il tolère aisément en lui des différences de température pas l'argent. Lorsqu'une partie d'une masse d'argent est portée à une certaine température, celle-ci se propage instantanément dans toute la masse.

I.10.5 L'argent et l'électricité

L'argent est également le meilleur conducteur du courant électrique. Il est donc apparenté aux bons conducteurs : or et cuivre, alors que le fer, l'étain et le plomb sont mauvais conducteurs. A travers un fil d'argent, les polarités de la tension électrique, phénomène originel de l'électricité, s'équilibrent le plus rapidement.

Et, par suite, s'évanouissent le plus vite. La plupart des métaux deviennent très conductibles à des températures très basses. L'argent se comporte déjà comme "intérieurement froid" à des températures ordinaires.

I.10.6 L'argent et les forces mécaniques

Vis-à-vis des influences mécaniques du monde extérieur, notre métal se révèle très mou, extensible et modelable. On peut en faire les fils les Plus minces. Il n'est dépassé en sa force de cohésion interne (1 g d'argent se laisse étendre en un fil de 2 km) que par l'or. Il renonce à tendre à une forme individuelle puissante, à la dureté ou la rigidité, comme les métaux pailleux, cassants, tels que l'antimoine, qui inclinent à la cristallisation dans leur tessiture. Le métal pur présente beaucoup plus fréquemment des aspects végétaux que des structures cristallines. L'extraordinaire malléabilité fluide du métal lui permet de donner forme, dans l'état solide, à des structures très opposées à cet état et de présenter ainsi une métamorphose des forces régnant dans l'état liquide de la matière.

Comme l'indique son point de fusion relativement bas, l'argent abandonne très facilement l'état solide. Il est également assez volatil. Mais lorsqu'il est, par un courant électrique, amené de l'état de solution saline à l'état métallique, il forme des cristaux aux formes très riches. Cependant, dans ce cas, sa structure trahit les forces formatrices créées par l'électricité.

Malgré cette mollesse, cette malléabilité, la tessiture de l'argent reste d'une grande pureté intérieure. Elle conditionne sa résonance limpide. Des flûtes, des cloches d'argent émettent un son pur et clair. Ce phénomène est particulièrement étrange car des métaux mous, comme par exemple le plomb sont peu sonores. Il faut les amener à température très basse et les solidifier pour qu'ils puissent atteindre une certaine capacité de résonance. L'argent ne retient pas le son mais le laisse retentir en lui sans le modifier par sa nature propre. Dans la matière tendre de l'argent, une force se dresse, révélant comme l'essence du froid et la puissance de la forme. Ceci est une mystérieuse contradiction.

I.11 Caractéristiques physico-chimique de l'argent

L'argent a des propriétés très spécifiques, liées à sa conductivité élevée de l'électricité et de la chaleur, à son pouvoir réflecteur et au faible ou nulle solubilité de ses sels.

I.11.1 Propriétés physiques

L'argent cristallise dans le système cubique. Sa maille élémentaire est le cube à faces centrées dont le paramètre cristallin est 0,407 nm.

La masse volumique est de $10,5 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ à la température ambiante. Les températures de fusion et de vaporisation sont respectivement de 961,9 et de 2 212 °C.

L'argent est, de tous les éléments, le meilleur conducteur de la chaleur ; sa conductivité thermique étant de $420 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Il est aussi le meilleur conducteur de l'électricité ; sa résistivité est de $1,59 \mu\Omega \cdot \text{cm}$.

L'argent poli a un pouvoir réflecteur très élevé dans l'infrarouge. Cette propriété est mise à profit dans la fabrication des miroirs des télescopes. Son pouvoir émissif est très faible.

L'argent est un métal relativement mou, de dureté comprise entre 2,5 et 3 dans l'échelle de Mohs. L'addition de petites quantités de cuivre l'augmente sensiblement.

Parmi tous les métaux, l'argent est celui qui peut dissoudre le plus d'oxygène lorsqu'il est à l'état fondu. Lorsqu'il se solidifie, il libère l'oxygène dissous. C'est le phénomène de rochage que l'on peut éviter par l'emploi de désoxydants.

I.11.2 Les propriétés chimiques de l'argent

Dans le tableau de MENDELEIEV, l'argent apparaît au même niveau que les métaux alcalins. Il présente avec eux plus d'analogies que les autres métaux lourds. Il est également monovalent sur le plan chimique. La plupart de ses sels se cristallisent selon la même structure et forment des cristaux combinés. L'hydroxyde d'argent est une base forte, très alcaline comme la base de sodium ou l'hydroxyde de potassium.

Les métaux alcalins ont la capacité de former des sels. Le chlorure de sodium est le simple sel de cuisine. Son lieu d'origine est dans la mer qui contient également la plus grande quantité d'argent. Cependant, le sodium en tant que métal est formé artificiellement à partir du sel de cuisine. Son état métallique est très fugitif, il incline de toute sa force vers l'état de sel. L'argent trouve dans sa forme métallique son essence véritable.

L'argent développe une relation très curieuse avec l'élément de l'air. De l'argent fondu absorbe avidement l'oxygène de l'air, jusqu'à vingt fois son propre volume. Sous sa forme fluide, il vit à l'unisson avec l'air. Dès qu'il passe à l'état solide, il perd soudain cette possibilité d'absorption et expulse l'oxygène avec violence. Par ce phénomène, la surface lisse et réfléchissante à l'état liquide se fige en des sortes de cratères lunaires provoqués par les bulles de gaz s'échappant au moment de la solidification.

En tant que métal figé, l'argent demeure noble tant vis-à-vis de l'eau que de l'air. Il garderait constamment son splendide poli et sa force réfléchissante sans son extrême sensibilité à l'égard du soufre dont les moindres traces troublent son éclat, le brunissent, le noircissent. En considérant les minerais d'argent, nous avons déjà appris à connaître cette relation de l'argent avec le soufre.

I.12 L'argent et le domaine du vivant

Les particularités d'une substance se révèlent dans son comportement vis-à-vis de son environnement. Au cours de ces échanges, deux facultés principales ressortent

- le pouvoir de rayonner dans le monde ambiant et de le modifier selon son essence propre, effet qui diminue avec la distance. En elle, se révèle la nature d'une substance. Le monde minéral mort exprime de telles facultés.

- la capacité d'une substance de se laisser attaquer par le monde ambiant. Dans ces propriétés, elle se lie à lui en une totalité que l'on peut appeler, au sens large, le Cosmos. De telles particularités expriment le rôle que peut jouer une substance dans les rapports vitaux.

Les effets thérapeutiques, en particulier, ne peuvent s'appuyer que sur la capacité d'une substance à se laisser saisir par la totalité de l'organisme humain. Est important non ce qu'une substance est par elle-même, mais ce que l'organisme peut en faire.

Par quels phénomènes l'argent se révèle-t-il dans les rapports vitaux ? Ses activités sont à l'unisson avec les processus édificateurs. L'argent se montre peu toxique vis-à-vis d'une vie très organisée. A petites doses, il n'est pas susceptible de provoquer des intoxications chroniques. On peut, sans risque, porter un bijou d'argent sur la peau, ce qui n'est pas le cas du plomb. Seule la basse vie parasitaire, à l'aise dans le manque de lumière, des bactéries pathogènes trouve dans l'argent une force ennemie. On peut tuer les germes par simple contact avec de l'eau potable contenant de l'argent finement dilué. Par contre, on peut sans risque introduire des fils ou des plaques d'argent à l'intérieur du corps comme il est d'usage en chirurgie. [13]

I.13 Utilisations et consommation de l'argent

Le tableau I.2 [14] présente les principaux domaines d'utilisation et de consommation de l'argent en industrie.

Tableau I.2 : Utilisations et consommation de l'argent en industrie.

UTILISATIONS ET CONSOMMATION	
1- Principaux utilisations dans le Monde (2016)	<ul style="list-style-type: none"> - Electrique et électronique 23%. - Joaillerie 20%. - Pièces et lingots 20%. - Photovoltaïque 8%. - Argenterie 5%. - Brasures et soudures 5%. - Photographie 4%. - Catalyseur pour oxyde d'éthylène 1% - Autres applications industrielles (biocides, miroirs, rayons-X, nanotechnologies etc.) 14%.
2- Principaux utilisations en Europe (2016)	<ul style="list-style-type: none"> - Applications industrielles (dont électrique et électronique, brasures et soudures, photographie, oxyde d'éthylène etc.) 57%. - Joaillerie 20%. - Pièces et lingots 17%. - Argenterie 6%.
3- Principales applications dans les domaines de haute technologie	<ul style="list-style-type: none"> - Brasures et soudures dans de nombreux domaines. - rayons-X, imagerie médicale.
4- Applications dans le domaine de l'énergie	Contacts métalliques dans les cellules photovoltaïques ; piles oxyde d'argent ; batteries zinc-argent.
5- Consommation	31 968 t en 2016.
6- Perspectives d'évolution de la consommation mondiale	Malgré la chute de la demande de 11% en 2016 par rapport à 2015, la consommation devrait à moyen-long terme être soutenue par la croissance forte du photovoltaïque puis celle des piles et batteries contenant de l'argent. Ces secteurs semblent en mesure de compenser la perte de vitesse de la photographie argentique et des fluctuations des investissements (pièces, lingots, bijouterie etc.) qui sont tributaires des prix.

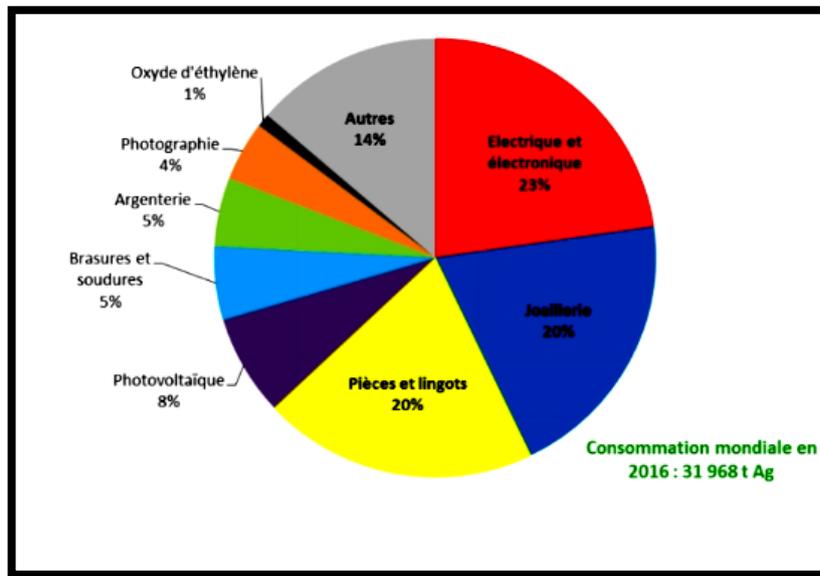


Figure I.7 : Consommation mondiale d'argent par utilisation en 2016.

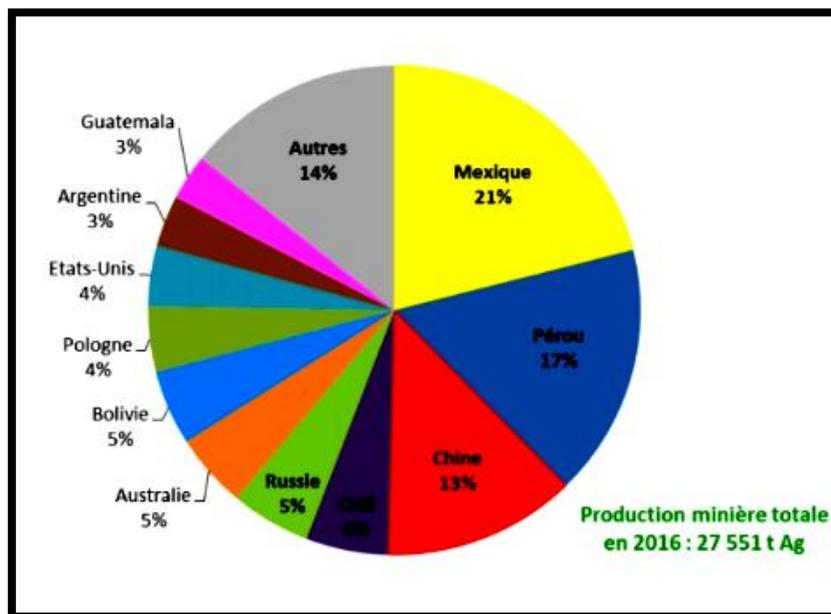


Figure I.8 : Répartition de la production minière d'argent mondiale en 2016.

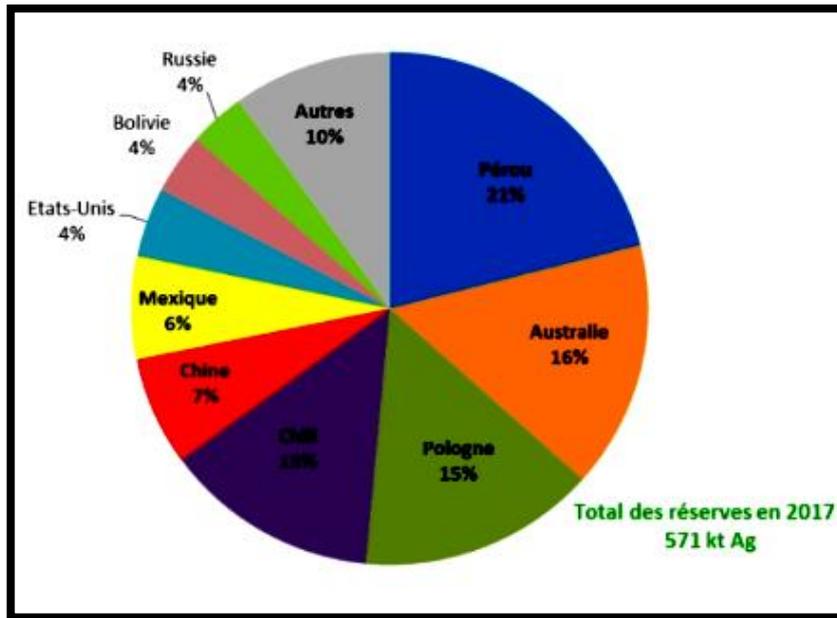


Figure I.9 : Répartition réserves minières mondiales d'argent en 2016.

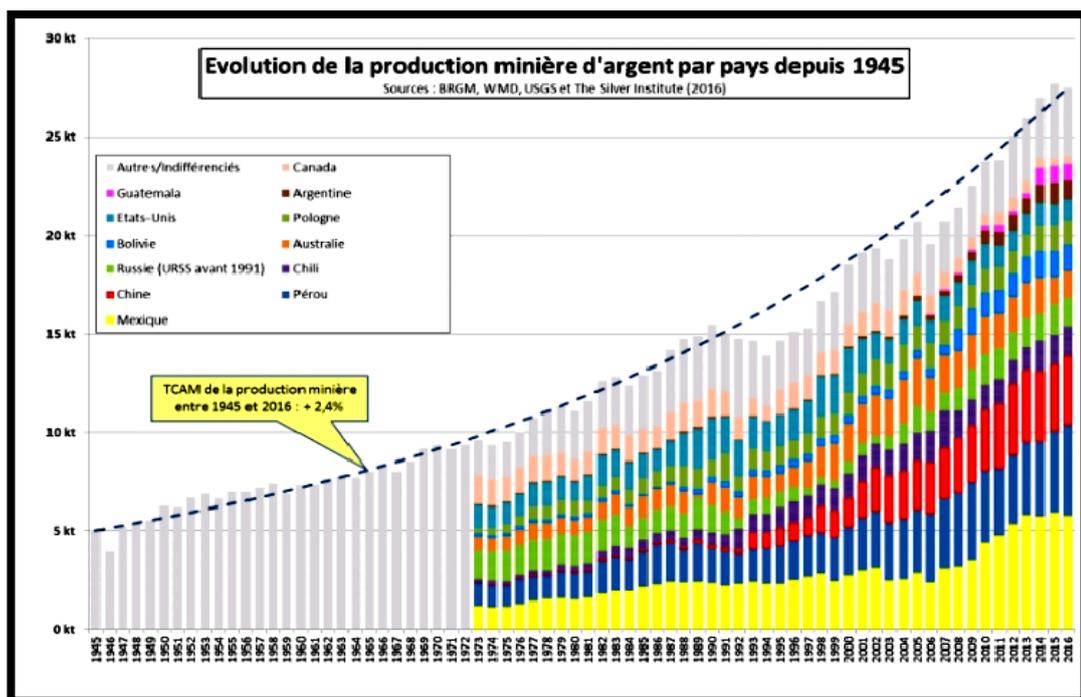


Figure I.10 : Evolution de la production minière d'argent par pays depuis 1995.

I.14 Substituabilité, recyclage et Prix de l'Argent

Le tableau I.3 [15] présente le potentiel de substitution dans les principaux usages.

Tableau I.3 : Substituabilité de l'argent

SUBSTITUABILITE	
- Potentiel de substitution dans les principaux usages	<ul style="list-style-type: none"> - Miroirs : aluminium et rhodium. - Piles et batteries : autres technologies (Li-ion, Plomb-acide, NiMH etc.). - Joaillerie et argenterie : l'argent n'est pas indispensable et sa demande dépend des goûts des consommateurs, de la mode et du prix. Il peut être remplacé par de l'acier inoxydable ou d'autres métaux précieux. - Photographie : technologies numériques. - Photovoltaïque : les cellules à couches minces utilisent une quantité plus faible d'argent.

Le tableau I.4 [16] présente le Taux de recyclage.

Tableau I.4 : Le taux de recyclage

RECYCLAGE	
Taux de recyclage	<p>Globalement, le PNUE estimait en 2011 le taux de recyclage en fin de vie (EOL-RR) de l'argent, sous toutes ses formes, à 30-50 %, et le contenu de la consommation en argent secondaire (RC) à 20-32% selon les auteurs.</p> <p>Répartition du recyclage par secteur en 2014 :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Applications industrielles (sauf photographie) : 51% (dont la moitié pour le recyclage des catalyseurs pour l'oxyde d'éthylène). - Argenterie : 18% - Photographie : 16% - Joaillerie : 11% - Pièces : 4%

Le tableau I.5 [17] présente l'établissement des prix.

Tableau I.5 : Les Prix

PRIX	
1- Etablissement des prix	L'argent est coté quotidiennement sur diverses places financières, en particulier le London Bullion Market Association (LBMA). Les contrats sont eux échangés sur de nombreuses bourses d'échanges (COMEX, SHFE, SGE, MCX etc.).
2- Prix moyen en 2017 (janv. à août 2017)	17,12 US\$/oz / 500 €/kg (1 oz = 31.10348 g)
3- Ecart-type relatif des prix sur 1 an (sept. 2016 - août 2017)	+/- 5,4%
4- Evolution du prix sur 1 an (moyenne sept. 2016 - août 2017/moyenne sept. 2015 - août 2016)	+ 7,4%
5- Evolution du prix depuis 2002-2003 (moyenne sept. 2016 - août 2017 / moyenne sur 2 ans 2002-2003)	+ 266%
6- Ordre de grandeur de la valeur de marché de la production métallurgique annuelle	15 G US\$ 27 551 t soit 885 785 koz (production minière 2016) x 17,12 US\$/oz



Figure I.11 : Cours de l'argent en US\$/OZ.

I.15 Applications industrielles de l'argent et de ses sels

La ductilité, la conductivité et la malléabilité sont les qualités physiques de l'argent de plus en plus sollicitées avec la miniaturisation de l'électronique. Les principaux usages de l'argent concernent :

- l'électronique en tant que conducteur (téléphones mobiles, ordinateurs, équipements électroniques, cellules solaires, etc.) ;
- les usages bactéricides (nanotechnologies, industrie du textile, pansements, produits à usages médicaux, purificateurs d'eau, etc.) ;
- l'équipement chimique, car il résiste particulièrement bien à l'action des bases, des sels alcalins et de beaucoup d'acides minéraux ;
- la fabrication de miroirs par évaporation thermique ;
- son rôle de catalyseur dans un certain nombre de réactions dont la plus importante est la combustion du monoxyde de carbone.

Dans les alliages d'argent, par addition d'un métal étranger, on cherche à remédier aux deux défauts principaux de l'argent : le manque de dureté et la réactivité vis-à-vis du soufre et des sulfures.

L'accroissement de la résistance mécanique est généralement obtenu par addition de cuivre. Les principaux alliages sont les alliages d'orfèvrerie à 7,5 p.100 et 10 p. 100 de cuivre. Ils sont également utilisés dans l'industrie électrique, car la conductivité de l'argent est peu altérée. L'accroissement de la résistance vis-à-vis du soufre et des sulfures est obtenu par addition de cadmium, de zinc ou d'antimoine, mais la couleur de l'argent est presque toujours altérée.

Les alliages ternaires, notamment argent-cuivre-zinc, sont utilisés pour la brasure et leur importance ne cesse de croître, car leur emploi est très général. Les alliages avec l'or et les métaux précieux (palladium, platine) sont employés en orfèvrerie et dans l'art dentaire. Enfin, il existe de très nombreux pseudo-alliages (cermets) avec des composés minéraux. [18]

I.15.1 Argent dans les catalyseurs

Les chances de posséder une abondance d'articles qui doivent leur fabrication aux propriétés uniques des catalyseurs en argent sont grandes.

Un catalyseur est une substance qui facilite un processus chimique sans subir lui-même une transformation. En raison de ses propriétés chimiques uniques, l'argent est un catalyseur important dans la production de deux produits chimiques industriels majeurs. Puisque l'argent n'est pas affecté par la réaction

chimique, il recouvre presque totalement son état de base après une transformation.

Plus de 150 millions d'onces d'argent sont employées tous les ans pour produire l'oxyde d'éthylène et le formaldéhyde, qui sont les éléments essentiels du plastique. Approximativement 90% de l'argent utilisé comme catalyseur industriel est employé pour la production de l'oxyde d'éthylène à partir d'éthylène. L'oxyde d'éthylène est la base pour des plastiques comprenant le polyester, le textile utilisé dans le milieu de la mode et l'habillement spécialisé.

Cette même substance est utilisée comme ingrédient dans les articles moulés comme les poignées isolantes pour des fourneaux, des composants pour les ordinateurs, les boutons de commande électriques, les composants d'appareil ménager, et les logements des prises électriques. Environ 25% de la production d'oxyde d'éthylène est employé pour produire le liquide réfrigérant antigel pour les automobiles et autres véhicules.

Le formaldéhyde, un produit chimique produit à partir du méthanol, est l'élément constitutif des plastiques solides comme par exemple les adhésifs, stratifiant des résines pour la construction des contre-plaqués et les panneaux de particules. Le formaldéhyde aide également dans la production des finitions pour le papier et le matériel électronique, textiles, les enduits extérieurs qui résistent à la chaleur et les éraflures, la vaisselle et les boutons, les boîtiers des appareils, les poignées, les matériaux d'emballage, les pièces des véhicules à moteur, les matériaux d'isolation thermiques et électriques, les jouets et beaucoup d'autres produits.[19]

I.15.2 La demande d'argent dans le photovoltaïque

L'énergie solaire a le vent en poupe aux 4 coins du monde. Ce qui est positif pour la demande d'argent métal, vu qu'il est indispensable pour la fabrication des panneaux solaires. Dans le rapport 2017 concernant les énergies renouvelables du REN21, nous pouvons constater que l'utilisation des panneaux photovoltaïques augmente de façon exponentielle Figure I.12.

Le rapport indique que le photovoltaïque est le mode de production d'électricité qui a le plus contribué à l'augmentation de la capacité de production électrique mondiale en 2016, devant les énergies fossiles. L'année dernière, on a installé en moyenne 31 000 panneaux solaires chaque heure. 17 pays sont désormais capables de produire au moins 2 % de leurs besoins en électricité avec des panneaux solaires, certains beaucoup plus. 2016 est également l'année de la baisse drastique des prix de cette technologie, notamment des modules.

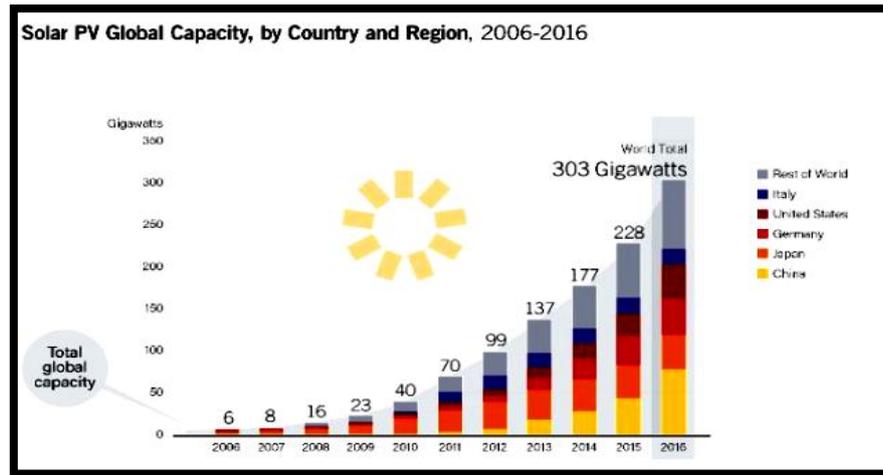


Figure I.12 : Globale Solaire PV, par pays et région (2006-2016).

La demande d'argent métal engendrée par cette explosion de la fabrication des panneaux solaires est néanmoins minorée par les progrès technologiques réalisés dans ce secteur : pour fabriquer une cellule photovoltaïque générant 4 W d'électricité, le secteur utilisait 0,3 g d'argent en 2010, et seulement 0,17 g en 2014. Il n'empêche que, globalement, l'augmentation de la demande photovoltaïque dépasse actuellement largement les avancées technologiques qui ont permis de réduire la quantité d'argent métal nécessaire pour fabriquer les panneaux. Si la tendance se poursuit, en conjonction avec la stagnation ou la baisse légère de la production d'argent, les effets sur les cours devront inévitablement se manifester. [20]

I.16 L'extraction de l'or et de l'argent avec les biomatériaux

I.16.1 Extraire de l'or naturellement avec des plantes

Face à la dangerosité des méthodes d'extraction de l'or par le mercure, le cyanure ou autres métaux et les populations. L'industrie minière doit s'activer et mettre en place des solutions moins polluantes avec des méthodes plus écologiques pour l'environnement. On est conscient que l'or est un secteur qui rapporte beaucoup d'argent. Mais il est de leur devoir de prendre soin de la planète et protéger les habitants et notre environnement. De nombreuses chercheurs travaillent sur des solutions alternatives plus écologiques pour extraire l'or du sol. **L'agromine et la phitoextraction :** L'agromine est en émergence. C'est la capacité qu'ont certaines plantes d'accumuler dans leurs tissus de fortes concentrations de minéraux sans s'intoxiquer. Ce sont des « hyperaccumulatrices ». Cette particularité permet de les utiliser pour décontaminer des terrains miniers et des carrières, pour extraire des métaux

lourds ou pour pratiquer une nouvelle forme d'agriculture sur des sols riches en métaux.

Certains scientifiques proposent de faire du phytomining. C'est une technique d'extraction de phytoextraction de l'or à travers les plantes. Ils ont remarqué que certaines plantes naturelles utilisent leurs racines pour extraire les métaux lourds du sol ou de l'air. Les métaux tels que le zinc, nickel, cadmium ou l'or se retrouvent dans leurs racines et leurs feuilles. Pendant longtemps, les scientifiques ont étudié ces plantes hyperaccumulateurs pour lutter contre la pollution.

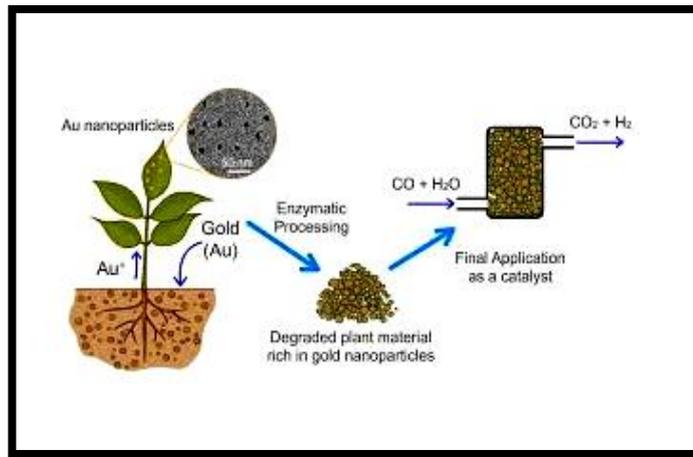


Figure I.13 : L'agromine et la phytoextraction.

La moutarde : Chris Anderson, un géochimiste de l'environnement et expert en phytomining d'or, à l'Université Massey en Nouvelle-Zélande, a démontré qu'il était possible d'obtenir des plantes de moutarde pour aspirer l'or des sols.

Pour Anderson, il faut trouver une plante à croissance rapide avec beaucoup de verdure hors-sol, comme la moutarde, le tournesol, ou le tabac. Ensuite, il faut les planter dans le sol où il y a de l'or. Lorsque la plante transpire, il prend l'eau de l'or du sol, qui s'accumule dans sa biomasse, se pose sur les minuscules pores de ces feuilles. Puis, on récolte les plantes. Anderson dit qu'obtenir l'or des plantes est la partie la plus facile. L'or dans les plantes est des nanoparticules d'or, qui peuvent être un grand potentiel pour l'industrie chimique, car il est utilisé comme catalyseurs pour des réactions chimiques.

L'utilisation du phytomining, de l'or ne pourra jamais prendre la place de l'exploitation minière artisanale. Il explique : « la valeur de celui-ci est dans la remise en état des sites miniers pollués », a-t-il ajouté. « Si nous pouvons générer des revenus par le recadrage de l'or, tandis que l'assainissement des sols, alors c'est un bon résultat », a déclaré Anderson, qui travaille actuellement avec des

chercheurs de l'Indonésie pour développer un système durable pour les mineurs artisanaux d'or à petite échelle. [21]

I.16.2 Les nanotechnologies

Les nanotechnologies sont en train de devenir un domaine en pleine expansion, avec leurs applications scientifiques et technologiques pour la fabrication de nouveaux matériaux à l'échelle nanométrique. Récemment, des méthodes de biosynthèse faisant appel soit à des micro-organismes biologiques tels que des bactéries et des champignons, soit à des extraits de plantes, sont apparues comme une alternative simple et viable aux procédures synthétiques chimiques plus complexes pour obtenir des nanomatériaux.

Différents types de nanomatériaux tels que le cuivre, le zinc, le titane, le magnésium, l'or, l'alginate et l'argent ont fait leur apparition, mais ce sont les nanoparticules d'argent qui se sont avérées les plus efficaces car elles ont une bonne efficacité antimicrobienne contre les bactéries, les virus et autres micro-organismes eucaryotes. Parmi celles-ci, les nanoparticules d'argent jouent un rôle majeur dans le domaine des nanotechnologies et de la nanomédecine.

L'argent colloïdal présente un intérêt particulier en raison de ses propriétés distinctives, telles que sa bonne conductivité, sa stabilité chimique et ses activités catalytiques et antibactériennes). Une branche importante de la biosynthèse des nanoparticules est l'application d'un extrait de plante à la réaction de biosynthèse. Synthèse de nanoparticules d'argent quasi sphériques à l'aide d'un composé d'apiine purifié, extrait de la feuille de henné dans des conditions ambiantes. En utilisant le thé vert, l'extrait de *Camellia sinensis* comme agent réducteur et stabilisateur a produit des nanoparticules d'or et des nanostructures d'argent en solution aqueuse dans des conditions ambiantes. Des extraits végétaux de luzerne vivante, les bouillons de citronnelle, les feuilles de géranium et d'autres ont servi de réactifs verts dans la synthèse de l'Ag NP. La réaction de l'AgNO₃ aqueux avec un extrait aqueux de feuilles d'un géranium ornemental commun, *Pelargonium graveolens*, a donné des Ag NP après 24 h. Un légume, a également été utilisé pour synthétiser les Ag NP. Des études font la synthèse facile de nanoparticules d'argent par une procédure respectueuse de l'environnement impliquant la réduction in situ de l'Ag par des extraits de plantes. [22]

I.17 Conclusion

Sur la base de tous ces concepts et explications sur l'or et l'argent, nous passons au deuxième chapitre de notre travail appelé Présentation d'entreprise (AGENOR).

Chapitre II

Processus industriel de l'affinage de l'or et l'argent

CHAPITRE II

PROCESSUS INDUSTRIEL DE L’AFFINAGE DE L’OR ET L’ARGENT

II.1 Introduction

Sur le plan économique, l'or et l'argent sont généralement considérés comme valeur refuge lors des périodes de crise. En effet, ils peuvent être une véritable assurance en cas d'instabilité financière. Même que par le passé, un métal lourd est une protection utile contre l'inflation. Sa valeur en tant que couverture contre l'inflation, sa corrélation faible en comparaison des autres catégories d'actifs fait que l'or peut apparaître comme un placement sûr pour une petite partie du portefeuille d'un investisseur. En un mot, l'or et l'argent jouent un rôle non négligeable dans la vie économique d'une nation. Et c'est le cas de tous les autres métaux précieux tels que l'argent. [23]

L’Algérie est classée en troisième position parmi les pays arabes, après l’Arabie Saoudite et le Liban avec une réserve de 173,6 tonnes qui se situe généralement au sud du pays [24]. L’extraction de minerai d’or se fait actuellement à Tamanrasset par l’ENOR qui produit des quantités de matière brute riche en or et en argent sous forme de bullions d’or. Ces derniers se sont transportés vers AGENOR où se fait la purification ou l’affinage d’or et de l’argent.

II.2 Présentation de l'entreprise

L'Agence Nationale pour la transformation et la distribution de l'Or et des autres métaux précieux, par abréviation AGENOR, a été créée par l'Ordonnance n°70-06 du 16 janvier 1970, pour prendre en charge, à titre exclusif, les importations et la distribution sur le marché national des métaux précieux (or/argent) et exercer le monopole de l’État dans ces domaines.

II.2.1 Historique de l'entreprise

Jusqu'à la restructuration, AGENOR a été placée sous la tutelle du Ministère des finances, ayant pour but l'importation et la distribution des métaux précieux.

En application- des dispositions de la loi n°88-01 du 12 janvier 1988 portant la loi d'orientation sur les entreprises Publiques Economiques, AGENOR a été érigée le 1 er février 1989, en entreprise Publique économique dotée de statut SPA

et d'un capital de 500 000 DA qui a été porté en 1993 à 20 000 000 DA puis à 200 000 000 DA, et ce avec un effectif de 121 employés.



FigureII.1 : Localisation géographique AGENOR.

II.2.2 Mission et objectif de l'entreprise

A sa création, AGENOR a comme objectif l'importation des métaux précieux et leurs distributions sur le marché national.

En 1989, la mission d'AGENOR est devenue de plus en plus importante. Elle s'est dirigée vers le raffinage et l'affinage des métaux précieux ainsi que leur distribution sur les marchés nationaux.

II.2.3 Objectifs

- Augmenté la production annuelle en matière de métaux précieux.
- Réduire les déchets ainsi que leurs impacts environnementaux.
- Développement et innovation et le lancement de nouveaux produits des métaux précieux, tout en mettant l'accent sur la qualité.
- Etre constamment à l'écoute du client et vieller à sa satisfaction. [23]

II.2.4 Organigramme

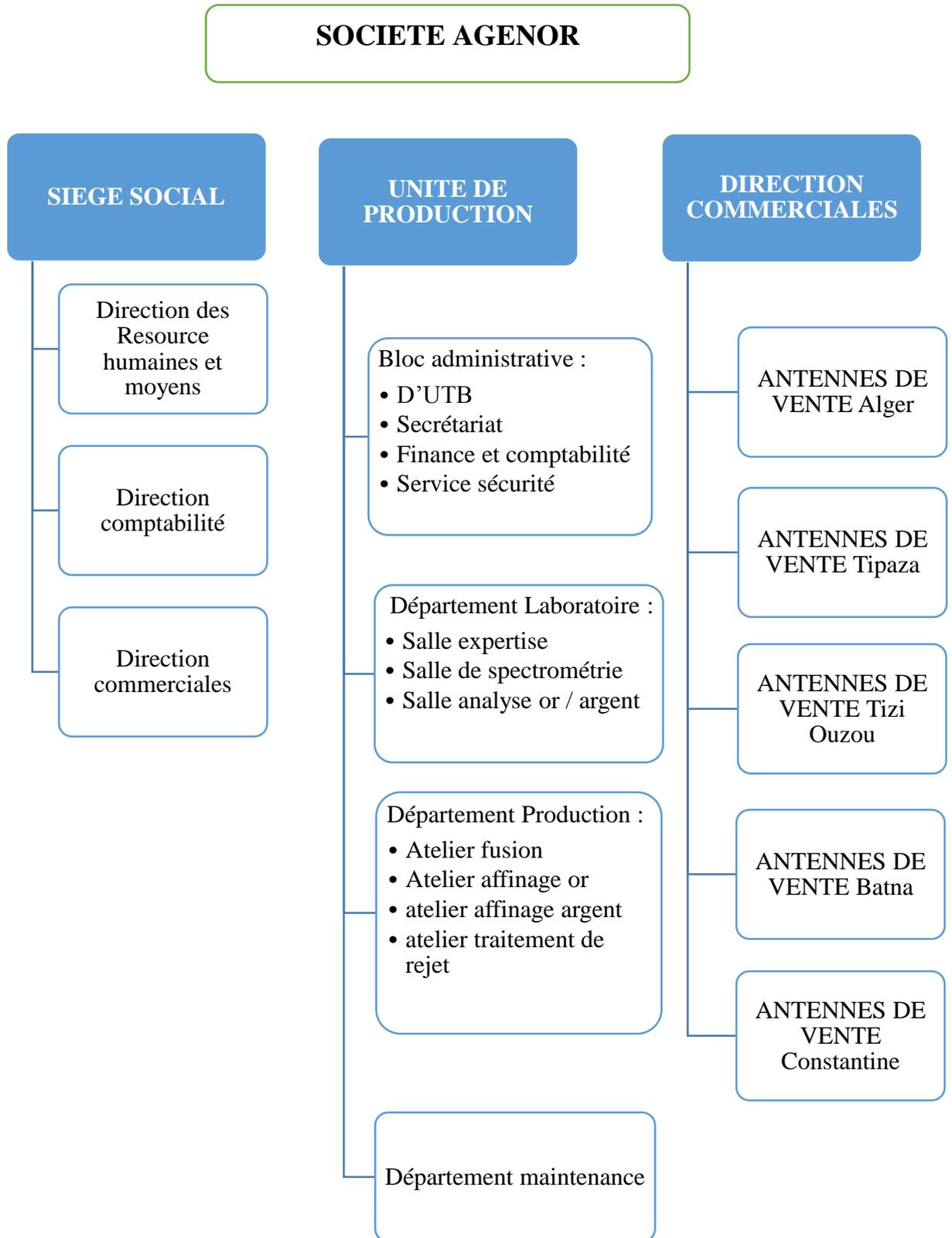


Figure II.2 : Organigramme présente la société AGENOR.

II.3 Ateliers entreprise

II.3.1 Atelier fusion

Plusieurs fours se présentent dans cet atelier qui a pour fonctions principaux la fusion, le grenailage et la mise en forme des métaux précieux et des alliages.



Figure II.3 : Fours à induction.



Figure II.4 : Four a coulée continue.

Les fours précédents se constituent de deux parties principales :

- Partie électrique/électronique : convertisseur de fréquences
- Partie fusion : la partie où le matériau se fond.



Figure II.5 : Les parties principales des fours présidents.

II.3.2 Atelier laminage tréfilage

Au niveau de cet atelier, on s'occupe du laminage et le tréfilage du métal précieux et certains alliages une fois sortie récupérer de l'atelier de fusion ; la production de certains produits de différents formats comme la brasure les fils en argent les planés en or et en argent. Aussi on effectue traitement thermique pour ces métaux, afin de leur donner certaines caractéristiques (couleur, état de surface, ...) et cela selon leurs domaines d'utilisation et selon les exigences.

II.3.3 Atelier traitement déchets

Cet atelier comporte deux station : station traitement des eaux usées et station déminéralisation

- Neutralisation des eaux usée :

On s'occupe des traitements des eaux usées, et l'opération de traitement consiste à régulariser Leur ph. Ce traitement est appelé la neutralisation de l'eau usée.

En effet, durant le processus d'affinage de l'or et l'argent, nous utilisons des acides forts tels que HCL et HNO₃. L'eau se sature en acide et devient plus acide,

ce qui augmente son acidité « PH=1 ». Et selon les normes environnementales le rejet de cette eau directement à la nature présente des risques sur la faune et la flore.

Donc afin de réduire son impact environnemental, AGENOR procède à la neutralisation cette eau. [23]

- Premièrement, filtrage de l'eau et le captage des restes des métaux précieux.
- Deuxièmement, on ajoute la soude « NaOH » qui a pour but de réduire les éléments issus du processus de traitement de l'or brute et aussi pour amener le PH à 7 (eau neutre), et finalement on utilise un filtre presse pour séparer les éléments réduits par le NaOH (cuivre, plomb, zinc...etc.). Et l'eau neutre traitée.

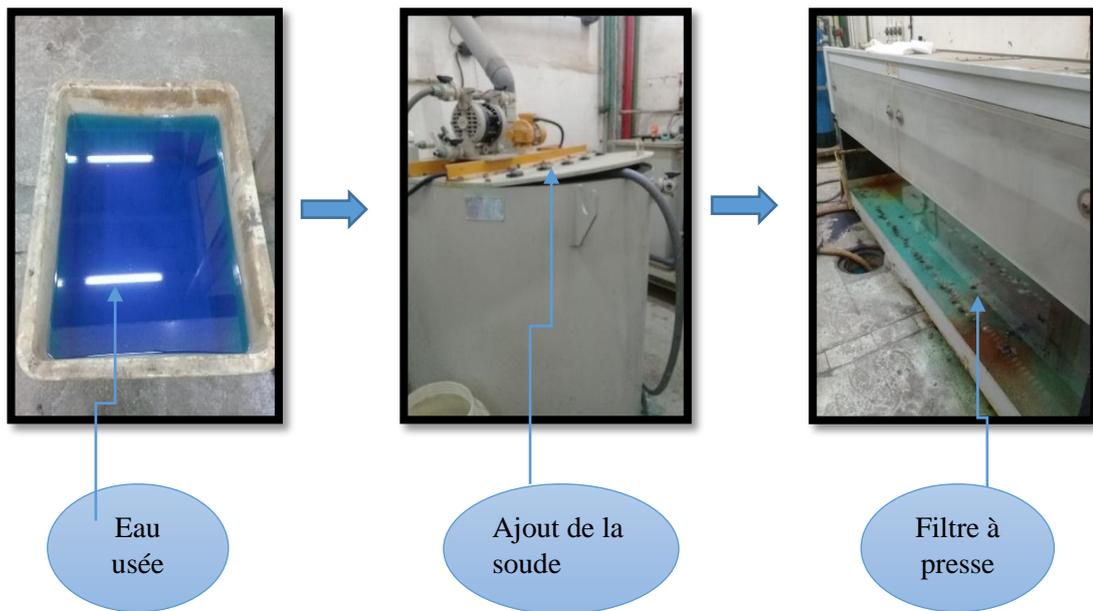


Figure II.6 : Station neutralisation des eaux usée.

- Production eau déminéralisée :

Afin d'assurer un bon fonctionnement des fours et des machines et une longue durée de vie, on utilise de l'eau déminéralisée à la place d'eau courantes (directement du robinet).

Le processus est le suivant :

L'eau courante entre dans la colonne ou on injecte du charbon actif, ensuite cette eau passe dans deux autres colonnes d'injection de résines (capter les cations et les anions présentes dans l'eau courante). [23]



Citerne d'eau
déméralisée.

Sert pour le remplissage
de la citerne installée au
niveau de la toiture.

Injection charbon
actif

Cylindres résines échangeuses
Type cationique forte et
anionique forte avec HCl et
NaOH

Figure II.7 : Station déminéralisation.

II.3.4 Atelier affinage or

Dans Cet atelier se passe l'attaque chimique de l'or brut autrement dis le bullions.

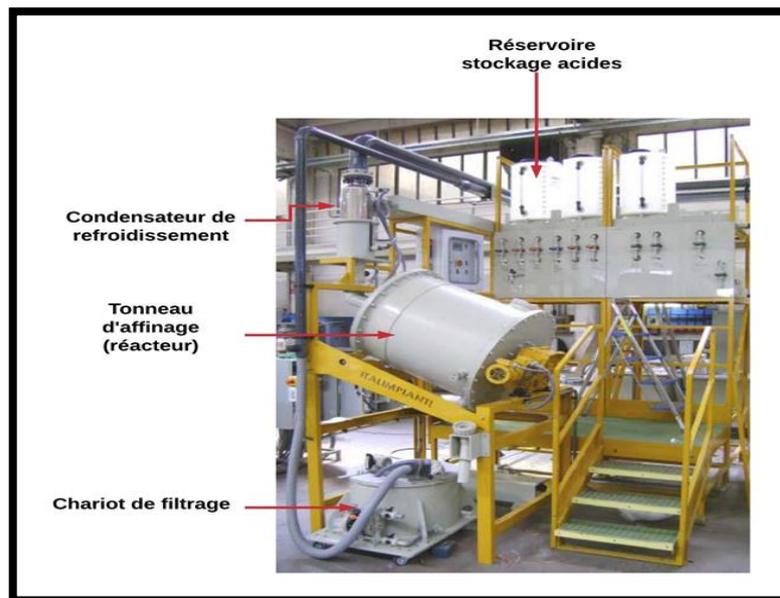
Elle contient plusieurs installations à savoir :

- Le tonneau réacteur : pour l'affinage (réacteur) par l'eau régale.
- Des chariots de filtrage destiné pour la filtration.
- Des cellules de réduction de l'or et d'argent.
- Des tanks/ réservoirs pour les acides et de l'eau déminéralisée.
- Des extracteurs pour l'extractions des fumées.



a

b

Figure II.8 : Chariots de filtrage.**Figure II.9 :** Tonneau réacteur.

II.3.5 Atelier affinage argent

Au niveau de cet atelier se passe le protocole d’affinage d’argent ; dissolution, filtration, cémentation,

II.3.6 Laboratoire

Le laboratoire de l’unité est composé de plusieurs salles comme :

-La salle d’expertise : ou on fait le test de conformité de la teneur des métaux précieux qu'ils élaborent et qu'ils achètent. On fait une analyse primaire en utilisant un scanner laser (XRF) pour définir le pourcentage de : Or, Argent, Cuivre et du Fer. Et une pierre de touche pour connaître la nature des métaux.



Figure II.10 : Appareille d’analyse XRF.

-Salle de spectrométrie : contient la SAA (spectrométrie d’absorption atomique), utilisée afin de déterminer la teneur des métaux précieux en solution, généralement nous faisons l’analyse des rejets afin de confirmer l’absence de l’or et l’argent dans la solution des rejets.

-Salle de pesée : contient une balance posée sur une table antivibratoire pour assurer une bonne mesure.

-Salle d’analyse par coupellation : contient un four de coupellation pour les essais au four, une hotte pour l’attaque chimique, un laminoir et un stock des produits chimiques.

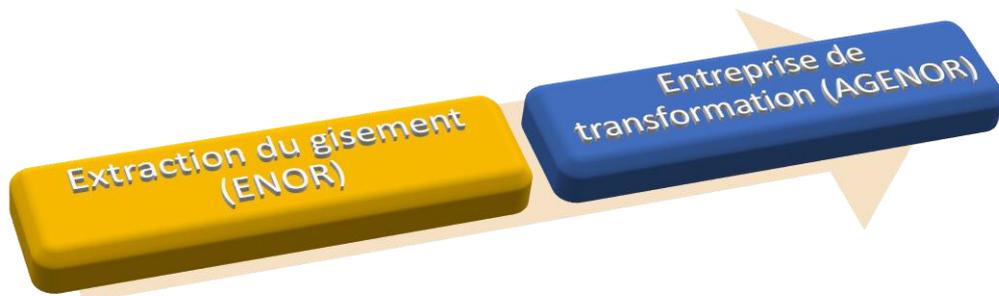
-Service de gestion des stocks : ce service est composé par deux entités :

-La chambre forte : pour le stockage de la matière brute (or et argent) et des produits finis.

-Le magasin : pour le stockage de la pièce de rechange, verrerie, et le consommable.

II.4 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 les 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.



II.4.1 La réception

Cette opération consiste à l’identification des paramètres des bullions : Poids, Teneur en Or, Teneur en Argent.

II.4.1.1 La coupellation

Est un type d’opération métallurgique thermique par oxydation, destinée à isoler les métaux précieux ou en tester leur proportion de cuivre (orfèvrerie ou monnayage). Elle part du postulat que l’or et l’argent ne s’oxydent pas à hautes températures, contrairement au cuivre.

a- Pré-analyse

Lorsqu’on ne connaît pas la composition des échantillons, il convient de procéder à une analyse préliminaire à l’aide de moyens adéquats, par exemple la fluorescence X, pour déterminer la composition approximative du matériau.

b- Préparation, Prise d’essai, chauffe et mesure finale

Le procédé nécessite un creuset en magnésie de chaux, nommé coupelle. La formation de la coupelle par moulage est un processus exigeant, demandant une certaine expérience : la coupelle doit être suffisamment poreuse pour absorber le plomb, mais assez pressée pour ne pas laisser passer la totalité du métal. La coupelle est ensuite chauffée dans un four à température modérée.

L’essayeur prélève sur la pièce à tester deux petits échantillons du métal à

soumettre à l’expérimentation (test destructif). Ces deux échantillons sont pesés, un échantillon est choisi pour être témoin et conservé de côté, l’autre échantillon est placé dans une coupelle.

L’essayeur place dans la coupelle l’échantillon associé au plomb. La quantité de plomb à ajouter est déterminée par des tables officielles.

L’ensemble est placé dans un petit four, sous l’effet de la chaleur, le plomb devient litharge (oxyde de plomb) et est absorbé par la coupelle, entraînant avec lui l’oxyde de cuivre présent dans l’alliage ou le métal à tester.

Seul reste, après la chauffe, le métal pur non oxydable, or, argent ou les deux mêlés. Ce résidu est comparé à l’échantillon témoin par pesée et est alors déterminée par proportionnalité le taux de métal pur dans la pièce, à l’exception de l’or et l’argent lorsqu’ils sont mêlés.

c- Cas de l’argent et de l’or mêlés : l’inquartation

L’or et l’argent sont deux métaux purs, et souvent utilisés en complément : l’argent sert de base à un ouvrage d’or, pour compenser la malléabilité et la ductilité de l’or. Lors d’une coupellation, l’or et l’argent restent mêlés après la fonte et il n’est pas possible de déterminer la proportion de chacun. [25]

d- Attaque chimique

On va laminier le bouton de métal (mêlés) pour augmenter la surface d’attaque et recuit à 700°C.

L’attaque chimique fait par acide nitrique (22°B puis 32°B) pour dissolution argent et reste juste or pur après recuit à température de 700°C.

En fin, on fait la pesé final de l’or pur.

II.4.2 Processus d’affinage de l’or

L’affinage de l’or est une opération qui consiste à la purification de l’or (99,99%) en enlevant l’argent associé et les autres métaux contenus dans le lingot issu de la mine d’or d’Amesmess. Deux méthodes sont largement répandues à l’échelle industrielle pour affiner l’or qui est :

- la méthode chimique : via le processus de Miller, employant l’eau régale.
- La méthode d’électrolyse : via le procédé Wohlwill.

Le procédé utilisé à AGENOR est celui de Miller.

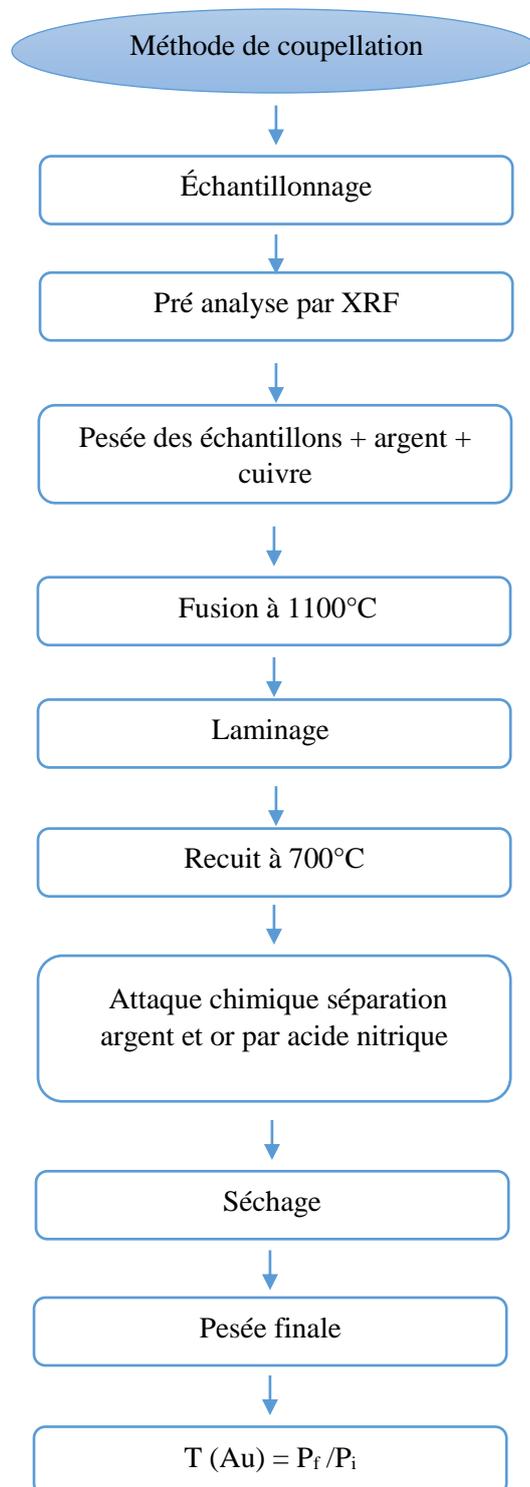


Figure II.11 : Méthode de coupellation lors de l'extraction de l'or.

Durant notre stage, qui a été effectué au niveau d’AGENOR, nous avons pu suivre et participer les différentes étapes du processus d’affinage de l’or, notamment : le grenailage, l’affinage et la fusion.

II.4.2.1 Le grenailage

Le grenailage 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 grenailage 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.



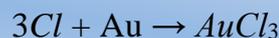
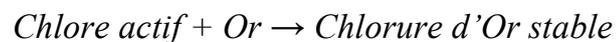
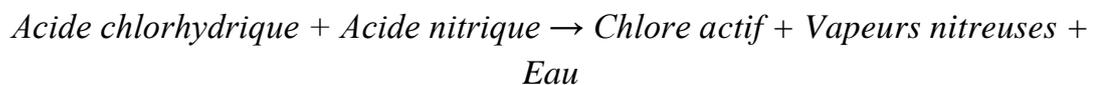
Figure II.12 : Le Grenailage.

II.4.2.2 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 (HNO₃) 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°B) et 1 litre de HNO₃ (acide nitrique à 36°B). 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. 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.

II.4.2.3 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 solution 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 II.13 : Le chariot de filtrage.

II.4.2.4 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_3) 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 ‰ .



Cellule de réduction

Filtrage

Séchage

Figure II.14 : La récupération de l’or.

II.4.2.5 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. [26]



La fusion de la poudre l’or

Versé dans moule

Mise en lingot

Figure II.15 : La fusion et mise en lingot.

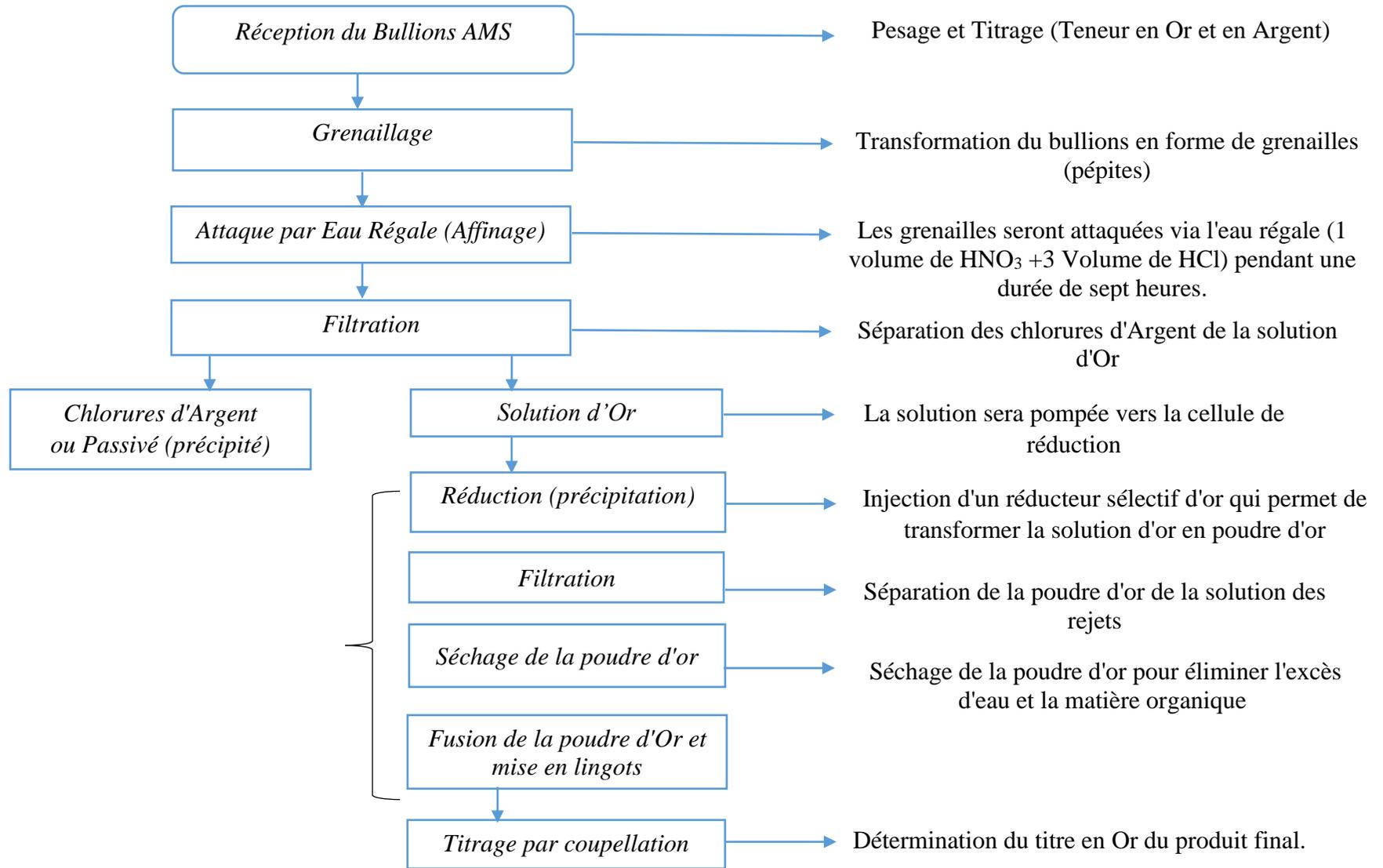


Figure II.16 : Organigramme des différentes étapes du processus d'Affinage de l'Or.

II.5 Affinage de l’argent (Le passivé)

Le passivé est une masse solide d'argent qui ne participe pas à la réaction avec de l'eau régale, et ces grains solides emprisonnent une partie d'Or qu'il faudra récupérer par ce traitement.

Le traitement de ce passivé suit les étapes citées dans l’organigramme ci-dessous :

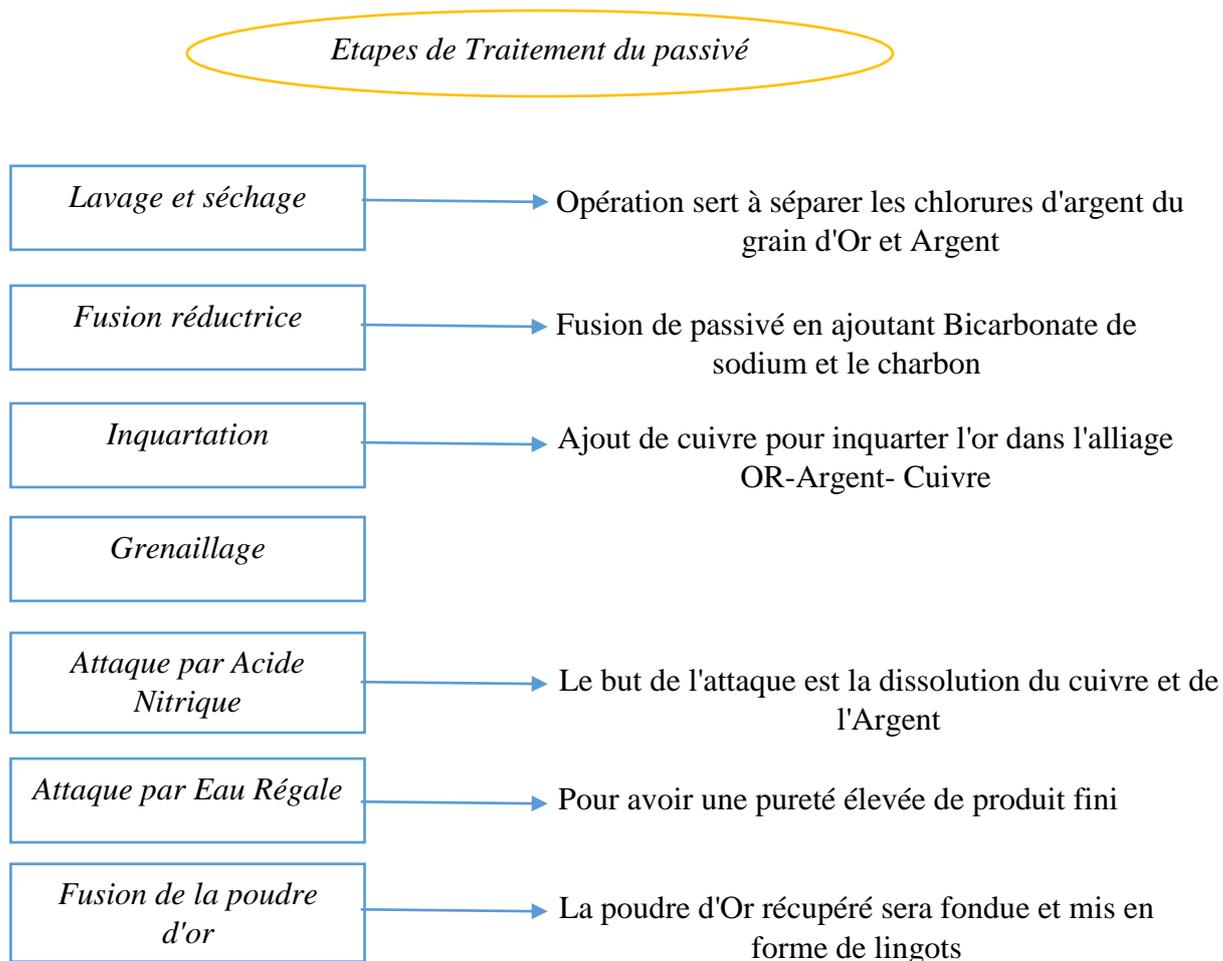


Figure II.17 : Les différentes étapes de Traitement du passivé.

II.6 Conclusion

Nous avons touchés dans ce chapitre les salles et les ateliers de la société AGENOR-Baraki-, avec le rôle et l’objectif important de chacun d’eux dans l’affinage de l’or et l’argent (passivé) dès le début « réception des bullions », jusqu’à la fin « mise en lingot », dans le but d’extraire et de séparer les métaux précieux en les amenant à un très haut degré de pureté. Pour plus de détaille, nous expliquons les processus de traitement de l'or et d'affinage d'argent dans le chapitre ci-après (chapitre III).

Chapitre III

Processus de traitement de l'or et d'affinage d'argent

CHAPITRE III

PROCESSUS DE TRAITEMENT DE L'OR ET D'AFFINAGE D'ARGENT

III.1 Traitement des bullions d'Or

III.1.1 Introduction

Soulignons qu'avant d'être destinés à la vente au profit des artisans et bijouteries en forme de lingot en or fin, l'or a parcouru de nombreuses étapes. De multiples individus, à travers le monde. Se donnent la main pour obtenir quelques grammes de pépites d'or sous des mines. Ils sont exposés de manière permanente à de nombreux dangers pour quelques grammes d'or.

L'exploration de l'or est un processus complexe. Il exige beaucoup de temps, de ressources financières et d'expertise dans plusieurs disciplines, telles que la géographie, géologie, et la chimie, même si la probabilité d'une découverte conduisant à développement de la mine est très faible. En fait seulement environ 10% des dépôts mondiaux d'or contiennent assez d'or a la mine.

Dans le but de suivre le processus d'affinage de l'or et dans le cadre de la préparation d'un mémoire de fin d'étude pour l'obtention d'un diplôme de master en Chimie analytique, nous avons effectué un stage au sein de l'agence nationale pour la transformation et la distribution de l'or et des métaux précieux, AGENOR.

Nous avons suivi et participé aux différentes étapes de l'affinage de l'or et argent depuis la réception à l'état de mélange sous forme de bullions jusqu'à l'état pur c'est à dire jusqu'à avoir de l'or ou argent fin (24 carats).

Ce présent chapitre est consacré à la partie expérimentale en expliquant et commentant chaque étape du processus de pré-affinage et de l'affinage de l'or.

Les différentes étapes adaptées sont comme suit :

- Réception du bullions ;
- Coupellation interne ;
- Grenailage ;
- Attaque chimique ;
- Lavage de la poudre d'or ;
- Séchage de la poudre d'or ;
- Fusion et Mise en lingots ;
- Coupellation normalisée ;
- La dernière étape qui est la commercialisation.

III.1.2 Réception du bullions

Lors de cette étape on procède à l'identification de la matière brute par la pesée et le titrage des bullions reçus.

III.1.2.1 La pesée

A l'aide d'une balance on pèse notre bullions reçu et on note le Poids.

III.1.2.2 Détermination du titre d'or

La méthode utilisé pour le titrage de l'or c'est la coupellation ou les essais au feu.

- **Mode opératoire :**

a- Echantillonnage : le but de cette opération c'est d'avoir un échantillon représentatif de bullions. On perse diagonalement trois trous sur la surface haute et basse du bullions puis on mélange le tout.

b- Pré-analyse : On prend un petit échantillon prélevée du bullions et on le fait passer dans l'X.R.F. On note la teneur en or.

-la valeur obtenue est de $T(\text{Au})=80.5\%$.



Figure III.1 : Analyseur X.R.F.

c- Pesée :

- On pèse trois échantillons du bullions numérotés 1 : 2 et 3. Leurs poids sont notes P_1 : P_2 et P_3 respectivement et sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Le poids des trois échantillons P_1 , P_2 et P_3 , en gramme.

$P_1(\text{g})$	$P_2(\text{g})$	$P_3(\text{g})$
0.25100	0.25110	0.25150

A ces trois échantillons on ajoute une quantité de cuivre de masse $P(\text{Cu}) = 0.04\text{g}$ et une quantité variable d'argent. La masse d'argent ajoutée est calculée en fonction du poids de chaque échantillon, comme c'est montré ci-dessous :

- **Premier échantillon :**

$$P(\text{Ag}) \text{ ajouté} = P_1 \times T(\text{Au}) \times 2.5$$

$$P(\text{Ag}) \text{ Ajouté} = 0.25100 \times 0.805 \times 2.5$$

$$P(\text{Ag}) \text{ ajouté} = 0.50513\text{g}$$

- **Deuxième échantillon :**

$$P(\text{Ag}) \text{ ajouté} = P_2 \times T(\text{Au}) \times 2.5$$

$$P(\text{Ag}) \text{ ajouté} = 0.25110 \times 0.805 \times 2.5$$

$$P(\text{Ag}) \text{ ajouté} = 0.50533\text{g}$$

- **Troisième échantillon :**

$$P(\text{Ag}) \text{ ajouté} = P_3 \times T(\text{Au}) \times 2.5$$

$$P(\text{Ag}) \text{ ajouté} = 0.25150 \times 0.805 \times 2.5$$

$$P(\text{Ag}) \text{ ajoutée} = 0.50614\text{g}$$

d- Fusion :

- On place les prises d'essais à analyser étroitement enveloppés dans une feuille de plomb sur des coupelles en magnésie préalablement portés à une Température comprise entre 1100 et 1200 °C.



Figure III.2 : Coupelle en magnésie.



Figure III.3 : Four à coupelles.

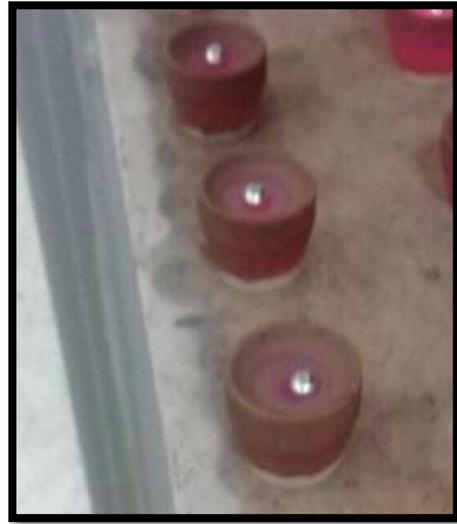


Figure III.4 : Boutons de la fusion.

e-Refroidissement : On fait sortir les coupelles du four. On laisse refroidir puis on brosse les boutons à l'aide d'une brosse à nettoyage.

f-Laminage et recuit : on aplatit les boutons, en utilisant un laminoir jusqu'à ce que les boutons deviennent une bonde plus fine possible ensuite on les roule en cornets à l'aide d'un pince, puis on les recuits en les chauffants pendant 5min.



Figure III.5 : Laminoir.



Figure III.6 : Boutons après laminage et recuit.

g-Séparation chimique : On met les cornets dans des matras d'essayeur puis on les fait plonger dans 20 ml d'acide nitrique 22°B (Pour 500ml d'eau on a 190ml d' HNO_3) et on porte à ébullition, on poursuit le chauffage pendant 15 min.



Figure III.7 : Hotte réactions chimiques.

-On répète le traitement en utilisant 20 ml d'acide nitrique 32°B (32°Baumé : Pour 500ml d'eau on a 319ml d' HNO_3).

h-Recuit : On transfère les cornets d'or dans des creusets de recuit puis on les mets dans un four de coupellation à une Température de 700°C environ 5 min.

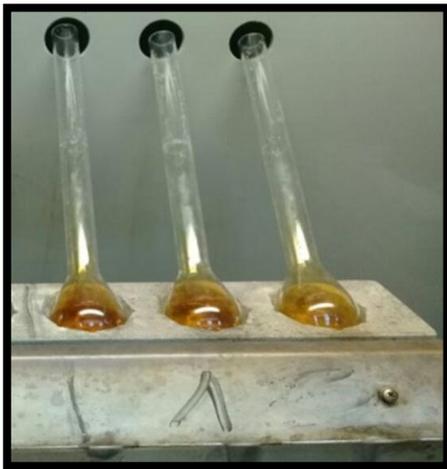


Figure III.8 : Dissolution de l'argent.



Figure III.9 : Boutons d'or.

i-Pesée finale : A L'aide d'une balance on pèse (P_{f1} , P_{f2} , P_{f3}) poids relatifs issus des prises d'essai échantillon. Les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.2 : Le poids final des trois échantillons, en gramme.

$P_{f1}(\text{g})$	$P_{f2}(\text{g})$	$P_{f3}(\text{g})$
0.20180	0.20113	0.20296

III.1.3 Grenailage

Le but de cette étape est de réduire le bullions en forme de grenailles, et cela pour augmenter la surface d'attaque par les acides.

Appareil utilisé : four de grenailage.

Principe : projection d'eau à grande vitesse et en continu, jusqu'à 100m/s, la surface subit une déformation plastique.

- **Mode opératoire :**

On place le bullions dans le four de grenailage sous une température de fusion allant jusqu'à 1100°C dans des creusets en graphite, une fois l'or est fusionné, il subira à la sortie du four un jet d'eau à haute pression qui favorise la formation des grenailles (pépites d'or).



Figure III.10 : Four de grenailage.



Figure III.11 : Les grenailles.

III.1.4 L'attaque chimique

L'affinage avec l'eau régale se réalise par attaque chimique via eau régale. C'est la méthode utilisée à AGENOR pour la purification d'or.

Appareil utilisé : réacteur d'attaque.

- **Mode opératoire :**

Dans cette étape et dans des réservoirs gradués de stockage d'acide on remmène les grenailles et on les met dans un volume d'acide nitrique dans une proportion de 1 à 3 volumes d'acide chlorhydrique afin de dissoudre l'or. On laisse réagir pendant 7heures.

Dès que le mélange est préparé, on allume la cinétique de la dissolution de l'or et de la précipitation de l'argent.



Figure III.12 : Réacteur d'attaque.

a-Filtration : Après sept heures de temps, on obtient une solution jaune composé d'or en majorité et les différentes impuretés présentent dans le bullions et un solide qui contient de l'argent qui couvre quelques grains d'or qu'on appelle l'or passivé, on sépare la solution du solide à l'aide d'un chariot de filtrage muni d'une pompe membrane et d'un papier filtre.

b-Réduction : Dans des tonneaux de réduction on réduit la solution d'or, en injectant manuellement un réducteur sélectif "Meta-Bi-Sulfate de sodium". On suit la réaction à l'aide d'un appareil de mesure de potentiel ce qui nous indiquera que l'or est totalement réduit (sous forme de poudre). Tandis que l'or passivé subira un autre traitement pour extraire le reste de l'or et l'argent.



Figure III.13 : Poudre d'or après filtration.

-à l'aide d'un chariot de filtrage, on filtre la poudre d'or.

-On lave la poudre d'or avec de l'eau distillée.

-Enfin, on les porte au séchage dans une étuve à une température de 120°C, environ quatre heures.



Figure III.14 : Poudre d'or après séchage.

III.1.5 Fusion

Dans des fours, on fait fondre la poudre d'or à une température de 1064°C (température de fusion de l'or).



Figure III.15 : Fusion de la poudre d'or.

III.1.6 Mise en lingots

Pour la mise en forme, on verse le liquide d'or fondu dans des moules appelés "lingotières". Les lingotières sont avant chauffées (pour éviter le choc thermique).

-Fonte : Dans cette étape, on fait fondre les anodes en or dans des creusets en graphite et on les verse dans des lingotières de 500 ou de 1000 grammes selon la demande des clients.

Une fois les lingots d'or sont prêts, on prend un échantillon des lingots qu'on fait passer dans appareil d'analyse X.R.F. On note la nouvelle teneur en or qui est de $T_{\text{Théo}}(\text{Au}) = 99.8\%$.



Figure III.16 : Lingots d'or fin.

III.1.7 Coupellation

Nous allons décrire la Méthode normalisée, utilisée à cet effet. Nous prélevons, d'une part, trois échantillons des lingots d'or que nous avons obtenus, numérotés 1, 2 et 3. Leurs poids sont notes P_1 , P_2 et P_3 , respectivement et leurs valeurs sont données ci-dessous :

Tableau III.3 : Le poids des trois échantillons, en gramme.

$P_1(\text{g})$	$P_2(\text{g})$	$P_3(\text{g})$
0.25100	0.25200	0.25150

D'autre part, nous considérons trois autres échantillons témoins numérotés à leur tour 1', 2' et 3'. Le poids de chacun est noté, P_1' , P_2' et P_3' , respectivement.

Ces derniers sont calculés en fonction du poids des trois premiers échantillons comme suit :

- **Premier échantillon témoin :**
 $P_1' = P_1 \times T (\text{Au})$
 $P_1' = 0.25100 \times 0.998$
 $P_1' = 0.250498 \text{ g}$
- **Deuxième échantillon témoin :**
 $P_2' = P_2 \times T (\text{Au})$
 $P_2' = 0.25200 \times 0.998$
 $P_2' = 0.25149\text{g}$
- **Troisième échantillon témoin :**
 $P_3' = P_3 \times T (\text{Au})$
 $P_3' = 0.25150 \times 0.998$
 $P_3' = 0.250997\text{g}$

Une quantité de cuivre de masse $P(\text{Cu}) = 0.02\text{g}$ et une quantité variable d'argent sont ajoutées aux échantillons. La masse d'argent ajoutée est calculée comme par

- **Premier échantillon :**
 $P(\text{Ag}) \text{ ajouté} = P_1 \times T (\text{Au}) \times 2.5$
 $P(\text{Ag}) \text{ ajouté} = 0.25100 \times 0.998 \times 2.5$
 $P(\text{Ag}) \text{ ajouté} = 0.626245\text{g}$
- **Deuxième échantillon :**
 $P(\text{Ag}) \text{ ajouté} = P_2 \times T (\text{Au}) \times 2.5$
 $P(\text{Ag}) \text{ ajouté} = 0.25200 \times 0.998 \times 2.5$
 $P(\text{Ag}) \text{ ajouté} = 0.62874\text{g}$
- **Troisième échantillon :**
 $P(\text{Ag}) \text{ ajouté} = P_3 \times T (\text{Au}) \times 2.5$
 $P(\text{Ag}) \text{ ajouté} = 0.25150 \times 0.998 \times 2.5$
 $P(\text{Ag}) \text{ ajouté} = 0.62749\text{g}$

On place les prises d'essais à analyser étroitement enveloppés dans une feuille de plomb sur des coupelles en magnésie préalablement portés à une Température comprise entre 1100 et 1200 °C.

a-Refroidissement : On fait sortir les coupelles du four. On laisse refroidir puis on brosse les boutons à l'aide d'une brosse à nettoyage.

b-Laminage et recuit : on aplatit les boutons, en utilisant un laminoir jusqu'à ce que les boutons deviennent une bonde plus fine possible ensuite on les roule en cornets à l'aide d'une pince, puis on les recuit en les chauffants pendant 5min.

c-Séparation chimique : On met les cornets dans des matras d'essayeur puis on les fait plonger dans 20 ml d'acide nitrique 33°B (33°B : Pour 500ml d'eau on a 254ml d'HNO₃) et on porte à ébullition, on poursuit le chauffage pendant 15 min.

-On répète le traitement en utilisant 20 ml d'acide nitrique HNO₃ 49°B (49°B : Pour 500 ml d'eau on a 376.5 ml d'HNO₃).

d-Recuit : On transfère les cornets d'or dans des creusets de recuit puis on les mets dans un four de coupellation à une Température de 700°C environ 5 min.

e-Pesée finale : A l'aide d'une balance on pèse (P_{f1} , P_{f2} , P_{f3}) et (P_{f1}' , P_{f2}' et P_{f3}') poids relatifs issus des prises d'essai échantillon. Ce qui donne :

$$P_{f1} (\text{Au}) = 0.25062\text{g}$$

$$P_{f2} (\text{Au}) = 0.25157\text{g}$$

$$P_{f3} (\text{Au}) = 0.25104\text{g}$$

$$P_{f1}' (\text{Au}) = 0.25037\text{g}$$

$$P_{f2}' (\text{Au}) = 0.25141\text{g}$$

$$P_{f3}' (\text{Au}) = 0.25084\text{g}$$

III.1.8 Récupération du reste de l'or et d'argent

L'or passivé issu de premier traitement de bullions passe par un autre processus de traitement pour la séparation de l'or recouvré par l'argent et de ce dernier.

Le processus de traitement de ce passivé se fait en suivant les étapes suivantes :

a-La fusion réductrice : Fusion de passivé en ajoutant Bicarbonate de sodium et le charbon.

b-L'inquartation : le but de cette opération est de faire en sorte que le pourcentage de l'or restant du solide soit 25 %. Pour cela nous ajoutons le cuivre.

c-Grenailage : une fois, on a ajouté le cuivre nous passons vers l'étape de grenailage ; rendre l'ensemble de la matière en forme de grenailles.

d-Attaque chimique : cette fois ci nous allons faire l'attaque chimique en utilisant l'acide nitrique pour dissoudre l'argent et le cuivre utilisé durant l'inquartation et par l'eau régale pour avoir une pureté élevée de produit fini.

A la fin de l'opération nous allons obtenir un solide qui est l'or et une solution de nitrate de cuivre CuNO_3 et de nitrates d'argent AgNO_3 .

L'or en forme solide passera en lingots par la fusion tandis que la solution des nitrates de cuivre et d'argent subira un traitement pour l'extraction de l'argent.

III.2 Résultats et discussions

Dans l'agence de AGENOR, et lors du traitement de l'or, des calculs sont nécessaires aux différentes étapes du travail afin de déterminer la teneur finale en or $T(\text{Au})_f$. Cela nécessite d'abord des calculs théoriques puis expérimentaux qui viennent confirmer les résultats obtenus.

La formule qui nous permet le calcul de la teneur en or est la suivante :

$$T(\text{Au}) = P_{\text{final}} / P_{\text{initial}}$$

III.2.1 La réception du bullions

Cette partie consiste à déterminer :

-la teneur en or théorique, noté : $T_{\text{Théo}}(\text{Au})$.

-le poids théorique d'or à récupérer, noté : $P_{\text{Théo}}(\text{Au})$:

$$P_{\text{Théo}}(\text{Au}) = P_{\text{(bullions)}} \times T_{\text{Théo}}(\text{Au})$$

Comme première étape, et à l'aide d'une balance, on détermine le poids du bullions noté $P_{\text{(bullions)}}$:

$$P_{\text{(bullions)}} = 20\,000\text{g} = 20\text{kg}$$

Dans la deuxième étape, on prend un échantillon du bullions et on le fait passer dans l'appareil d'analyse spectroscopique l'X.R.F. On note :

$$T_{\text{Théo}}(\text{Au}) = 80.5\%$$

$$T_{\text{Théo}}(\text{Ag}) = 15\%$$

$$\text{Impuretés} = 4.5\%$$

Avec : $T_{\text{Théo}}(\text{Au})$: teneur théorique en or (Au).

$T_{\text{Théo}}(\text{Ag})$: teneur théorique en Argent (Ag).

Calculons le poids d'or théorique à récupérer selon la relation :

$$P_{\text{Théo}}(\text{Au}) = P_{\text{(bullions)}} \times T(\text{Au})$$

$$P_{\text{Théo}}(\text{Au}) = 20000 \times 0.805$$

$$P_{\text{Théo}}(\text{Au}) = 16100\text{g} = 16.100\text{kg}$$

D'après le calcul, le poids d'or qu'il faut récupérer à la fin de cet affinage est égale à 16100g.

Et le poids théorique d'argent à récupérer c'est :

$$P_{\text{Théo}}(\text{Ag}) = P_{\text{(bullions)}} \times T(\text{Ag})$$

$$P_{\text{Théo}}(\text{Ag}) = 20000 \times 0.12$$

$$P_{\text{Théo}}(\text{Ag}) = 2400 = 2\,400 \text{ g}$$

III.2.2 La coupellation interne

a- Calcul de la teneur en Or :

$$T_f(\text{Au}) = [T_1(\text{Au}) + T_2(\text{Au}) + T_3(\text{Au})] / 3$$

- **Calculons $T_1(\text{Au})$:**

$$T_1(\text{Au}) = (P_{f1}/P_1) \times 100$$

Avec :

P_1 : poids du 1^{er} échantillon issus lors de la coupellation interne.

P_{f1} : poids du 1^{er} échantillon pesé à la fin de la coupellation interne.

$$T_1(\text{Au}) = (0.20180/0.25100) \times 100$$

$$T_1(\text{Au}) = 80.4\%$$

- **Calculons $T_2(\text{Au})$:**

$$T_2(\text{Au}) = (P_{f2}/P_2) \times 100$$

Avec :

P_2 : poids du 2^{ème} échantillon issus lors de la coupellation interne.

P_{f2} : poids du 2^{ème} échantillon pesé à la fin de la coupellation interne.

$$T_2(\text{Au}) = (0.20113/0.25110) \times 100$$

$$T_2(\text{Au}) = 80.3 \%$$

- **Calculons $T_3(\text{Au})$:**

$$T_3(\text{Au}) = (P_{f3}/P_3) \times 100$$

Avec :

P_3 : poids du 3^{ème} échantillon issus lors de la coupellation interne.

P_{f3} : poids du 3^{ème} échantillon pesé à la fin de la coupellation interne.

$$T_3(\text{Au}) = (0.20296/0.25150) \times 100$$

$$T_3(\text{Au}) = 80.5\%$$

A partir de là, on peut calculer la teneur finale en or de la première coupellation :

$$T_f(\text{Au}) = [T_1(\text{Au}) + T_2(\text{Au}) + T_3(\text{Au})]/3$$

$$= (80.4 + 80.3 + 80.5)/3$$

$$T_f(\text{Au}) = 80.4\%$$

Ce résultat est concordant avec le résultat théorique obtenu par l'appareil X.R.F qui est de 80.5%.

b- Calcul de la teneur en argent :

Pour le calcul de la teneur en argent on prend une prise d'essais de $P_1 = 0,25\text{g}$ de bullions on le met dans une feuille de plomb sur de des coupelle en magnésie préalablement à une température de 1100°C pendant 30 minutes pour avoir à la fin de fusion un bouton P_2 composé uniquement de l'or et l'argent.

A la fin de l'essai nous avons obtenu les résultats suivant :

$$P_1 = 0.25\text{g}$$

$$P_2 = 0.23\text{g}$$

La teneur sera calculée suivant la formule suivante :

$$T(\text{Ag}) = (P_2/P_1) - T(\text{Au})$$

$$T(\text{Ag}) = (0.23/0.25) - 0.84 = 0.12 = 12 \%$$

c- Coupellation normalisée :

$$T_f(\text{Au}) = [[(F_{\text{Moy}} \cdot T_1(\text{Au})) + (F_{\text{Moy}} \cdot T_2(\text{Au})) + (F_{\text{Moy}} \cdot T_3(\text{Au}))]/3] \times 100$$

Avec :

$T_f(\text{Au})$: teneur finale en or.

F_{Moy} : valeur moyenne du facteur de correction.

$T_1(\text{Au})$; $T_2(\text{Au})$; $T_3(\text{Au})$: teneur en or des échantillons issus de la coupellation normalisée.

Calculs des teneurs :

- **Calculons $T_1(\text{Au})$:**

$$T_1(\text{Au}) = (P_{f1}/P_1) \times 100$$

$$= (0.25062/ 0.25100) \times 100$$

$$T_1 (\text{Au}) = 99.85\%$$

- **Calculons $T_2 (\text{Au})$:**

$$\begin{aligned} T_2 (\text{Au}) &= (P_{f2}/P_2) \times 100 \\ &= (0.25157/0.25200) \times 100 \\ T_2 (\text{Au}) &= 99.83\% \end{aligned}$$

- **Calculons $T_3 (\text{Au})$:**

$$\begin{aligned} T_3 (\text{Au}) &= (P_{f3}/P_3) \times 100 \\ &= (0.25104/0.25150) \times 100 \\ T_3 (\text{Au}) &= 99.82\% \end{aligned}$$

Calculs des facteurs de correction F : les facteurs de correction, F, sont calculés par la Formule suivante :

$$F = P'_{\text{initial}} / P'_{\text{final}}$$

- **Calculons F_1 :**

$$\begin{aligned} F_1 &= P'_1 / P'_{f1} \\ &= 0.250498 / 0.25037 \\ F_1 &= 1.0005 \end{aligned}$$

- **Calculons F_2 :**

$$\begin{aligned} F_2 &= P'_2 / P'_{f2} \\ &= 0.251496 / 0.25141 \\ F_2 &= 1.0003 \end{aligned}$$

- **Calculons F_3 :**

$$\begin{aligned} F_3 &= 0.250997 / 0.25084 \\ F_3 &= 1.0006 \end{aligned}$$

Donc la valeur moyenne de F: $F = (1.0005 + 1.0003 + 1.0006) / 3$

$$F = 1.00046$$

La teneur finale en or est alors calculée comme suit.

$$T_{\text{final}}(\text{Au}) = \left[\frac{(1.00046 \times 0.9985) + (1.00046 \times 0.9983) + (1.00046 \times 0.9982)}{3} \right] \times 100$$

$$T_{\text{final}}(\text{Au}) = 99.88\%$$

On remarque que : $T_{\text{final}}(\text{Au}) = T_{\text{Théo}}(\text{Au}) = 99.88\%$

Les résultats expérimentaux sont compatibles avec les calculs théoriques, donc l'affinage est réalisé et travaillé avec succès. Nous avons obtenu de l'or fin de 24 carats.

Pour confirmer le poids d'or final récupéré, nous utilisons la formule suivante :

$$\begin{aligned} \text{Poids d'or final} &= \sum \text{Poids des lingots d'or} \times T_{\text{Théo}}(\text{Au}) \\ &= 16\,080,68\text{g} \times 0.9988 \\ &= 16\,061,38\text{g} \end{aligned}$$

Le Poids d'or final est donc égal à 16061,38g (16,06138kg). La perte de masse est calculée comme suit :

$$\text{La perte de masse} = \text{poids d'or théorique} - \text{poids d'or final}$$

$$\text{La perte de masse} = 16100 - 16061,38 = 38,62\text{g}$$

$$\text{La perte de masse} = 38,62 \text{ (g)} = 0,24\%$$

Cette perte de masse peut être justifiée par le passage de l'or par plusieurs étapes d'affinage et que la récupération ne peut pas se faire totalement.

III.3 Processus de traitement d'argent

La solution issue de dernière opération d'affinage de l'or (solution des nitrates d'argent et de cuivre) passe par le processus d'affinage d'argent (par la fusion réductrice) qui est composé par les étapes suivantes :

III.3.1 Réduction

La solution sera transportée vers la cellule de réduction où on ajoute du sel NaCl pour avoir un précipité blanc de chlorure d'argent et une solution bleue des nitrates de cuivre qui passera vers la station de traitement de rejets.

III.3.2 La fusion réductrice

Le précipité blanc (chlorure d'argent) sera fondu en ajoutant 40% de bicarbonate de sodium et 5 % de charbon dans le four à gaz.

III.3.3 Fusion

Les métaux issu de la fusion réductrice sera fondu une autre fois dans des fours à induction pour la mise en anode.

III.3.4 Titrage

Détermination de la teneur en argent. On résume toutes les étapes de ce chapitre dans les organigrammes suivants, voir figures III.17-18-19.

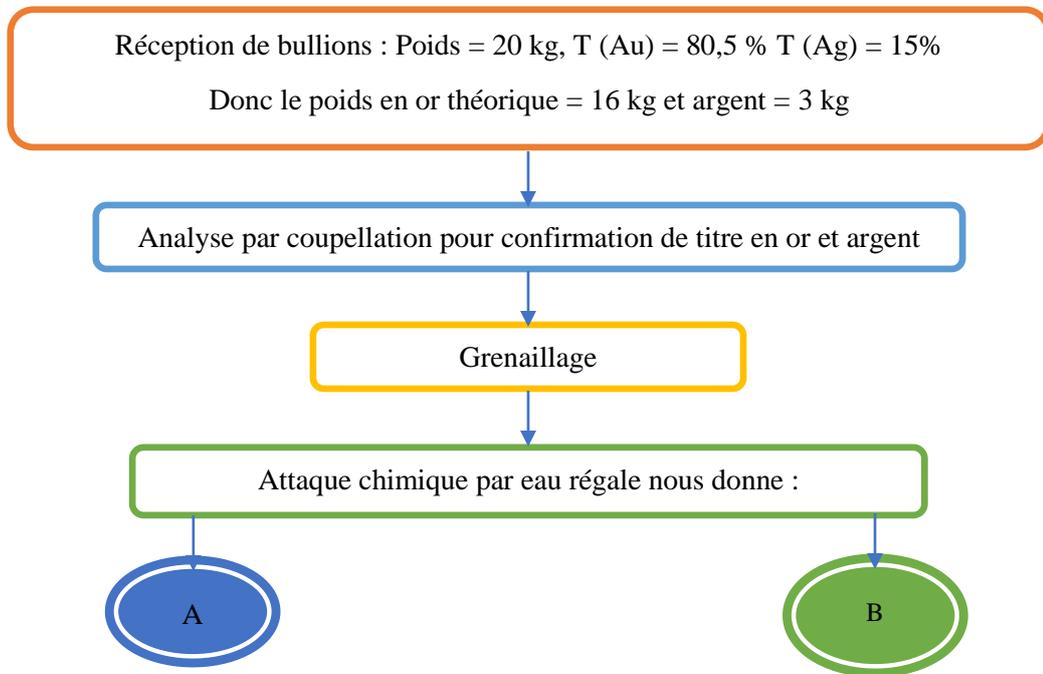


Figure III.17 : Affinage d'or.

III.4 Conclusion

L'affinage d'argent ne donne pas des résultats satisfaisants par rapport à l'or avec une grande perte dans la méthode de fusion réductrice, donc nous proposons deux procédés dans le dernier chapitre IV afin d'améliorer ce résultat ; l'optimisation des paramètres d'affinage de l'argent par l'ajoute de la soude et le dextrose ou par la cémentation par le cuivre.

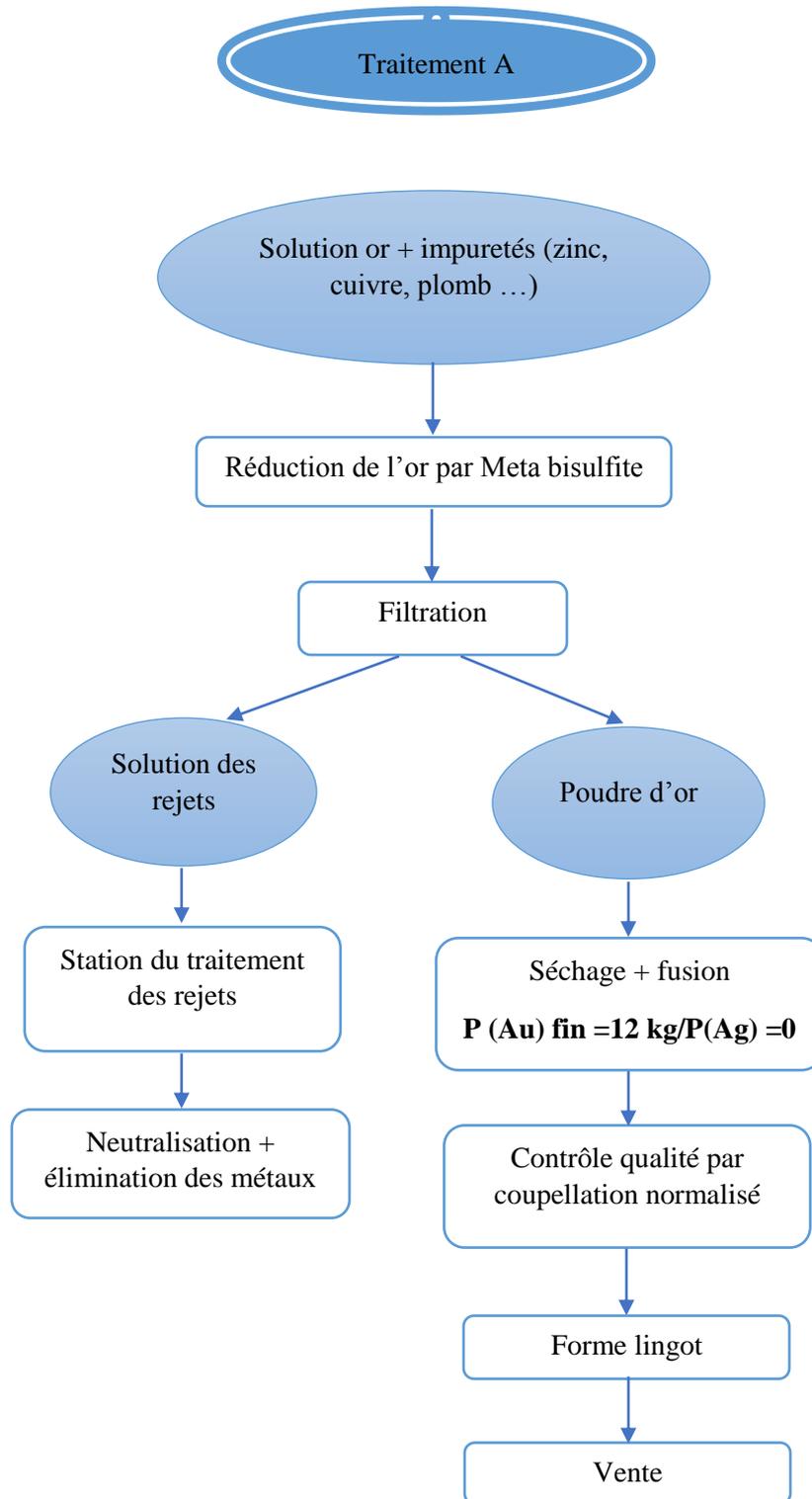


Figure III.18 : Réduction d'or.

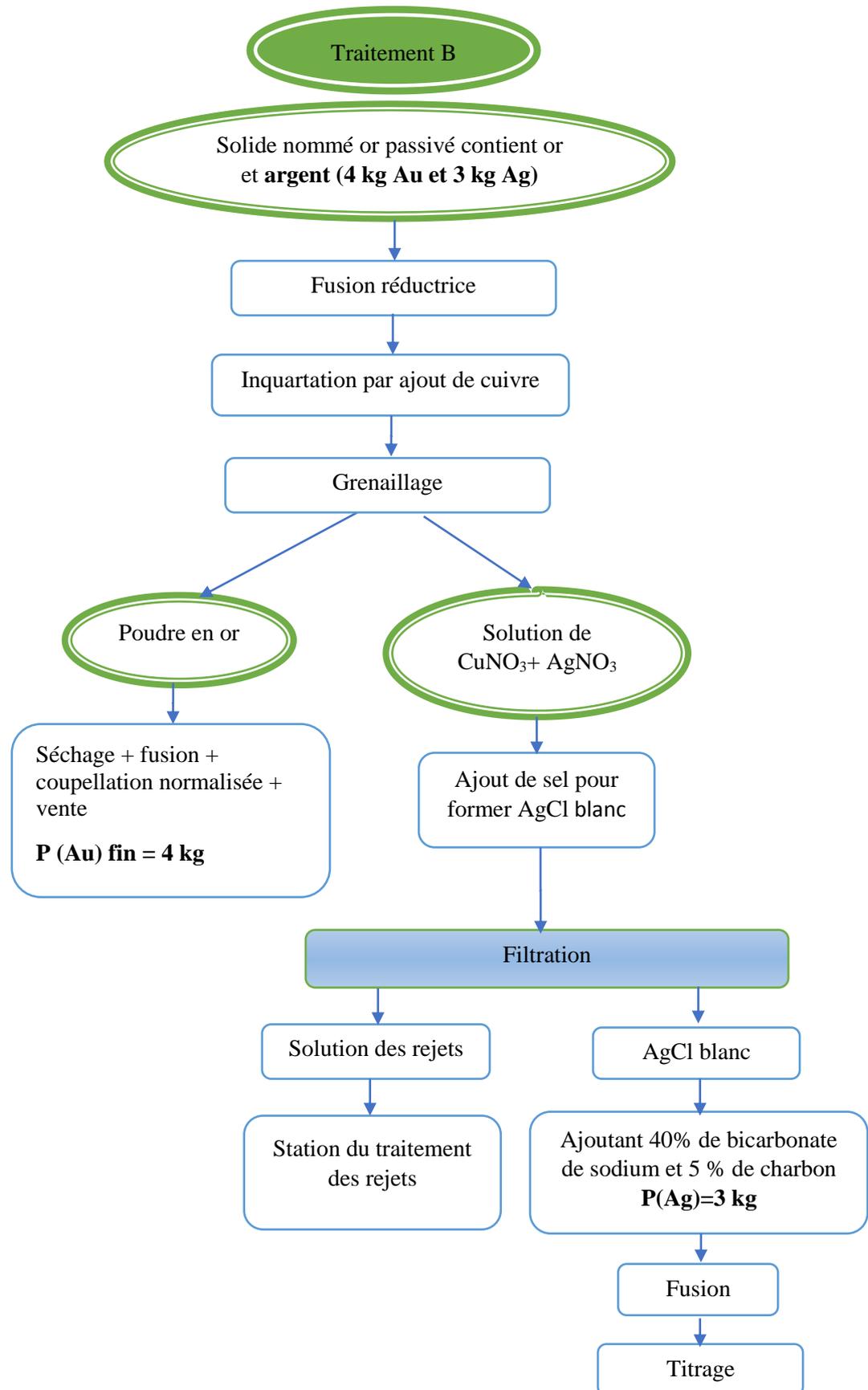


Figure III.19 : Récupération de l'or et l'affinage d'argent par la fusion réductrice.

Chapitre IV

Optimisation des paramètres d'affinage de l'argent

CHAPITRE IV

OPTIMISATION DES PARAMETRES D’AFFINAGE DE L’ARGENT

IV.1 Introduction

L’affinage est une opération qui signifie la purification ou séparation des métaux précieux en les amenant à un très haut degré de pureté.

L’affinage de l’or et l’argent sont les principaux processus qui s’opèrent à l’agence nationale pour la transformation et la distribution des métaux précieux, AGENOR.

Contrairement au processus d’affinage de l’or où le service de production de l’unité obtient des bons résultats en terme de qualité de produits finis et aussi la perte (Rendement) en or qui ne dépasse pas les 1% dans la majorité des cas ; Celui de l’argent donne des résultats non satisfaisants et engendre de nombreux inconvénients :

- Grande perte d’argent.
- Qualité de produit non conforme (Teneur basse).
- Grandes émissions des gaz toxiques lors de ce processus (Fusion Réductrices).
- Effets nocifs sur la santé humaine et sur l’environnement.
- Dégâts matériels (oxydation, corrosion ...etc.).

Afin de résoudre ces problèmes, deux nouveaux processus d’affinage d’argent ont fait l’objet d’une recherche au niveau du laboratoire d’analyse de l’unité. Le premier procédé s’agit d’un traitement par la soude caustique et le dextrose et le deuxième est une cémentation par le cuivre.

IV.2 Affinage par ajout de la soude et de dextrose

Le principe de ce premier mode de traitement est la conversion des chlorures d’argent en argent métallique pur (99,9%) en utilisant la soude caustique et le dextrose.

Les réactions chimiques qui se produiront dans ce procédé sont :

Première réaction✓ **AgCl – NaOH :****IV.2.1 Calcul des quantités théorique à ajoutés des réactifs**

Tableau IV.1 : La quantité théorique de NaOH à ajouter		
Réactifs	Formule	Masse molaire / Quantité de matière
La soude caustique NaOH	NaOH	40 g/mol
Chlorure d'Argent	AgCl	143,32 g/mol
Quantité pour 1000 g de AgCl	$n = m/M$	$1000/ 143,32 = \mathbf{7 \text{ mol}}$
Quantité de NaOH	$n*M$	$7* 40 = \mathbf{280g}$

D’où :

Pour convertir 1000g d’AgCl il faut 280g de NaOH (30%).

Deuxième réaction✓ **Ag₂O – C₆H₁₂O₆ :**

Tableau IV.2 : La quantité théorique de dextrose à ajouter		
Réactifs	Formule	Masse molaire / Quantité de matière
Dextrose	C ₆ H ₁₂ O ₆	180 g/mol
Oxyde d'Argent	Ag ₂ O	231.72 g/mol
Soit pour 1000 g de Ag ₂ O	$n = m/M$	$1000/231,72 = \mathbf{4,31 \text{ mol}}$
Quantité de C ₆ H ₁₂ O ₆	$n*M$	$4,31*180 = \mathbf{776.80 \text{ g.}}$

D’où :

Pour réduire 1000g d’Ag₂O il faut 777g de dextrose (80%).

IV.2.2 Manipulation

Le but de cette manipulation est d’optimiser les quantités ajoutées de la soude et de sucre (dextrose) pour obtenir les paramètres optimums pour ce procédé qui minimisent la perte et qui donne la meilleure teneur en argent.

Pour se faire nous allons réaliser une série des essais d’affinage des déchets de brasure ayant une teneur en argent environ 40,7% suivant le Protocole représenté dans l’organigramme en dessous et faire varier à chaque essais les quantités ajoutées de soude et de sucre pour tirer à la fin les paramètres qui présentent le rendement et la pureté les plus élevés.

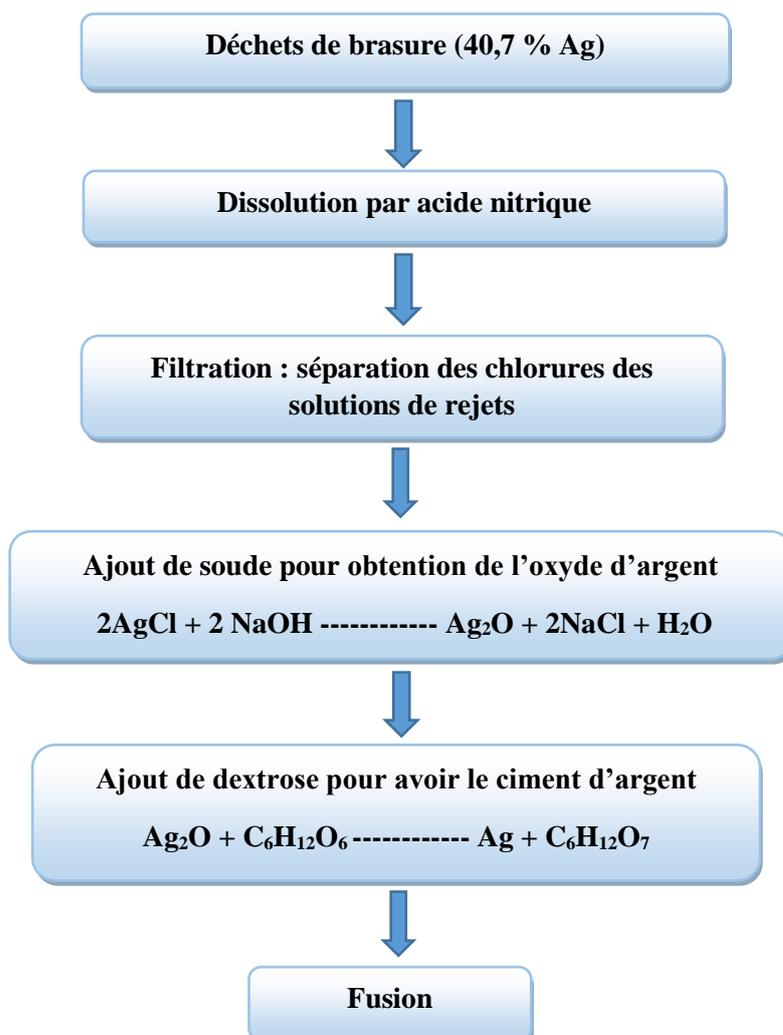


Figure IV.1 : Protocole d’affinage d’argent par la soude et le dextrose.

IV.3 Optimisation de quantités ajoutées de la soude

IV.3.1 Expérience 1 :

Ajout de 40% de la soude caustique / 80% de dextrose

Dans cet essai 1000g de déchets de brasure vont être dissous à l’aide de l’acide nitrique ensuite transformé en chlorure d’argent en ajoutant NaCl, puis affiner en ajoutant 40% (10% d’excès par rapport à la quantité théorique 30%) de la soude de la quantité globale des chlorures d’argent et 80% de dextrose.

Les résultats de l’expérience 1 sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.3 : Ajout de 40% de la soude caustique / 80% de dextrose							
Poids de brasure (g)	Teneur Ag(%)	poids argent fin à récupérer(g)	dissolution	poids argent récupéré(g)	Teneur Ag(%)	Poids argent fin(g)	Perte (g)
1000,7	40,78	408,09			402,9	98	394,842

IV.3.2 Expérience 2 :

Ajout de 60% de la soude caustique / 80% de dextrose

Pour cet essai nous allons affiner 1000g de ses déchets mais cette fois en ajoutant 60% de la soude et 80% de dextrose.

Les résultats de l’expérience sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.4 : Ajout de 60% de la soude caustique / 80% de dextrose							
Poids de brasure (g)	Teneur Ag(%)	poids argent fin à récupérer(g)	dissolution	poids argent récupéré(g)	Teneur Ag(%)	Poids argent fin(g)	Perte(g)
1000,1	40,78	407,84			403	99,3	400,18

IV.3.3 Expérience 3 :

Ajout de 80% de la soude caustique / 80% de dextrose

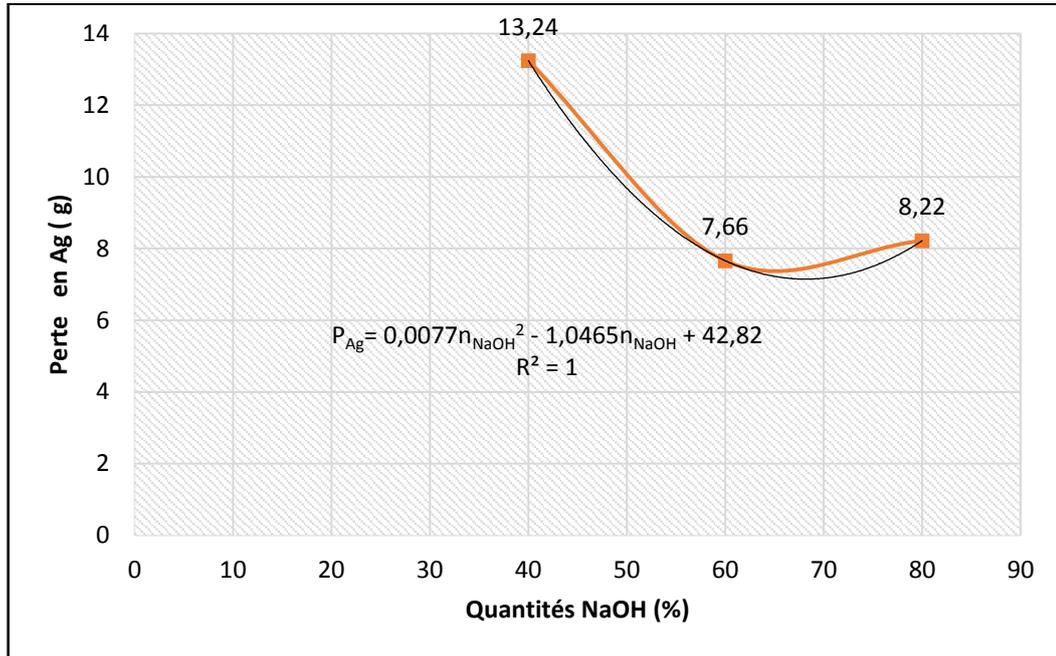
Tableau IV.5 : Ajout de 80% de la soude caustique / 80% de dextrose							
Poids de brasure(g)	Teneur Ag(%)	poids argent fin à récupérer(g)	dissolution	poids argent récupéré(g)	Teneur Ag(%)	Poids argent fin(g)	Perte (g)
1500,8	40,78	612,03		604,6	99,87	603,81	8,22

Pour cet essai nous allons traiter 1500g de ses déchets en ajoutant 80% de la soude et 80% de dextrose.

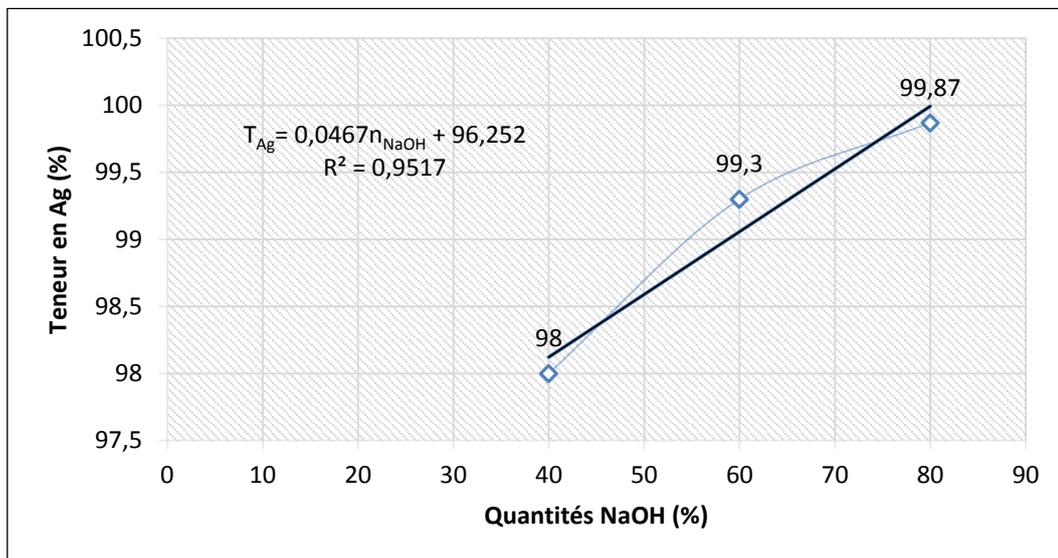


Figure IV.2 : Quantités obtenues lors des trois essais.

IV.3.4 Représentation graphiques des résultats .



Graphe IV.1 : Variation de la perte en argent en fonction de la quantité de la soude ajoutée



Graphe IV. 2 : Variation de la teneur en argent fonction de la quantité de la soude ajoutée.

IV.3.5 Interprétation des résultats

Graphe IV.1 : La diminution de la perte en fonction d’augmentation de la quantité de la soude ajoutée est justifiée par l’achèvement (fin) de la réaction d’oxydation de la totalité de l’argent présent dans les chlorures d’argent. D’ailleurs lors de l’ajout de 40% de la soude, des points blancs d’AgCl apparaissent toujours dans le ciment d’argent.

Et d’après le graphe on conclut que l’ajout de 60% de NaOH nous donne la quantité la plus petit de la perte d’argent par rapport aux autres résultats. La quantité optimale d’après l’équation donne par le graph 67,95% de NaOH.

Graphe IV.2 : L’augmentation de la teneur en argent avec l’augmentation des quantités de la soude caustique ajoutée s’explique sur le fait que lors de l’achèvement de la réaction (oxydation de tous les chlorures d’argent), on obtient un ciment pur qui contient plus des chlorures d’argent. En effet la présence de ses chlorures dans la fusion diminue la teneur. La teneur d’argent d’après l’équation et la quantité optimale 67,95% de NaOH donne par le graph 99,42%.

IV.4 Optimisation des quantités de dextrose ajoutées

IV.4.1 Expérience 1 :

a- Ajout de 60%de la soude caustique et 80% de dextrose

Dans cette expérience nous allons montrer l’effet de l’ajout de dextrose dans notre processus de traitement d’argent. Pour cela nous allons ajouter respectivement 80%, 100% de dextrose à deux quantités similaires d’oxyde d’argent obtenu après avoir ajoutés 60% la soude caustique au chlorures d’argents.

Les résultats de l’expérience sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.6 : Ajout de 60% de la soude caustique et 80% de dextrose			
Poids oxyde d'argent (g)	Pourcentage de dextrose ajouté (%)	Poids de ciment d'argent récupérer(g)	Perte (g)
50	80	49,5	0,5
50	100	49,6	0,4

b- Interprétation des résultats :

D’après le tableau on remarque que la perte obtenue lors de l’ajout de 80% de dextrose est très proches de celle obtenue quand on ajoute 100%, cela démontre que l’ajout de la soude est le paramètre essentiel dans ce processus tandis que l’ajout de sucre est un paramètre secondaire, en effet c’est la soude qui assure l’oxydation total de l’argent et le sucre joue un rôle d’accumulateur de ciment après l’ajout de la soude.

Pour cela durant la suite de nos essais nous allons optimiser l’opération de l’ajout de la soude en étudiant les paramètres qui influent sur cette étape à savoir :

- L’agitation.
- Le rapport solide liquide.

IV.4.2 Expérience 2 :**a- Influence de temps d’agitation lors de l’ajout la soude.**

Dans ces essais nous allons essayer de mettre en évidence l’importance de facteur d’agitation dans ce processus de traitement.

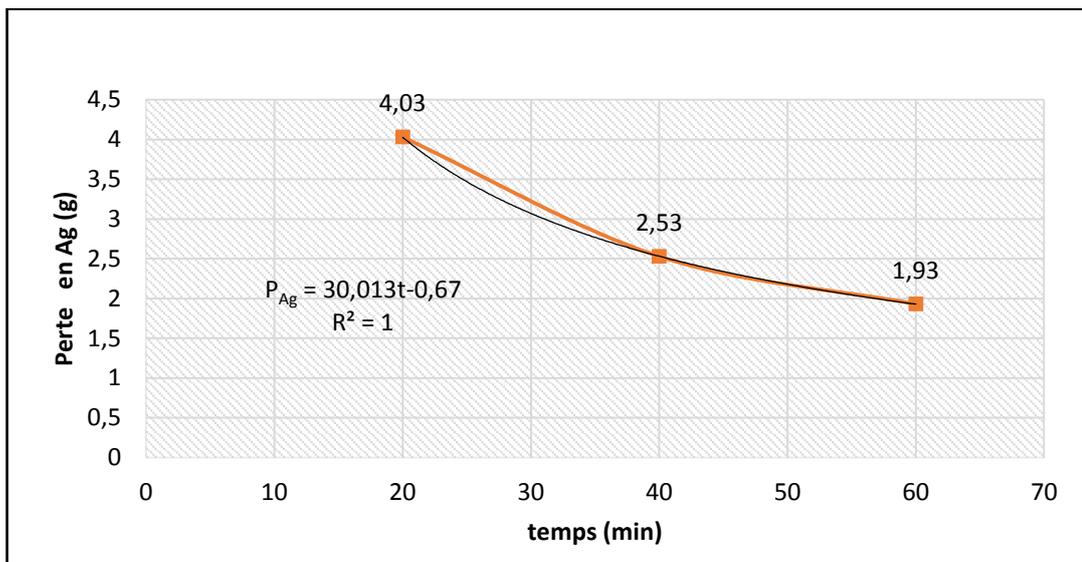
Pour y arriver, trois essais ont été réalisé sur une quantité de déchets issus de la fonderie contenant de l’argent (déchets d’alliages, scories ...etc.) qui a été dissout par l’acide nitrique. A la fin de la dissolution la solution mère a été titre par voie volumétrique pour la détermination de pourcentage en argent, puis repartis en trois solutions filles après avoir été bien homogénéisé.

Les solutions filles vont être renduite en chlorures d’argent en ajoutant une quantité de sel. Pour la suite de processus, les trois quantités de chlorure obtenu suivront le traitement en ajoutant 60% de la soude pour chacune et seront soumise à un temps d’agitation différent (20min, 40min, 60min). A la fin de l’opération les quantités de ciment d’argent vont être séchées puis pesée.

Les résultats de l’expérience sont reportés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.7 : Influence du temps d'agitation					
Essai 1 : Agitation pendant 20 minutes					
Volume de la solution 1(ml)	Analyse de la teneur Ag (%)	poids argent fin à récupérer(g)	Agitation 20 m	Poids de ciment d'argent récupéré(g)	Perte(g)
250	28.45	71.13			67.1
Essai 2 : Agitation pendant 40 minutes					
Volume de la solution 2(ml)	Analyse de la teneur Ag (%)	poids argent fin à récupérer(g)	Agitation 40 m	Poids de ciment d'argent récupéré(g)	Perte(g)
250	28.45	71.13			68.6
Essai 3 : Agitation pendant 60 minutes					
Volume de la solution 3(ml)	Analyse de la teneur Ag (%)	poids argent fin à récupérer(g)	Agitation 60 m	Poids de ciment d'argent récupéré(g)	Perte(g)
250	28.45	71.13			69.2

b- Représentation graphiques des résultats



Graphe IV.3 : Variation de la perte en argent en fonction de temps.

c- Interprétation des résultats

Graphe IV.3 : La diminution de la perte en fonction temps s’explique sur le fait de l’agitation.

Plus le temps d’agitation augmente plus on a une petite perte d’argent.

Donc le facteur d’agitation est un paramètre essentiel dans ce processus.

IV.4.3 Expérience 3 :

a- Influence du rapport solide liquide.

Pour cet essai nous allons voir l’influence de rapport solide/liquide entre la quantité des chlorures d’argent et l’eau avant l’ajout de la soude.

Deux essais ont été réalisés à cet effet en prenant en considération les deux rapports

1 : 0.5 et 1 : 2.

Les résultats de l’expérience sont représentés dans les deux figures suivantes :

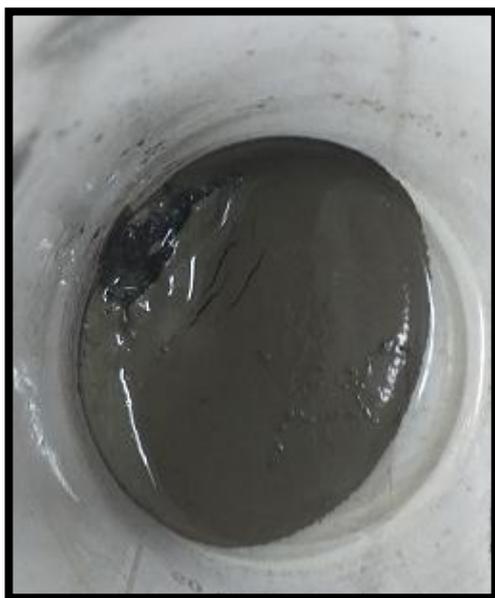


Figure IV.3 : Rapport S: L = 1: 2

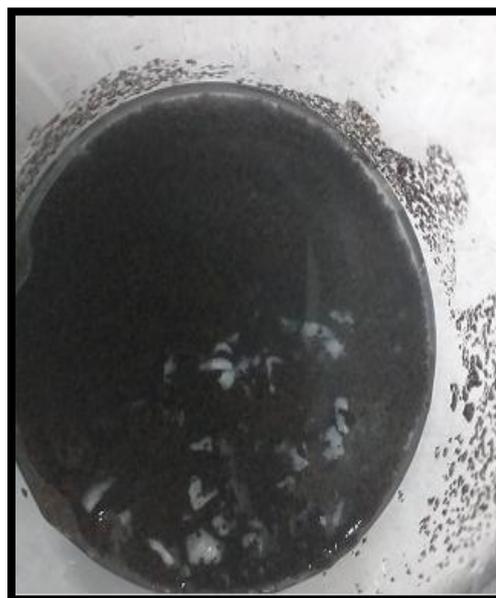
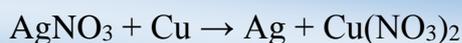


Figure IV.4 : Rapport S: L = 1: 0.5

IV.5 Affinage par cémentation avec le cuivre

La cémentation de l’argent par le cuivre c’est la deuxième démarche qui a été réalisé afin de résoudre les problèmes issus lors de traitement par la fusion réductrice. Le principe de cette démarche est d’introduire dans une solution concentrée de nitrate d’argent de cuivre sous forme de plaque/ barre en mode statique ou dynamique.



Pour l’élaboration de ce procédé deux réflexions ont été développées pour les deux modes :

Statique : injection dans la solution des plaques/ barres en cuivre.

Dynamique : la conception d’un agitateur composé de deux / quatre barres de cuivre superposées en forme d’un U.

Les essais de cette démarche ont été effectués suivant le mode opératoire indiqué ci-dessous :

IV.5.1 Expérience 1 : Réalisation de mode statique

Dans cette expérience nous allons tremper deux plaques de cuivre dans notre solution contenant des nitrates d’argent pendant 24h.

Les résultats de l’expérience sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.8 : Mode Statique							
Poids de brasure (g)	Teneur Ag (%)	Poids argent fin à récupérer (g)	dissolution	poids argent récupéré(g)	Teneur (%)	Poids argent fin(g)	Perte(g)
1000	40,78	407,8			392,75	99,93	392,47



Figure IV.5 : Représentation de mode statique.

IV.5.2 Expérience 2 : Réalisation de mode dynamique

L’idée de cette expérience est de confectionner un agitateur en forme de U composé d’hélices en cuivre qui va assurer l’agitation de la solution et la cémentation en même temps lors de contact des ions d’argent présentent dans la solution avec les éliques de cuivre.

Les résultats de l’expérience sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau IV.9 : Mode Dynamique							
Poids de brasure (g)	Teneur Ag (%)	poids argent fin à récupérer (g)	dissolution	poids argent récupéré(g)	Teneur Ag (%)	Poids argent fin(g)	Perte (g)
1000	40,78	407,8			398	99,95	397,8

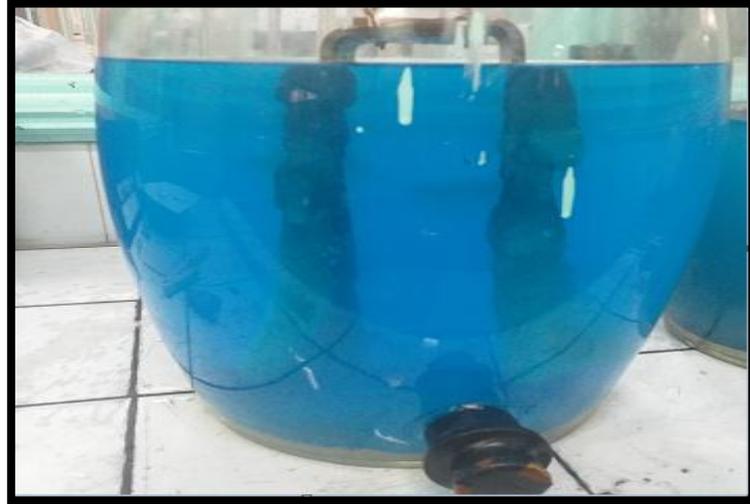


Figure IV.6 : Représentation de mode dynamique.

IV.5.3 Interprétation des résultats

On remarque que le taux de perte dans le mode statique est supérieur à celui de mode dynamique et cela est dû à la surface spécifique de contact entre le cuivre et les ions d’argent qui est plus importante dans le cas de mode dynamique.

Bien que le taux de perte en argent est supérieur à 1% (perte admissible) mais le degré pureté dans ce processus de d’affinage atteins les 99.99%.

IV.6 Etude économique des deux procédés

Le but de cette étude est de définir les couts d’affinage relatifs à chaque procédé. Etant donné que les couts sont les même lors de la lixiviation, la différence se situe dans le reste de des processus.

Les couts d’affinage des deux procédés sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau IV.10 : Coûts d'affinage de 1000g d'argent par la soude caustique et le dextrose						
Produits	Désignation	Unité	Quantité utilisée	P.U	Cout Da	Cout total Da
Acide nitrique	Lixiviation	ml	1000	185	185	413,00
Sel de table NaCl	Chlorures d'argent	g	1000	30	30	
Soude caustique Na OH (Ajout de 60%)	Oxyde d'argent	g	600	130	78	
Dextrose (Ajout de 80%)	Cément d'argent	g	800	150	120	

Tableau IV.11 : Coûts d'affinage de 1000g d'argent par Cémentation						
Produits	Désignation	Unité	Quantité utilisée	P.U	Cout Da	Cout total Da
Acide nitrique	Lixiviation	ml	1000	185	185	392,08
Cuivre	Cémentation	g	200	700	140	
Agitateur industriel	Agitation	Watt/h	15	4.472	67.08	

IV.7 Proposition d'affinage par le processus combiné (cémentation/soude et dextrose)

Dans cette approche nous allons essayer de combiner les deux processus décrit en dessus afin de bénéficier du degré de pureté élevé obtenu dans la cémentation par le cuivre et la perte minime acquise dans l’affinage par la soude et le dextrose.

Le Protocole opératoire de ce processus d’affinage est représenté dans l’organigramme suivant :

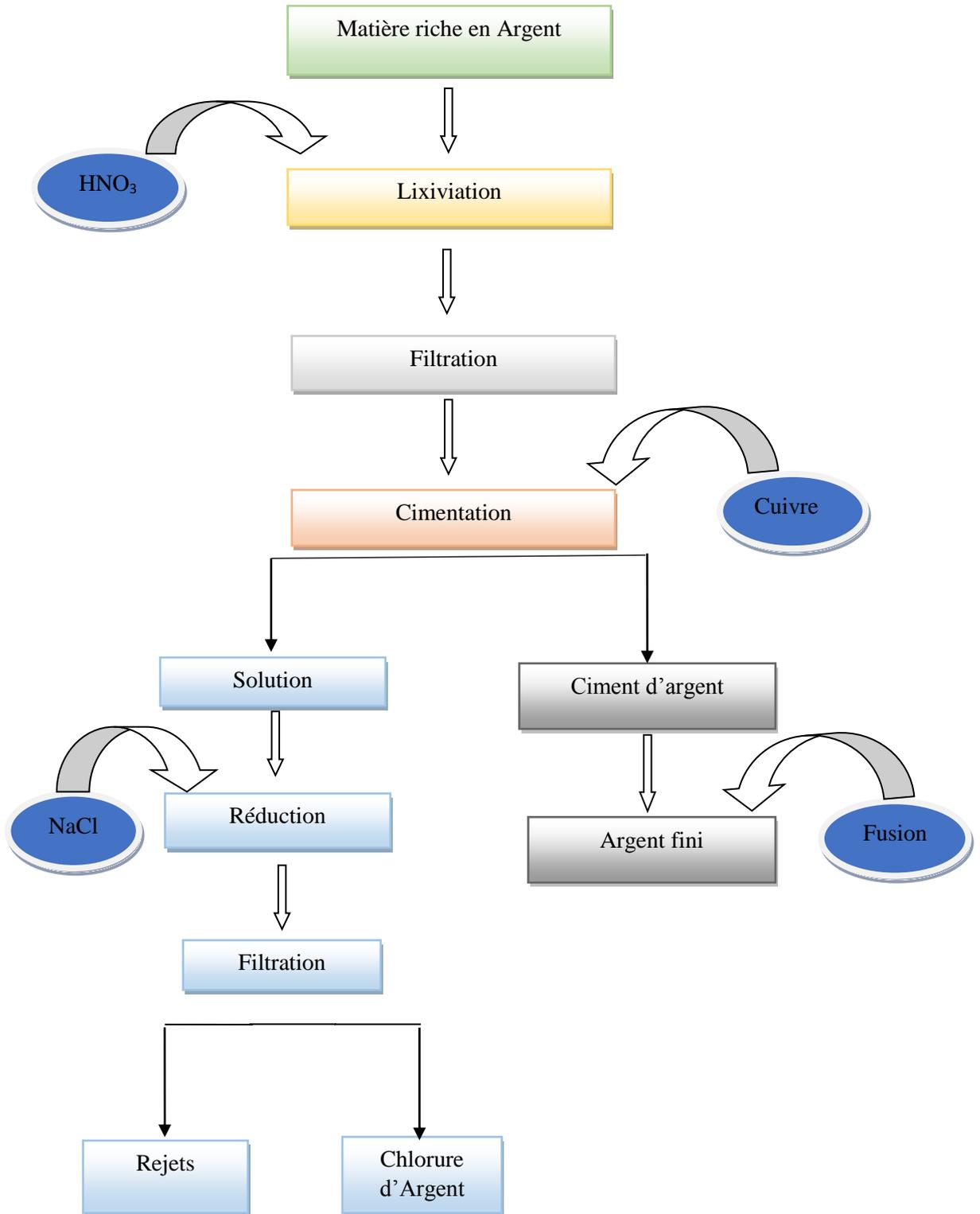


Figure IV.7.a : Organigramme du processus combiné d'affinage de l'Argent.

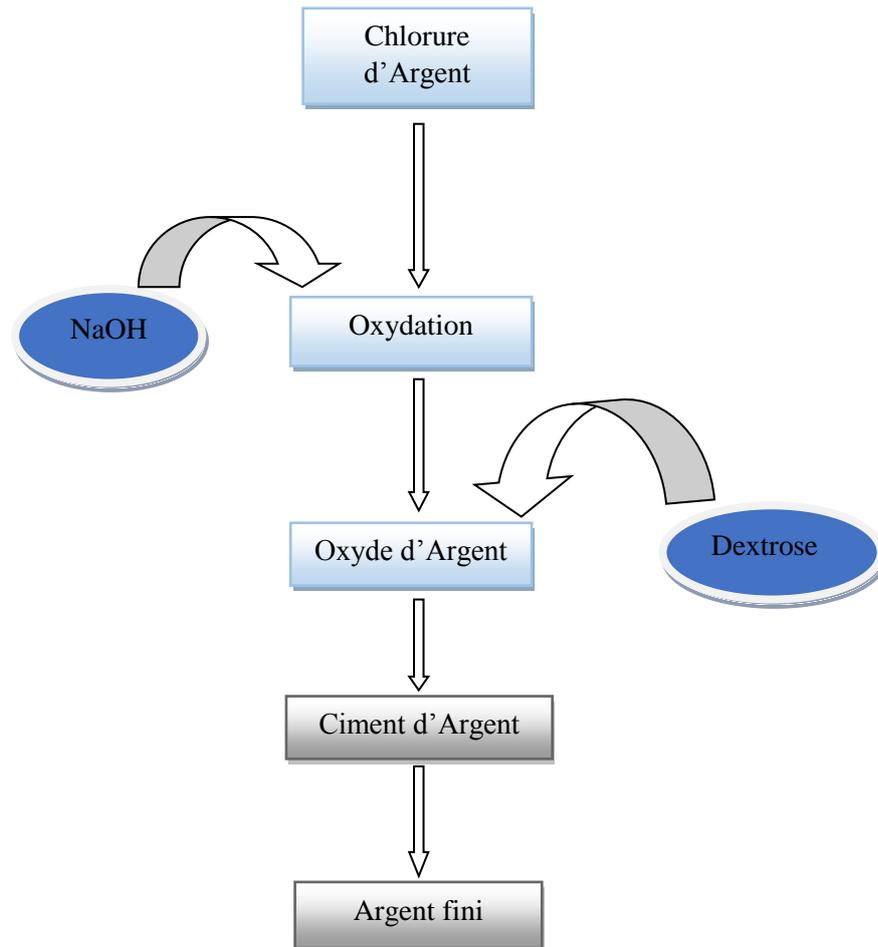


Figure IV.7.b : Organigramme du processus combiné d'affinage de l'Argent.

- Cet organigramme représente les étapes du processus combiné qui commence avec la cémentation de cuivre, ensuite la solution restante est traitée par l'ajoute de la soude et le dextrose pour récupérer l'argent restant.

IV.8 Conclusion

D'après nos essais et nos résultats on conclut que l'affinage de l'argent avec la soude caustique et le dextrose nous donne un degré de perte inferieur par rapport à l'affinage par cémentation de cuivre.

Par contre l'affinage de l'argent par cémentation de cuivre nous donne un degré de pureté plus élevé par rapport à l'affinage par la soude caustique et le dextrose.

Et pour cela nous avons proposé de combiner les deux processus pour avoir un taux de pureté plus élevé et une perte d'argent moindre.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous nous sommes initiés aux méthodes de traitement de l'or et de l'argent et ses affinages. Le principe consiste en la purification de l'or et de l'argent, jusqu'à un taux de pureté de 99,99%.

Nous avons effectué un stage au niveau de laboratoire d'AGENOR ce qui nous a permis de suivre les différents procédés de traitement en commençant par la réception de l'or sous forme d'un mélange, appelé bullions, jusqu'à l'obtention de l'or fin raffiné à 24carats.

Puis nous avons abordé l'optimisation des paramètres d'affinage de l'argent par deux processus ; le premier procédé s'agit d'un traitement par la soude caustique et le dextrose et le deuxième est une cémentation par le cuivre.

Concernant l'or, deux méthodes sont largement répandues à l'échelle industrielle pour son affinage parmi elles : la méthode chimique via l'attaque chimique par l'eau régale. Cette méthode chimique est celle qui est retenue et utilisée par AGENOR, cette méthode est basée essentiellement sur l'emploi de l'eau régale qui est composée de trois parts d'acide chlorhydrique HCl et d'une part d'acide nitrique HNO₃, pour obtenir une meilleure récupération d'or.

Avant de se lancer dans les différentes étapes de traitement de bullions, une estimation de la teneur théorique en or est exigée. Pour cela, une caractérisation physico-chimique s'est imposée en employant l'analyseur X.R.F. L'or étant un métal précieux, chaque étape de son affinage est fait avec un grand soin et rigueur.

Quant à l'argent nous avons utilisé deux méthodes de traitement une par la soude caustique et le dextrose et l'autre est une cémentation par le cuivre. Le principe de ces deux modes de traitement est la conversion des chlorures d'argent en argent métallique pur à 99,9% et un moindre taux de perte.

Le procédé de cémentation par le cuivre est soumis à certaines conditions pour avoir une cémentation complète avec une perte inférieure à celle acceptable dans ce genre de procédés qui est de l'ordre de 1%.

D'après notre travail, essais et résultats nous concluons que : Le paramètre d'ajout de NaOH 60% nous donne une moindre perte d'argent par rapport aux autres résultats, la quantité optimale d'après l'équation donnée par le graph, est 67,95% de NaOH. La teneur en Ag augmente avec l'augmentation des quantités de NaOH.

Pour le dextrose nos résultats de la perte d'argent sont très proches cela démontre que l'ajout de la soude est le paramètre essentiel et le dextrose joue le rôle d'un accumulateur.

Ils y a d'autres paramètres importants dans le processus de cémentation ; le paramètre de temps d'agitation, plus le temps d'agitation augmente plus on a une petite perte d'argent, aussi le paramètre économique d'affinage (les couts dans l'affinage par l'ajoute de la soude et le dextrose sont supérieures à l'affinage par la cémentation de cuivre), le mode statique et dynamique dans la méthode de cémentation avec le cuivre (le taux de perte dans le mode statique est supérieur à celui du mode dynamique).

Au vu de ces résultats, l'affinage de l'argent avec la soude caustique et le dextrose nous donne un degré de perte inférieur par rapport à l'affinage par cémentation de cuivre.

Par contre l'affinage de l'argent par cémentation de cuivre nous donne un degré de pureté plus élevé par rapport à l'affinage par la soude caustique et le dextrose.

Et pour cela nous avons proposé de combiner les deux processus pour avoir un taux de pureté plus élevé et une perte d'argent moindre.

Enfin, Les résultats de la teneur en or et en argent, montrent une parfaite concordance entre les valeurs expérimentales et celles issues par l'estimation théorique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Absi, F. (06/07/1994). Valorisation des minerais d'or d'AMESSMASSA. Hoggar, magister en génie minier, école national polytechnique, Algérie.
- [2] woods, B. (2014/2015). Etude des facteurs d'influence ducours de l'or,mémoire de master ,Belgique, pdf.
- [3] bijouterie en ligne. Récupéré sur Guide des bijoux en argent infos et conseils: www.vivalatina.fr.
- [4] Lucas Burel , L'OBS, Pour comprendre d'où vien l'or, publier le 28 Septembre 2015.
- [5] Bullion Volt, Les propriétés de l'or, (www.or.bullionvolt.fr).
- [6] Coup d'oeil sur les produits de base. (2016). CONFÉRENCE DES NATIONS UNIES SUR LE COMMERCE ET LE DÉVELOPPEMENT (p. 3). New york et genève: NATIONS UNES.
- [7] Or - Argent, Les plus gros producteur d'or du monde, (www.or-argent.eu).
- [8] CMO Rapport du conseil mondial de l'or 2016, La ruée vers l'or algérien (El-Ayam).
- [9] Sky Guide,Sydney Observatory - Powerhouse Museum, 2003.
- [10] L. D. Michaud, Gold extraction, 31 Aout 2016.
- [11] LAXEN P A, Development in the application of carbon in pulp to the recovery of gold from South Africa ores, juin 1979.
- [12] COUP D'OEIL SUR LES PRODUITS DE BASE. (2016). CONFÉRENCE DES NATIONS UNIES SUR LE COMMERCE ET LE DÉVELOPPEMENT (p. 10.11). new york et genève: NATION UNES.
- [13] Pelikan, W. (01/01/2008). Dans SEPT MÉTAUX (p. 78.85). Editions triades et aethera.
- [14] The Silver Institute. (2017, Septembre). Fiche de synthèse sur la criticité des métaux - L'argent - .
- [15] USGS. (2017, septembre). Fiche de synthèse sur la criticité des métaux - L'argent-

- [16] Metals Focus, 2015 UNEP 2011
- [17] Kitco. (2017, septembre). Fiche de synthèse sur la criticité des métaux - L'argent -.
- [18] ARGENT, métal. (s.d.). Récupéré sur universalis.fr:
www.universalis.fr/encyclopedie/argent-metal.
- [19] Argent métal. (2020). Récupéré sur www.argentmetal.com/argent-dans-les-catalyseurs.
- [20] Or-argent. (2017, octobre 23). La demande d'argent physique dopée par le photovoltaïque.
- [21] Dépollution, extraire de l'or naturellement
<https://afroculture.net/depollution-extraire-de-lor-naturellement-avec-des-plante>, 14/10/2020.
- [22] Peter Logeswari, S. S. (2012). synthesis of silver nanoparticules using plants extract and analysis of their antimicrobial property. 1.
- [23] Aziz, h., & Chergui , A. (2018/2019). Système de refroidissement,raport de stage à AGENOR.
- [24] stock d'or. (2020, 01 25). Récupéré sur www.algerie-eco.com.
- [25] Joaillerie, bijouterie-dosage de l'or dans les alliages d'or pour la bijouterie-joaillerie-méthode de coupellation (essai au feu), NORME INTERNATIONALE, ISO11426, AGENOR 2015.
- [26] Mahmoud, M., & Chemali , S. (2018). Traitement de minerais d'or . Amesassa(Hoggar), Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Minier, Ecole Nationale Polytechnique.

ANNEXES

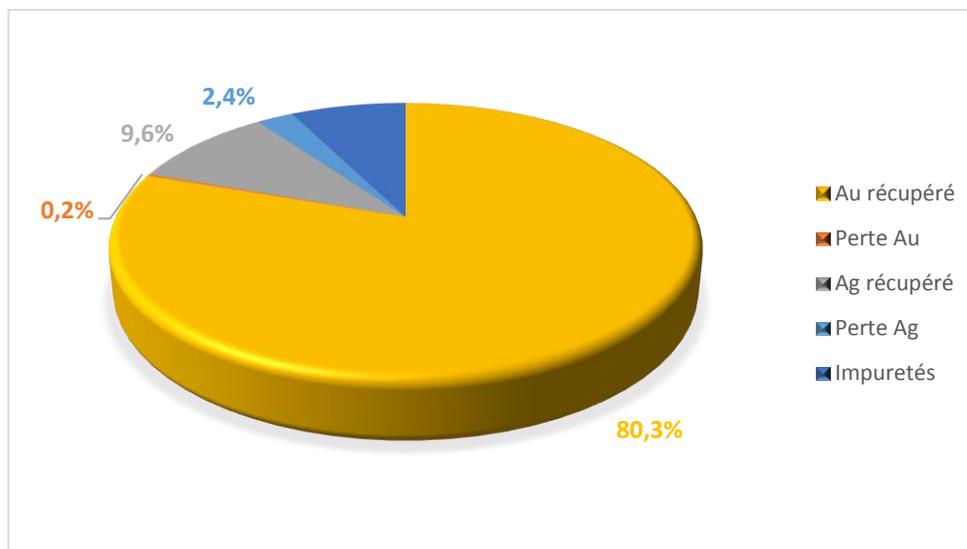


Figure 1 : Les pourcentages des poids finaux.



Figure 2 : Les matras d'essayeurs.



Figure 3 : Le ciment d'argent.



Figure 4 : Creusé a recuit.

Calcul de la perte en argent

Poids argent fin à récupérer(g) = [Poids de brasure(g)*Teneur Ag(%)] /100.

Poids argent fin(g) = [poids argent récupéré(g)*Teneur Ag(%)]/100.

Perte(g)= poids argent fin à récupérer(g) - Poids argent fin(g).

Résumé

L'affinage de l'or et l'argent sont les principaux processus qui s'opèrent à l'agence nationale pour la transformation et la distribution des métaux précieux, AGENOR.

C'est une opération qui signifie la purification ou séparation des métaux précieux en les amenant à un très haut degré de pureté (99,99%).

Dans cette étude nous allons présenter une méthode pour l'affinage de l'or (la méthode chimique via l'eau régale), et deux méthodes pour l'optimisation des paramètres de l'affinage de l'argent (affinage par la soude caustique et le dextrose et l'affinage par cémentation de cuivre).

Mots clés : Or, Argent, affinage, optimisation.

Abstract

The refining of gold and silver are the main processes that take place at the national agency for the processing and distribution of precious metals, AGENOR.

It is an operation, which means the purification or separation of precious metals by bringing them to a very high degree of purity (99.99%).

In this study we will present a method for refining gold (the chemical method via aqua regia), and two methods for optimizing the parameters of silver refining (refining by caustic soda and dextrose and refining by cementation of copper).

Keywords: Gold, Silver, refining, optimization.

ملخص

تكرير الذهب والفضة هي العمليات الرئيسية التي تتم في الوكالة الوطنية لمعالجة وتوزيع المعادن الثمينة، AGENOR

إنها عملية تعني تنقية أو فصل المعادن الثمينة بجلبها إلى درجة نقاء عالية جدًا (99.99%). في هذه الدراسة سوف نقدم طريقة لتكرير الذهب (الطريقة الكيميائية عن طريق الماء الملكي)، وطريقتين لتحسين معاملات تكرير الفضة (التكرير بالصودا الكاوية وسكر العنب والتكرير بتدعيم النحاس). الكلمات المفتاحية: ذهب، فضة، تكرير، تحسين.