

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : MINES ET METALLURGIE

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

ESSAI DE CYANURATION DIRECTE DU MINERAL
AURIFERE PROVENANT DU GISEMENT DE
HANANE (HOGGAR)

Etude comparative du pouvoir d'adsorption du charbon actif, du
mélange charbon actif-bentonite et de la bentonite

Proposé par :

M. BOURAHLA

Etudié par :

M. DJILLALI

A. GHANEMI

Dirigé par :

M. BOURAHLA

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : MINES ET METALLURGIE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES.
(Ingéniorat)

ESSAI DE CYANURATION DIRECTE DU MINERAI AURIFERE
PROVENANT DU GISEMENT DE HANANE (Hoggar).

Etude Comparative Du Pouvoir D'Adsorption Du Charbon
Actif, Du Mélange Charbon Actif-Bentonite Et De La
Bentonite.

Proposé et Dirigé par :
M. BOURAHLA.

Etudié par :
M. DJILLALI.
A. GHANEMI.

REMERCIEMENTS

On désire, tout particulièrement, exprimer notre vive gratitude à Monsieur BOURAHLA, pour les nombreux conseils, directives et orientations qu'il nous a apporté tout au long de cette étude.

On tient aussi à témoigner notre reconnaissance à Monsieur SAADA, chef du département, pour son aide et pour son serviabilité.

Nos remerciements vont aussi au personnel (responsables, bibliothécaires, analyste-chimistes ...) du laboratoire central de l'E.R.E.M (Boumerdès), pour les moyens de travail mis à notre disposition.

Les Etudiants.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	7
PARTIE THEORIQUE	8
<u>CHAPITRE I</u> : GENERALITES SUR LA METALLURGIE DE L'OR	9
A) Propriétés de l'Or et de l'Argent	9
a) Propriétés de l'Or	9
b) Propriétés de l'Argent	11
B) Gisements aurifères	11
a) Nature des gisements	12
b) Disposition de l'Or	12
C) Traitements préliminaires des minerais aurifères	13
a) Fragmentation	13
b) Gravimétrie	14
c) Flottation	14
d) Grillage	15
D) Procédés d'extraction de l'Or	15
a) Gravimétrie	15
b) Amalgamation	16
c) Chloruration	16
d) Cyanuration	17
E) Affinage	17
a) Séparation par le chlore	17
b) Affinage électrolytique	18
<u>CHAPITRE II</u> : CYANURATION	19
A) Les cyanures alcalins	19
B) Principe de la cyanuration : Etablissement de l'équation de l'Elsner	20
C) Action des cyanures alcalins sur les métaux	20
D) Paramètres de dissolution	20
a) Alcalinité du milieu	21
b) Apport de l'Oxygène	21
c) Concentration en cyanure	21
d) Temps de contact	21
e) Granulométrie	22
f) Agitation	22
g) Température et pression	22

E) Mise en solution	22
a) Lixiviation en tas et par percolation	22
b) Lixiviation avec agitation	23
F) Traitement des rejets	23
G) Traitement de la liqueur aurifère	23
a) Cémentation	23
b) Adsorption par le charbon actif	24
CHAPITRE III : CHARBON ACTIF, BENTONITE ET ADSORPTION.....	25
A) Généralités sur l'adsorption	25
a) Définitions.....	26
b) Chaleur d'adsorption	27
c) Courbe d'équilibre	27
d) Vitesse d'adsorption	28
e) Nature de l'adsorbant	28
f) Nature du solvant	29
g) Nature de l'adsorbat	29
h) Pratique de l'adsorption	30
i) Désorption	31
B) Charbon actif	31
a) Préparation	31
b) Types de charbon actif	32
c) Caractéristiques du charbon actif	33
d) Spectre d'utilisation et applications	33
e) Régénération	34
C) Bentonite naturelle	35
a) Origine	35
b) Propriétés physiques et chimiques.....	35
c) Composition et structure	36
d) Sélectivité	36
e) Capacité d'échange	37
f) Applications	37
CHAPITRE IV : APPLICATION DE L'ADSORPTION A LA	
 METALLURGIE DE L'OR.....	39
A) Mode d'adsorption	39
B) Mode de désorption	40
C) Avantages techniques et économiques	40

<u>CHAPITRE V</u> : TECHNIQUES D'ANALYSE QUANTITATIVE	42
A) Analyse du minerai brut : Application de la Docimasié	42
a) Principe	42
b) Avantages et inconvénients	42
B) Analyse de la solution aurocyanurée : Application de la spectrophotométrie d'absorption atomique ..	43
a) Principe de l'analyse par absorption	43
b) Description d'un spectrophotomètre de flammes ..	43
c) Fonctionnement d'un spectrophotomètre de flammes ..	44
d) Courbe d'étalonnage	44
e) Avantages et inconvénients	45
f) Limites de détection et précision	45
g) Conditions d'absorption de l'Or	45
h) Conditions d'absorption de l'Argent	45
PARTIE EXPERIMENTALE	46
<u>CHAPITRE VI</u> : ESSAI EXPERIMENTAL	47
A) Généralité	47
a) Présentation	47
b) Objets	47
B) Instruments et dispositifs	48
a) Broyeur	48
b) PH- mètre	49
c) Agitateur	49
d) Spectrophotomètre de flammes	50
C) Produits et réactifs	50
a) Minerai aurifère de Hanane	50
b) Cyanure de sodium	50
c) Chaux vive	50
d) Eau oxygénée	51
e) Charbon actif	51
f) Bentonite naturelle	52
g) soude caustique	52
h) Ethanol	52
D) Courbe d'étalonnage de l'Or et de l'Argent	52
E) Pratique de la cyanuration directe	53
a) Mode opératoire	54
b) Résultats	56
c) Discussion	58
F) Traitement de la liqueur aurocyanurée	59
a) Modes opératoires	60
b) Résultats	63
c) Interprétation	67
CONCLUSION	70
INDEX BIBLIOGRAPHIQUE	73

INTRODUCTION

الطبعة الوطنية الثانية
المكتبة —
BIBLIOTHEQUE —
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION

Depuis un peu plus d'une décennie, on ne cesse de révéler l'existence de trésors cachés dans le sol Algérien: De l'Or en Algérie ! Qui l'avait cru ? Les découvertes quasi-certaines de gisements aurifères (Boudouaou, Tirek, Amesmessa, Tirriline,...) sont le début du labeur; elles sont suivies d'études poussées (analyses des échantillons, travaux géologiques, géophysiques, ...), afin d'évaluer l'importance de chaque gisement.

Parallèlement une étude technologique doit être faite : Il s'agit de déterminer les méthodes de concentration les plus efficaces correspondant à chaque type de minerai.

Notre besoin essentiel dans ce mémoire est de participer, en quelque sorte, à une telle étude : Le minerai d'Or en provenance de Hanane (Hoggar) se prête-t-il bien à la cyanuration directe ? Laquelle permet une extraction maximale (plus de 90 %), si toutefois les particules d'Or sont suffisamment fines.

D'autre part, la métallurgie de l'Or moderne tend à abandonner la technique classique (cémentation)—qui est prohibitive—dans le traitement des liqueurs aurifères (surtout en Afrique du Sud et aux Etats Unis), pour y faire intégrer le procédé d'adsorption par le charbon actif, qui a connu un progrès considérable. Des recherches scientifiques sont en cours, qui visent à améliorer davantage la rentabilité de ce procédé.

Avec cet esprit qu'on met en application cette idée, que nous considérons comme originale : La bentonite peut-elle être associée au charbon actif pour ^{une} éventuelle récupération encore plus importante ?

Enfin, on s'est efforcé à présenter un travail correct, clair, précis, cohérent et logique, que ce soit lors de l'élaboration du plan ou dans la rédaction de ce mémoire, qu'on juge, tout de même comme modeste et qui est, à coup sûr, imparfait.

IPARTIE

THE(D)IRI (RIE

CHAPITRE I: GENERALITES SUR LA METALLURGIE DE L'OR.

Dans ce chapitre on essaye de donner un aperçu général, donc peu détaillé, sur les procédés d'élaboration de l'or, depuis son origine, jusqu'à sa purification, pour en avoir une vue claire.

En outre, on juge important de mentionner, tout d'abord, les propriétés de l'or, qui sont des connaissances indispensables pour tout traitement de minerais.

De même ordre d'idée, on décrit brièvement, les propriétés de l'argent car il accompagne presque toujours l'or, dans les minerais aurifères.

A) Propriétés de l'or et de l'Argent.

L'or, l'Argent et le platine sont les métaux précieux par excellence. L'Argent est classé dans ce groupe, bien qu'il se ternit à la longue.

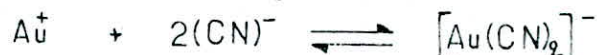
Cette catégorie de métaux, sont inaltérables, présentent un éclat très vif qu'ils conservent indéfiniment, en plus, ces métaux sont rares. L'ensemble de ces qualités leur confère une grande valeur.

a) Propriétés de l'Or

Les propriétés les plus importantes de l'or sont:

- L'or est un métal jaune, brillant et présente un éclat très vif.
- Il est très dense: $\rho = 19,3 \text{ g/cm}^3$ à 20°C ; $\rho = 17,0 \text{ g/cm}^3$ à 1063°C .
- Masse atomique: $M = 197,0 \text{ g}$; Numéro atomique: $N = 79$; Structure cristalline: cubique à faces centrées.
- L'or pur est un métal relativement mou: il est le plus malléable et le plus ductile des métaux.

- De tous les métaux, il est le moins électropositif. Ce caractère de "métal noble" entraîne une certaine inertie chimique.
- Il est inoxydable même à température élevée. Exposé à l'air, même humide, il conserve indéfiniment son éclat.
- Présente une passivité vis-à-vis des acides usuels.
- Il n'est attaqué que par le chlore, le phosphore, l'arsenic, les cyanures, l'eau régale et certains oxydants en milieu chlorhydrique ou sulfurique.
- L'or dans ces combinaisons, est monovalent ou trivalent.
- En solution, il a tendance à s'engager dans des ions complexes. Les complexes de l'or monovalent admettent généralement la coordination 2.
- De tous les dérivés de l'or monovalent, le cyanure est le plus apte à se complexer en solution aqueuse:



- Le mercure dissout facilement l'or à la température ordinaire, il forme avec lui un amalgame, décomposable par distillation.
- Il fond à 1063 °c. A des températures relativement élevées, il s'allie à l'argent ou au cuivre, en toutes proportions. D'autres métaux (Zn, Pb, Fe) et certains sulfures (Cu_2S) peuvent jouer le rôle de solvants vis-à-vis de l'or et de l'argent.
- L'électrolyse de l'or présente une certaine difficulté due à la tendance de ce métal à se passiver. En pratique, il ne pourrait pas se dissoudre en l'absence de certains ions comme Cl^- et CN^- .
- Enfin l'or est l'étalon monétaire international. L'or pur a des utilisations restreintes, sa résistance ^à la traction et sa dureté étant peu élevées; on l'emploie ^à pour son inoxydabilité à chaud et son excellente résistance à l'action corrosive de certains milieux. Il est surtout utilisé allié avec le Cu, Ag, Pr, et le Ni.

b) Propriétés de l'Argent.

La plupart des propriétés chimiques de l'argent sont identiques à celles de l'or par le fait qu'ils ont la même couche électronique périphérique (dans le tableau périodique, ils sont disposés sur une même colonne.)

L'Argent fondu est un métal blanc; très malléable; de densité $10,5 \text{ g/cm}^3$ à $20 \text{ }^\circ\text{C}$; Fusible à $962 \text{ }^\circ\text{C}$; il se place en tête des métaux par ses conductibilités thermique et électrique.

Comme pour l'or, l'Argent est attaqué par les cyanures, chlore... Se **dissout** dans le mercure pour donner un amalgame. Il s'allie surtout avec le plomb.

L'acide nitrique (HNO_3) attaque l'Argent et il se forme du nitrate d'Argent (AgNO_3). De même, l'acide sulfurique l'attaque à chaud. L'Argent est un métal trop mou et trop difficile à couler pour qu'on puisse l'utiliser à l'état de pureté; aussi le mélange-t-on presque toujours à du cuivre.

B) Gisements aurifères:

L'or se rencontre, dans la nature, sous forme de petites particules (pépites). Il peut constituer l'élément principal ou l'élément secondaire, parfois important, à des minerais de Cuivre, de Plomb, de Zinc ou d'Argent.

Nous, dans ce paragraphe et plus loin, on ne prend en considération que le premier type de minerai, c'est-à-dire les minerais aurifères proprement dit.

a) Nature des gisements.

On distingue les gisements primaires (d'origine magmatique) et les gisements secondaires (formés par la décomposition des roches en place.)

Les gisements primaires sont d'une extrême diversité, chacun ~~de~~ d'eux constituant en fait un cas particulier dont le minerai nécessite un traitement adapté.

Les gisements secondaires sont particulièrement importants. Métal inaltérable, l'or peut-être libéré lors de la destruction des roches aurifères, puis transporté et concentré dans des sites privilégiés, les "placers". Ces phénomènes se sont produits à toutes les époques géologiques.

En Afrique du sud, le witwatersand, plus connu sous le nom de Rand, serait un placers fossile, il assure plus de la moitié de la production mondiale actuelle et recèle environ la moitié des réserves recensées.

b) Disposition de l'or:

Les minerais d'or présentent deux caractéristiques générales. D'une part, l'or y est pratiquement toujours présent sous sa forme métallique, souvent allié à l'Argent, parfois au tellure, mais rarement lié chimiquement aux éléments associés. D'autre part, les teneurs des minerais exploités sont toujours très basse, dépassant rarement 10g/t.

Du point de vue de la métallurgie extractive, on classe les minerais en fonction des associations de l'or, avec d'autres éléments, d'où résulte la plus ou moins grande difficulté de son extraction.

b,1) Or libre: Lorsqu'il n'est pas inclus dans d'autres minéraux, l'or est particulièrement facile à extraire, par simple séparation gravimétrique, amalgamation ou cyanuration directe.

b,2) Or associé à des sulfures de Fer: Disséminé sous forme de très fines particules dans les cristaux de pyrite ou de pyrothine, son extraction nécessite un processus déjà plus complexe, comportant en général une préconcentration et une calcination des concentrés suivies de cyanuration.

b,3) Or associé à des minerais d'arsenic ou d'antimoine: La présence de ces éléments rend le traitement encore plus difficile et le processus classique (concentration, calcination, cyanuration) peut conduire à de trop faibles rendements d'extraction pour permettre une exploitation économique.

C) Traitements préliminaires des minerais aurifères.

Le choix des opérations de traitements préliminaires, dépend, évidemment, de la nature du minerai et de la disposition de l'or dans le minerai. Ces principaux modes de traitement sont:

a) Fragmentation

Si le minerai était initialement en blocs, un concassage préalable est nécessaire.

Le broyage complète l'action du concassage; il réduit le minerai en particules fines dont la granulométrie choisie dépend de la méthode de concentration pratiquée ultérieurement. (se reporter au chapitre suivant).

Le broyage se fait habituellement par voie humide, car il exige moins d'énergie et ne produit pas de poussières.

Le broyage a pour objet la libération de l'or (et de l'argent).

b) Gravimétrie.

Lorsque l'or est libre dans le minerai et se présente sous forme de particules assez grosses ($>75 \mu\text{m}$), ces méthodes sont particulièrement simples et efficaces en raison de la masse volumique très élevées du métal.

Les appareils et dispositifs sont peu coûteuses en investissements et en frais d'exploitation, elles permettent, dans des conditions favorables (gisements alluvionnaires), d'exploiter des gisements à très faible teneur, de l'ordre de $1\text{g}/\text{m}^3$.

Notons que, en plus de la gravimétrie par voie humide, il est possible d'effectuer cette méthode à sec (utilisation des tables pneumatiques).

Etant donné la valeur de l'or et les pertes inévitables entraînées par tout traitement ultérieur, on essaye de capter le plus rapidement possible les grosses particules avant de les traiter par un autre procédé.

c) Flottation.

Lorsque l'or est associé à des sulfures métalliques, la concentration du minerai par flottation est très généralement employée.

Il s'agit le plus souvent d'une flottation simple, visant à séparer un concentré de sulfures enrichi en or.

Lorsque le minerai contient à la fois de l'or libre et de l'or associé aux sulfures, la flottation sera conduite pour récupérer au mieux, dans les concentrés l'or libre et les sulfures.

bien entendu, si la proportion d'or libre est importante, celui-ci sera d'abord extrait par voie gravimétrique, dans la mesure où sa granulométrie le permet.

d) Grillage.

Dans le cas de nombreux minerais complexes, un grillage avant récupération par extraction hydrométallurgique est essentiel pour obtenir un taux d'extraction satisfaisant des métaux précieux.

Les types de minerais nécessitant un tel traitement sont notamment ceux qui contiennent de la pyrite, de la pyrrhotine, du mispikel, de la stibine ou des sulfotellurures.

Le grillage vise essentiellement à obtenir un produit calciné plus ou moins poreux, facilitant ainsi la mise en solution de l'or au cours du traitement hydrométallurgique ultérieur.

D) Procédés d'extraction de l'or.

A part la cyanuration, les méthodes exposées ci-dessus sont à peu près abandonnées ou utilisées de façon combinée.

En effet, dans les installations existantes, nous pouvons trouver par exemple:

- Gravimétrie suivie d'amalgamation.
- Gravimétrie suivie d'amalgamation et de cyanuration.
- Flottation suivie de cyanuration, etc.

Mais on applique la cyanuration seule.

a) Gravimétrie

La gravimétrie n'est employée actuellement que comme un moyen de préconcentration (paragraphe (C), subdivision (b)); alors que jadis, elle était la technique universelle d'extraction; sinon elle est encore utilisée artisanalement par les orpailleurs, surtout lorsque les gisements s'y prêtent, ce qui est notamment

le cas pour les gisements alluvionnaires (placers).

b) Amalgamation.

L'amalgamation est considérée comme un procédé de dissolution. En effet comme on l'a vu précédemment, elle est fondée sur l'aptitude de l'or métallique à s'allier au mercure pour former des amalgames décomposables par distillation. Sous forme métallique, l'Argent possède également cette propriété et est extrait simultanément.

Si l'or est soluble dans le mercure et s'il peut former avec ce dernier des composés définis, le procédé n'est applicable, en pratique, qu'en présence d'eau. La pénétration et la digestion de l'or (et de l'argent) par le mercure, qui requièrent certaines conditions (propreté des surfaces métalliques, absence d'impuretés nuisibles), sont facilitées par des actions superficielles, en particulier par la tension superficielle interfaciale eau-mercure.

Largement employée dans le passé, l'amalgamation est devenue une technique marginale, mais reste parfois utilisée, lorsque la nature du minerai le permet, notamment si les pépites sont grossières. Pour extraire l'or libre en tête du schéma de traitement, généralement après une première concentration gravimétrique.

c) Chloruration.

C'est un procédé hydrométallurgique, basé sur l'action dissolvante du chlore gazeux, en présence d'eau, sur l'or renfermé dans les espèces minérales. Cette dissolution donne le chlorure $AuCl_3$, qui est, par la suite réduit par $FeCl_2$.

La chloruration est totalement abandonnée, la cyanuration a pris sa place.

d) Cyanuration.

Elle est aussi une méthode hydrométallurgique, basée sur la dissolution, sélective et préférentielle de l'or par complexation, aux cyanures. Elle permet une très bonne récupération (plus de 90%). On reviendra, pour les détails, au chapitre suivant.

E) Affinage

Quel que soit le traitement mis en oeuvre, on obtient finalement un lingot "doré" (lingot impur d'or et d'argent) qui contient encore, outre les métaux précieux, quelques impuretés (jusqu'à 5%) essentiellement métallique, et qu'il faudra affiner pour éliminer celles-ci et séparer l'or (et l'Argent).

La composition du produit à affiner et la nature des impuretés jouent un rôle essentiel dans le choix du procédé à adopter, parmi les trois méthodes classiques de séparation succinctement décrites ci-après:

a) Séparation par le chlore.

Le doré est fondu et traité à 1150 °c par du chlore injecté dans le métal en fusion par des tubes de céramique qui plongent dans le bain. A cette température le chlore attaque successivement les impuretés métalliques et l'argent.

Le fer, le plomb et le zinc s'éliminent d'abord sous forme de chlorures gazeux qui seront condensés et retraités pour récupérer les traces d'or entraînées. Le cuivre et l'argent, réagissent ensuite et donnent des chlorures liquides qui sont séparés par gravité **et recueillis pour en extraire l'argent et les traces d'or.**

En fin d'opération, on détermine la teneur résiduelle en Argent sur un échantillon par fluorescence et l'injection de chlore est arrêtée dès que cette teneur est inférieure à 0,35%.

L'or affiné, de titre supérieur à 99,5% , est généralement coulé en barres de 12,5 Kg. Le procédé permet, techniquement, de produire de l'or à plus haut titre, jusqu'à 99,99%, mais dans des conditions peu économiques.

b) Refinage électrolytique.

Un procédé électrolytique est également utilisé pour obtenir de l'or à très haute pureté, en particulier lorsque le métal contient des traces de métaux de la famille du platine, qui ne sont pas éliminées par le chlore.

L'électrolyte est une solution de chlorure d'or (H Au Cl), obtenue en dissolvant de l'or métallique dans l'acide chlorhydrique en présence de chlore gazeux, à 70°C . On opère dans des cellules de céramique. Les anodes sont constituées par le métal à purifier, l'or fin se déposant sur la cathode, préparée avec du métal pur. On opère sous 0,5 à 0,7 v, avec une densité de courant anodique de l'ordre de 600 A/m. On peut ainsi produire de l'or à 99,99% à partir de métal contenant jusqu'à 1,5% d'Argent.

* : * *

Références : (1); (2); (3); (4); (5).

CHAPITRE II :CYANURATION

L'action dissolvante des cyanures, connue depuis longtemps n'a été utilisée industriellement, dans le traitement des minerais aurifères, que vers la fin du XIXe siècle.

Le but de ce traitement est de séparer l'or (et l'Argent) de la gangue, par une mise en solution, pour une extraction adéquate ultérieure.

La cyanuration, méthode d'extraction par voie humide, utilise les cyanures alcalins _ donc, c'est un procédé de lixiviation basique pour dissoudre, de préférence, l'Or (et l'Argent), par complexation.

La cyanuration n'est appliquée, pour un minerai donné, que dans la mesure où les grains sont fins; dans le cas contraire, l'amalgamation est préférable.

Si la nature du minerai le permet, elle est parfois utilisée immédiatement après le broyage, c'est ce qu'on appelle: la cyanuration directe. Sinon, elle est couplée à d'autres procédés préliminaires et éventuellement à l'amalgamation.

A) Les cyanures alcalins.

Les cyanures alcalins utilisés dans l'extraction de l'Or sont: le cyanure de sodium (NaCN) ou le cyanure de potassium (KCN). Ce sont des sels blancs; présentant l'odeur de l'acide cyanhydrique; très solubles dans l'eau, donnent des solutions basiques; ont une grande facilité de libérer les ions CN⁻ et ils ont tendance à dégager de l'acide cyanhydrique, dans ce milieu aqueux:



dont l'équilibre est fonction du PH.

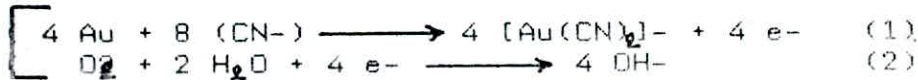
En outre, si le gaz carbonique est présent dans ce milieu, il décompose ces sels en acides carboniques (H₂CO₃) et en ammoniac (NH₃).

Il est impossible de récupérer ces sels dans leur utilisation en métallurgie de l'Or. Cependant, on préfère l'usage de NaCN sur KCN, car ce dernier est coûteux et renferme moins de CN utile par unité de poids.

Enfin, par mémoire, on rappelle que les sels cyanures et l'acide cyanhydrique, sont pour l'homme des poisons les plus fulgurants.

B) Principe de la cyanuration : Etablissement de l'équation d'Elsner.

L'action des ions CN^- provoque l'oxydation de l'Or (et de l'Argent) en présence de l'oxygène, en milieu aqueux, pour donner des ions complexes auro-cyanurés solubles (argento-cyanurés). Les deux demi-réactions d'oxydo-réduction qui ont eu lieu sont :



pour avoir la réaction globale :



Si on engage NaCN , on aura :



Des réactions (1) et (2), on peut dire que l'Or n'est sans doute pas attaqué par une solution de cyanure exempté d'oxygène. Cette passivité s'explique par le fait que les électrons émis au cours de la formation des ions $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ ne peuvent exister à l'état libre et ne trouvent aucun oxydant susceptible de les capter.

On observe aussi, de l'équation d'Elsner (4), que le PH de la solution aura tendance d'augmenter au cours de la réaction (formation de la soude); on doit opérer d'ailleurs à un PH supérieur à 10.

C) Action des cyanures alcalins sur les métaux.

Les pertes de réactifs dues aux métaux lourds renfermés dans le minerai peuvent être importantes. Les minéraux métalliques, qui s'unissent, en milieu cyanuré, directement aux ions CN^- , donnent des cyanures complexes plus ou moins stables.

En règle générale, la stabilité de ces complexes est liée au PH du milieu.

Le Fer et le Cuivre présents sous forme de sels solubles dans les minerais aurifères, donnent respectivement : le Ferrocyanure $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ et le cuivrocyanure $[\text{Cu}(\text{CN})_3]^-$; sont particulièrement gênants puisqu'ils sont très stables.

D) Paramètres de dissolution.

Le procédé de cyanuration est quasiment simple, mais devant satisfaire aux facteurs ci-dessous.

On est obligé d'optimiser, pour chaque minerai aurifère donné, les valeurs relatives aux paramètres de dissolution. Toutefois, on peut les définir d'une manière approchée. Du côté industriel, optimiser un procédé de lixiviation, consiste à définir les conditions rendant la vitesse de dissolution et le rendement de l'opération maximaux pour un prix de revient minimal.

Dans ce qui suit, concerne principalement la lixiviation avec agitation (mais la plupart des paramètres - comme : l'alcalinité; la concentration, la granulimétrie; la température - dans une large mesure, restent valable pour la lixiviation sur colonnes).

a) Alcalinité du milieu.

Le réglage du milieu où se déroule la dissolution est indispensable. Sa basicité doit être telle qu'elle empêche la décomposition du cyanure, stabilise le complexe aurocyanuré, évite la formation d'autres complexes.

On opère à un PH = 10,3 à 10,5 ; pour se faire, on ajoute soit de la soude, soit de la chaux, mais on utilise cette dernière en raison de son coût et de son très rapide action.

b) Apport de l'oxygène.

Comme on l'a vu lors de l'établissement de l'équation d'Elsner; sans oxygène, il n'y aura jamais dissolution de l'Or; l'apport de l'oxygène est d'une importance capitale.

Pour un minerai de teneur en Or moyenne, des calculs ont montré qu'une dizaine de mg d'oxygène par litre suffisent. Cependant on injecte davantage, car il y a plus ou moins désoxygénation par les composés ou ions réducteurs résultants de la décomposition des espèces minérales.

L'apport de l'oxygène se fait par introduction dans la pulpe de l'air ou de l'oxygène sous pression (barbotage) ou par addition d'un oxydant (par exemple : l'eau oxygénée).

c) Concentration en cyanure.

Les solutions de cyanure alcalin réagissent également sur d'autres métaux (Cf. paragraphe C). Pour limiter cette action, et compte tenu de l'affinité particulière de l'ion cyanure pour l'Or, il faut utiliser des solutions très diluées; on est limité dans cette voie par la difficulté de reprecipiter l'Or après dissolution.

La concentration des solutions utilisées dans la cyanuration de l'Or (et de l'Argent) varie avec le type et la teneur en métaux précieux des minerais traités : avec les minerais aurifère, elle est en général supérieure à la valeur optimum (0,05 % de NaCN) et peut atteindre 0,10 % de NaCN. Avec un rapport solide-liquide généralement égal à 1/3.

d) Temps de contact.

La vitesse de réaction est faible et un temps de séjour prolongé (24 à 48 heures) est nécessaire pour obtenir un taux d'extraction satisfaisant.

La dissolution est toujours plus lente en fin d'agitation. Un temps de contact de 24 heures suffit pour dissoudre environ 90 % d'Or, et qu'au delà de ce temps, la récupération est faible et atteint même un certain équilibre.

e) Granulométrie.

La taille des particules et la libération du métal noble est d'une importance primordiale : La cyanuration ne donnera-t-elle, en général, d'excellents résultats que si l'Or est fin et uniforme.

Si la lixiviation se fait avec agitation, la finesse augmente la vitesse de dissolution et le rendement s'élève du fait de la meilleure accessibilité des grains à se dissoudre. En plus, la pulvérisation poussée du minerai doit permettre le maintien des particules en suspension pendant l'agitation.

f) Agitation.

L'agitation a pour rôle l'activation de la dissolution, en maintenant en suspension la pulpe par brassage continu; et qui assure aussi, la répartition uniforme, dans cette pulpe, de l'air injecté, de l'Or et du cyanure.

g) Température et pression.

Bien que la vitesse de dissolution de l'Or et de l'Argent augmente avec la température, le réchauffage des liqueurs est évité, car il favorise l'attaque des métaux communs, et réduit en même temps, la stabilité du cyanure de sodium et la stabilité de l'oxygène.

Aussi la pression partielle de l'oxygène augmente l'oxydation de l'Or et par suite sa solubilité.

E) Mise en solution.

On distingue deux types de lixiviation :

a) Lixiviation en tas et par percolation.

Qui est d'une application récente, surtout massivement aux Etats-Unis. Elle est surtout apte si la gangue du minerai est poreuse.

Dans les installations de traitement, ce procédé consiste à disposer convenablement des tas de minerai allant de plusieurs milliers à un million de tonnes sur une aire imperméable, à les arroser de solution cyanurée pour en dissoudre par percolation l'Or (et l'Argent) et à recueillir la solution riche à la base du tas; après adsorption ou cémentation de la solution (paragraphe G de ci-dessous), la solution est recyclée finalement sur les tas.

Ce recyclage est répété jusqu'à ce que la teneur du minerai atteigne son minimum déterminé par la pratique. La durée de lixiviation va de quelques semaines à plusieurs mois et le rendement d'extraction de 40 à 85 % sur des minerais allant

de 8 g/t à moins de 1 g/t d'Or.

Les conditions essentielles à respecter pour le minerai sont que l'Or soit libéré dans du minerai d'une bonne porosité et que la proportion de parties fines inférieures à 150 μm soit faible (moins de 10 %); lors de la construction du tas, il faut éviter la ségrégation des particules fines et des grossières qui entraverait la circulation uniforme de la liqueur cyanurée.

Le succès de cette technique provient de sa simplicité et son faible coût d'investissement comparé au procédé avec agitation.

b) Lixiviation avec agitation.

Revoir le paragraphe (D) sur les paramètres de dissolution.

La réaction de dissolution, dans les installations de traitement, est obtenue dans une série de cuves de réaction, parfois séparées par un épaississage et une filtration, suivie d'un changement de solution.

Il est probable que la cyanuration commence, dans le cas où elle est appliquée directement, dès l'étape du broyage (broyage cyanurant).

La lixiviation avec agitation permet une dissolution rapide de l'Or, mais elle demande un investissement coûteux en installations et en énergie.

F) Traitement des rejets.

Les cyanures sont des produits dangereux dont il faut protéger l'environnement. Les eaux de procédé sont recyclées, de même que les eaux ayant pu être polluées par les dépôts de rejets.

En climat chaud ou tempéré, les traces de cyanures présentes dans les rejets se dénaturent spontanément très rapidement, par décomposition en acide carbonique et en ammociac. Cette réaction est facilitée par la présence d'agents oxydants et catalysée par les rayons ultraviolets.

G) Traitement de la liqueur aurifère.

Quelque soit le procédé de dissolution utilisé, la liqueur aurocyanurée est traitée soit par cémentation, qui est la technique classique; soit par adsorption qui est que récemment employée.

a) Cémentation.

L'Or (et l'Argent) des solutions de cyanure peuvent être déplacés par un métal plus électropositif tel que le Zinc ou l'Aluminium. On effectue ce déplacement, en général, par la poudre de Zinc, introduite dans la solution préalablement filtrée, clarifiée et désaérée et renfermant un léger excès de cyanure libre. Ce surplus est essentiel pour obtenir une bonne précipitation: Il doit permettre de dissoudre la quantité nécessaire de Zinc et pour maintenir en solution les complexes formés lors de cette dissolution. On obtient généralement ce résultat par addition du cyanure concentré à l'émulsion de poudre de Zinc avant son introduction dans le compartiment de précipitation.

La réaction, dite cémentation, peut-être globalement représentée par l'équation :



L'Or se dépose sur les grains de Zinc formant le Cément qui sera séparé de la solution par filtration.

Le cément est repris et traité afin de lui ôter les impuretés qu'il contient.

Le cément contiendra, outre l'Or, l'Argent et le Zinc qui sont des constituants principaux, il contient également du Cuivre, du Plomb du Fer, de la chaux, de la silice, parfois du soufre, bismuth et de l'arsenic.

On adoptera une technique de purification selon la teneur en métaux précieux et la nature des impuretés. Quel que soit le traitement mis en oeuvre, on obtient finalement un lingot doré d'une pureté de 95 %.

b) Adsorption par le charbon actif.

Les progrès considérables enregistrés par l'application de l'adsorption par le charbon actif ont permis l'extention de cette nouvelle méthode et par conséquent une rénovation des installations dans le traitement des minerais aurifères.

Cette nouvelle technique consiste à supprimer une bonne partie d'impuretés et de donner des liqueurs aurifères très riche, pour être finalement électrolysée.

Nous reviendrons sur ce sujet au chapitre IV.

---*---*---*---*---

Références: (2) et (3).

La présence de ce chapitre se justifie par le fait que l'adsorption par le charbon actif trouve son application en métallurgie de l'or, de là, il apparaît utile d'évoquer l'essentiel de ce qu'on connaît sur ce sujet; on mentionnera aussi de ce qui est la bentonite, dont la connaissance nous permettra d'interpréter les résultats expérimentaux.

On peut dire, grosso modo, que les études sur les substances échangeuses et fixatrices de matière, n'ont abouti, à l'heure actuelle, à aucune loi satisfaisante, permettant de prévoir à priori les affinités relatives d'un matériau et d'une substance.

A). ADSORPTION (généralités)

L'adsorption, phénomène de surface, est distinct de l'absorption qui lui est un phénomène de profondeur. Suivant la nature des phases, on peut distinguer cinq types d'interfaces: liquide-solide, gaz-solide, gaz-liquide, liquide-liquide, solide-solide.

Comme l'adsorption par le charbon actif (qui est un solide), dans la métallurgie de l'or, concerne le phénomène d'enlèvement d'ions complexes $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ (et $[\text{Ag}(\text{CN})_2]^-$) de la liqueur cyanurée (qui est un liquide), il ne sera examiné que la forme d'adsorption se rapportant au premier type d'interface, à savoir l'adsorption des liquides par les solides.

La théorie de l'adsorption des liquides par les solides est, beaucoup moins complète que celle de l'adsorption des gaz par les solides; des connaissances acquises, on peut toutefois dégager quelques données utiles.

D'autre part, il existe deux types d'adsorption: L'adsorption chimique qui résulte à la suite d'une réaction chimique, et l'adsorption physique qui met en jeu des forces d'attraction résultant de phénomènes purement physiques.

Dans cette subdivision, on n'abordera que l'adsorption physique, car c'est par ce mécanisme que les ions complexes aurocyanurés (argentocyanurés) parviennent à s'adhérer aux surfaces du charbon activé.

a) Définitions.

-L'adsorption est un phénomène de surface dans lequel les atomes ou les molécules d'un corps se fixent à la surface d'une autre substance, ce qui revient à dire qu'ils se concentrent à l'interface.

Il s'agit donc d'un phénomène de surface qu'on attribue à diverses forces physiques (qui sont d'ailleurs mal analysés à l'heure actuelle): Forces de van der Waals, liaisons hydrogène, forces électrostatiques, etc., selon la nature des substances en jeu. Puisqu'il n'y a pas de réaction chimique, l'adsorption est un processus réversible.

Le terme "surface" doit s'étendre à la totalité de la surface externe géométrique et de la surface interne, engendrée par les fissures, cavernes ou capillaires.

L'effet d'adsorption peut être expliqué par le fait qu'en surface les atomes du solide ne sont pas dans un champ de forces homogène analogue à celui qui existe à l'intérieur, et qu'il reste en surface des forces résiduelles disponibles pour une interaction physique avec les atomes du voisinage.

- La substance qui se fixe est appelée: "adsorbat".
Quant à la surface sur laquelle se produit le phénomène, elle a reçu le nom "d'adsorbant".
- La capacité d'adsorption d'un charbon actif est fonction de son rapport surface/masse, auquel on donne le nom de "surface spécifique"; celle-ci est indépendante de sa granulométrie et dépend plutôt de sa porosité.

b) Chaleur d'adsorption.

L'adsorption est toujours accompagnée d'un dégagement de chaleur, donc exothermique, qui dans l'adsorption physique est faible et la chaleur développée est du même ordre que celle qu'on observe dans la liquéfaction des gaz.

c) Courbe d'équilibre.

La capacité d'adsorption d'une substance adsorbante est fonction non seulement de sa surface spécifique, mais aussi de la concentration de la substance adsorbée dans le milieu ambiant: en condition statique, il s'établit un équilibre entre sa concentration dans ^{les} particules de l'adsorbant et sa concentration dans le liquide entourant les particules; cet équilibre est décrit par la "courbe d'adsorption", ou "courbe d'équilibre", appelée aussi "isotherme d'adsorption" du fait qu'elle dépend de la température ambiante.

Pour les faibles concentrations de produit dissous, on observe en général que le taux d'adsorption en fonction de la concentration de substance dissoute soit l'équation établit par FREUNDLICH, qui peut alors s'écrire pour les solutions:

$$x/m = K C^{1/n}$$

avec x = nombre de grammes de substance adsorbée;

m = nombre de grammes de substance adsorbante;

c = concentration de la substance dissoute dans la solution;

k et n = des constantes à température donnée; " n " a une valeur supérieure à 1, en général comprise entre 2 et 10.

Cette équation ne s'applique plus à concentration élevée. On observe, fréquemment, qu'avec l'accroissement de la concentration, l'adsorption passe par un maximum, puis décroît, comme dans le cas relatif à l'adsorption par le charbon actif d'éthanol en solution dans le benzène.

d) Vitesse d'adsorption.

La vitesse d'adsorption en phase liquide est beaucoup trop lente. Donc l'agitation et tout particulièrement le temps de contact seront deux facteurs agissant sur la capacité d'adsorption.

La viscosité de la solution doit être aussi un facteur, agissant sur la vitesse d'adsorption, et il est vraisemblable qu'en diminuant la viscosité, par chauffage, on accroît la vitesse.

e) Nature de l'adsorbant

La substance à adsorber doit se mouvoir dans un solvant plus au moins visqueux; l'adsorbant travaillant en milieu liquide agit tout d'abord par sa surface externe. Quant à sa surface interne, elle doit être accessible par des pores ou des capillaires d'un diamètre juste suffisant pour permettre la pénétration des molécules dans ces capillaires. De ce fait, la diffusion du corps adsorbé vers la surface interne s'opère

lentement dans le solvant et devient encore plus lente dans les petits capillaires, ce qui engendre une énergie d'adsorption très faible, et moins importante que celle mis en jeu en phase gazeuse.

Certains adsorbants ont une action spécifique caractérisée: le gel de silice, par exemple, est un adsorbant énergique de l'eau et des alcools; le charbon actif, au contraire, est un adsorbant médiocre de l'eau, et il est souvent classé comme hydrophobe.

f) Nature du solvant.

Puisque la fonction principale de l'adsorbant est de produire une interface liquide-solide importante, l'influence de la nature du solvant sur l'adsorption devient très marquée.

L'adsorption par les solides sera plus importante en milieux aqueux qu'en solution organique. La désorption de l'adsorbant, opération inverse de l'adsorption, sera, au contraire, plus aisée avec un solvant organique qu'avec l'eau.

Dans le cas d'une solution de plusieurs substances dissoutes, l'adsorption de chacune d'elle est en général plus faible que si elle était seul. Il suffit parfois de très petites quantités d'une substance pour abaisser fortement l'adsorption d'une autre substance. Par exemple, dans le cas de l'acide benzoïque dissous dans l'eau, le taux d'adsorption diminue considérablement en ajoutant quelques gouttes de benzène.

g) Nature de l'adsorbant.

Le taux d'adsorption d'une substance par un adsorbant donné restera sensiblement le même, à partir de ses solutions dans différents ^{solvants} si le rapport de la concentration de cette substance, dans un solvant donné, à sa solubilité dans le même

solvant reste le même d'un solvant à l'autre :

plus une substance est polaire, plus grande est son adsorption sur une surface polaire, toutes choses égales par ailleurs. De même, moins une substance est polaire, plus grande est son adsorption sur une surface non polaire.

L'affinité d'une substance sur une surface d'un adsorbant est aussi fonction du PH; dans la plupart des cas, un PH acide facilite l'adsorption sur le charbon actif.

h) Pratique de l'adsorption.

Deux méthodes de travail peuvent être mises en oeuvre pour le traitement des liquides par un adsorbant solide: la percolation et le mélange suivi de filtration.

1) percolation: Dans ce procédé, le liquide à traiter s'écoule à travers un lit épais de l'adsorbant. Ce dernier est généralement granulé et doit avoir une résistance mécanique suffisante et une granulométrie convenable, afin d'éviter la formation de canaux.

La vitesse d'adsorption en milieu liquide étant relativement lente, il faut adopter un temps de contact suffisant et régler en conséquence le débit du liquide. On peut augmenter la vitesse d'adsorption en élevant la température de l'opération. L'écoulement du liquide se fait généralement par pesanteur. On arrête l'adsorption lorsque l'effluent n'a plus la qualité requise.

La percolation peut-être rendue continue par l'utilisation de plusieurs adsorbants.

2) Mélange et filtration: Cette méthode permet d'augmenter la vitesse d'adsorption par l'emploi de grains plus fins.

Dans ce cas, l'adsorbant, à l'état pulvérulent (et même en granulés) est mélangé avec le liquide ou la solution à traiter portés à une température convenable (si le chauffage favorise l'adsorption), agité et séparé après un temps de contact suffisant, par filtration ou par sédimentation et filtration. L'opération peut être discontinue ou continue.

Cette méthode de travail est particulièrement avantageuse lorsqu'on emploie, pour le traitement, des agents tels que les charbons actifs ou les terres activées, corps à pouvoir adsorbant élevé.

1) désorption.

La fixation d'une substance sur une surface dans certaines conditions expérimentales peut-être suivie du départ de cette substance si les conditions expérimentales varient (qu'il faut définir pour chaque cas); ce départ hors de l'adsorbant constitue la désorption.

B) Charbon actif.

Il a été mentionné à la subdivision précédente que la surface spécifique est l'une des caractéristiques déterminantes de la qualité d'un adsorbant. Or, on sait, par des techniques appropriées (activation chimique ou thermique) et pour un coût raisonnable, conférer à divers substrats carbonés des surfaces spécifiques très importantes (700 à 1500 m²/g). Cela explique pourquoi les charbons actifs restent de loin les adsorbants les plus utilisés.

a) Préparation

En principe on peut préparer du charbon actif à partir de toute substance organique solide; dans la pratique, on a surtout recours aux matières premières suivantes: houille, bois, noix de coco, etc.

On l'active généralement par un traitement thermique qui comporte trois étapes:

- 1) Déshydratation de la matière première en absence d'air, à une température entre 100 et 170°C.
- 2) Carbonisation à une température initiale d'environ 300°C qu'on hausse graduellement jusqu'à 600°C; il s'ensuit une pyrolyse de la matière organique avec expulsion de CO, de CO₂, d'acides organiques, d'alcools et d'autres produits volatils laissant un carbone presque pur, contenant un peu de cendres minérales et du goudron.
- 3) Activation du carbone à 1000°C en présence de vapeur d'eau ou d'un autre gaz faiblement oxydant; il s'ensuit l'expulsion et l'oxydation des résidus de goudron et la libération des pores de carbone.

Le résidu est ensuite broyé ou pulvérisé pour former soit le charbon actif granulé (taille plus de 0,3 mm), soit le charbon actif en poudre (taille de 25 à 75 µm).

Le four utilisé dans ce traitement fonctionne sous vide ou à atmosphère contrôlée, ceci évite d'enflammer le charbon.

b) Types de charbon actif.

Dans l'activation décrite ci-dessus, les propriétés caractéristiques du charbon actif dépendent, dans une large mesure, de la matière première, ceci du fait que, par ce procédé, on ne modifie pas profondément la structure de la matière; on peut donc, par un choix judicieux de cette dernière, obtenir des produits à porosité la plus convenable pour l'application recherchée.

Le traitement par activation permet d'obtenir des produits finis sous toutes formes convenables. Alors que les charbons décolorants et médicinaux sont presque toujours utilisés sous forme de poudre, les charbons pour adsorption en phase gazeuse sont soit granulés, soit filés.

Les charbons adsorbants doivent présenter une résistance mécanique suffisante au passage du fluide, ce qui peut être obtenu par le choix judicieux de la forme et de la taille des particules.

c) Caractéristiques du charbon actif.

Le charbon actif est une substance très légère, due à sa grande porosité qui lui confère une très grande capacité d'adsorption, caractérisée par une surface spécifique énorme (elle varie de 700 à 1500 m²/g).

Une particule quelconque du charbon actif comporte un réseau de canalisation très fin et très ramifié, ayant un diamètre de quelques monomètres ; la surface interne que présentent ces capillaires devient ainsi beaucoup plus importante que la surface externe de la particule.

d) Spectre d'utilisation et applications

L'expérience montre que les charbons actifs sont des adsorbants à très large spectre : la plupart des molécules organiques se fixent à leur surface, les plus mal fixées étant les molécules les plus courtes. Les molécules plus lourdes, les composés aromatiques, les hydrocarbures substitués, ..., sont au contraire très bien fixés.

En plus de l'or et de l'argent, le charbon actif montre aussi une bonne affinité pour certains composés minéraux, notamment ceux de l'arsenic, de l'antimoine et du bismuth ainsi qu'une certaine affinité pour les composés du plomb, du nickel, du titane et du fer ferrique.

Les charbons actifs, ont divers applications, on distingue:

- charbons décolorants: Utilisés dans la décoloration et raffinage des sucres, décoloration des huiles et graisses végétales, purification des produits alimentaires et pharmaceutiques, purification de l'eau, récupération de métaux précieux, etc.
- charbons adsorbants: Récupération des solvants, dégazolinage, désordorisation, purification des gaz industriels, fractionnement des gaz et des liquides, protection contre les gaz toxiques...
- charbons médicinaux: Elimination des bactéries et des toxiques, addition aux aliments pour le bétail.

e) Régénération

Le charbon actif est un produit coûteux. Il serait, la plupart du temps, prohibitif de remplacer le charbon saturé qu'il faut donc pouvoir régénérer. A cet effet on utilise le souvent la régénération thermique afin d'éliminer les contaminants organiques et de recréer une nouvelle surface active.

La réactivation thermique conduit toujours à des pertes élevées (7 à 10% par régénération), c'est-à-dire qu'après 10 à 14 régénération, on aura statiquement remplacé entièrement la masse du charbon actif.

C) Bentonite naturelle.

La bentonite est une argile connue depuis l'antiquité, mais la connaissance de sa constitution minéralogique s'est élaborée au cours du XIX^e siècle.

On trouve cette substance naturelle dans de nombreuses parties du globe. Il existe deux gisements importants en Algérie (Maghnia et Mostaganem).

La bentonite ne subit après extraction et avant usage, qu'un simple conditionnement physique, à savoir: séchage à température plus au moins élevée et granulation.

Très importante, de par ses propriétés physico-chimiques, de son exploitation peu onéreuse, la bentonite voit son emploi s'étendre au fil des années.

a) Origine.

Il est difficile de préciser à partir de la littérature actuelle les conditions de formation de la montmorillonite (constituant principal de la bentonite). Elle caractérise les milieux sédimentaires relativement riches en bases, particulièrement en magnésium et de PH nettement alcalin. Autrement : Formée par altération de roches basiques dans des conditions alcalines (climat semi-aride, eaux stagnantes)

b) Propriétés physiques et chimiques.

La bentonite étant naturellement décolorantes, et elle est fixatrice de matière.

La bentonite est un minéral très tendre, onctueux, qui se présente généralement en masses compactes et dont la couleur varie du blanc gris au blanc verdâtre, allant parfois jusqu'au

rose plus ou moins clair.

Le minéral est facilement attaqué, particulièrement soluble dans l'acide chlorydrique; il est totalement décomposé par l'acide sulfurique. Sa densité est généralement voisine de 2,04.

Cette terre est douée d'un pouvoir gonflant considérable de 5 à 30 fois par rapport à son volume initial sans devenir plastique. Comme tous les adsorbants, les bentonites sont des substances de grande porosité.

c) Composition et structure.

La bentonite est une masse argileuse où elle est constituée principalement de la montmorillonite, dont la formule chimique est $Al_2[(OH)_2Si_4O_{10}]_nH_2O$ (selon la référence(17)).

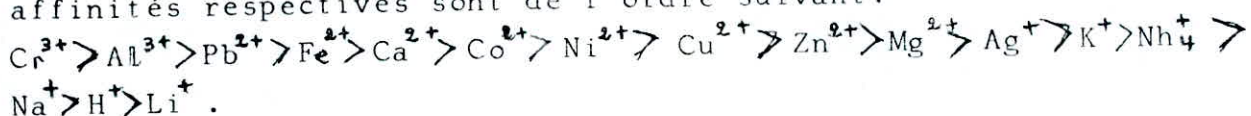
La montmorillonite est un minéral argileux caractérisé par des feuillets complexes à trois couches, séparées par des molécules d'eau.

En étudiant les adsorbants montmorillonitiques de différents lieux d'origine, on avait constaté que les bentonites diffèrent fortement les unes des autres. Ce fait, s'explique par les teneurs dissemblables en impuretés formées de Fe, Ca, Mg, Na, Ti, K, Mn, et Si, sous forme de feldspath, gypse, carbonate de calcium, biotite, mica, magnétite, limonite, opatite et silice sous forme de quartz. Ainsi on parle de bentonite-Na, bentonite-Ca, etc. Ces impuretés présentent parfois une grande fraction, influant négativement sur la qualité de l'adsorbant.

d) Sélectivité.

La bentonite peut-être une échangeuse d'ions. Dans ce cas, on a constaté un certain ordre d'affinité, surtout

pour les échangeurs de cations fortement acides (forme H^+), les affinités respectives sont de l'ordre suivant:



On a constaté en outre, que la bentonite présente une affinité adsorptionnelle aux liquides polaires.

e) Capacité d'échange.

La bentonite est une substance adsorbante et échangeuses d'ions.

Comme on l'a dit ultérieurement, la bentonite est une substance poreuse: L'élimination de l'eau dans la phase séchage développe dans le produit une grande quantité de pores submicroscopiques d'un diamètre moyen de 190 à 200 Å°. Sa surface spécifique varie entre 120 et 200 m²/g.

L'échange d'ions dans la bentonite doit sa propriété à la nature de son squelette. La capacité d'échange d'un échangeur est définie comme la masse d'un ions susceptibles d'être fixés par l'unité de masse. Pour la montmorillonite, elle est de l'ordre de 60 à 50 milli-équivalent / 100 g de substance.

f) Applications.

Les principaux applications de la bentonite naturelle sont: Décoloration des huiles minérales, végétales, des huiles et graisses animales et des cires.

Certaines bentonites possèdent une dureté suffisante peuvent être employées pour la préparation de produits granulés utilisés en percolation, tandis que les matériaux trop

friables conduiront à des produits pulvérulents pour l'application au traitement par mélange.

Les bentonites granulées peuvent être régénérées, alors que celles en poudre ne sont pas régénérées.

* * *

Références : (6), (8), (10), (16), (17), et (18).

CHAPITRE IV: APPLICATION DE L'ADSORPTION A LA METALLURGIE DE L'OR.

Le présent chapitre devrait être assez étoffé, mais malheureusement il est court et succinet, en raison du manque (aux bibliothèques) de documentation spécialisée dans ce domaine qui est récent.

Dans le procédé d'adsorption sur charbon actif, l'extraction de l'or (et de l'argent) d'une pulpe ou d'une solution est fondée sur l'adsorption sélective et préférentielle de ces métaux sur et dans les particules poreuses du charbon actif.

Bien que cette action soit également mise en oeuvre sur une pulpe ou une solution cyanurée, le procédé, qui doit être considéré comme original, s'écarte dans son principe de celui de la cyanuration classique par l'absence des étapes de séparation solide-liquide et de désaération et par le fait que le charbon actif, agent de dépôt, est recyclable.

A) Mode d'adsorption

Le charbon activé utilisé est fabriqué, généralement, à partir de coques de noix de coco, en grains de 2 à 3 mm, qui doivent être assez résistants à l'abrasion pour subir sans dommage l'ensemble des transferts. 100 grammes de charbon activé peuvent adsorber jusqu'à 7 grammes d'or.

L'opération se fait sur la pulpe cyanurée (après l'opération de cyanuration) dans une série de bacs agités.

Le temps de contact charbon/pulpe nécessaire est de l'ordre de 1 à 6 heures; le temps de séjour du charbon est de plusieurs jours.

Le charbon chargé d'or sera récupéré en fin de circuit par criblage ou par filtration.

B) Mode de désorption

Dans un premier temps, dans les installations de traitement, on a opéré par le procédé Zadra: on emploie la solution Na OH (1%) + Na CN (0,1%) à la température d'ébullition, pour déplacer l'or. La méthode de Zadra a été remplacée; après des travaux de recherche, par l'emploi de la solution de Na OH (1 à 2 %) additionnée à l'éthanol (10 à 20 %); la désorption est réalisée par percolation à chaud (environ 70°C).

La désorption est suivie d'une extraction par électrolyse, dans une cellule circulaire: L'or se dépose sur une cathode constituée de laine d'acier (inoxydable) très propre, puis il est amené, après fusion de la cathode, sous forme de lingot. Quant au charbon, il est régénéré thermiquement afin de le réutiliser.

C) Avantages techniques et économiques.

Les avantages d'utilisation du charbon actif sont:

- Equipement minimum: disparition des opérations onéreuses d'épaississement, filtration, ...
- Il n'est pas nécessaire de maintenir du cyanure libre dans les stades finaux. Cela signifie une diminution de la consommation des cyanures et il y aura moins risque de formation de cyanicides.
- Le salissage des solutions ne tarde pas l'adsorption.

Par ailleurs, cette méthode d'extraction permet de récupérer 94% à 97% des métaux précieux contenus initialement dans la solution cyanurée.

En comparant cette nouvelle technique à la méthode classique, on a évalué aux Etats-Unis que, si l'investissement nécessaire pour traiter, dans une installation, 10 à 20 kg d'or par jour, était de 100, il n'était plus que de 35% pour la désorption sur charbon actif; pour les coûts opératoires, on passerait de 100 à 25%.

* * *

Références : (2) et (19).

CHAPITRE V : TECHNIQUES D'ANALYSE QUANTITATIVE

Dans ce chapitre, on cite uniquement les deux méthodes de dosage qu'on aura l'intention de les pratiquer dans notre travail expérimental, à savoir : celle de l'analyse du minerai et celle de l'analyse de la liqueur.

En plus du dosage de l'Or, on évoque aussi en parallèle celui de l'Argent, qui, comme on l'a fait remarquer antérieurement, il accompagne généralement l'Or comme un sous-produit.

A) Analyse du minerai brut : Application de la Dosimasié.

Des ouvrages d'analyse qu'on a consulté, les auteurs proposent toute une série de méthodes d'analyse des minerais d'Or, tantôt par voie sèche, tantôt par voie humide, mais la plupart sont peu satisfaisantes. Il semble que la méthode classique dénommée : « Dosimasié » conserve son application.

a) Principe :

Le processus de la technique se fait en trois étapes :

Concentration: On provoque la formation d'un alliage de plomb qui contient les métaux précieux. Cet alliage fondu est séparé, en particulier des silicates, grâce à sa grande densité.

Coupeellation: On sépare ensuite le Plomb par oxydation à l'air et fusion de l'oxyde formé qui s'écoule à l'intérieur de la paroi poreuse d'une coupelle. L'Or et l'Argent dans les mêmes conditions, ne sont pas oxydés; ils restent inaltérés sur la coupelle. Cette précieuse observation offre donc le moyen de séparer très nettement l'Or et l'Argent des métaux aisément oxydables.

Départ: Il reste donc un « bouton » contenant l'Or et l'Argent. On pèse à 0,01 mg ou 0,05 mg près (balance d'essayeur ou semi-microbalance). L'Or et l'Argent peuvent être séparés par attaque nitrique. On pèse l'Or restant après cette attaque et on a par différence l'Argent.

b) Avantages et inconvénients :

La Dosimasié donne des résultats acceptables. Elle est particulièrement utile là où les méthodes par voie humide deviennent moins bonnes, c'est le cas du dosage des petites quantités dans une substance difficile à attaquer. La pratique de la dosimasié demande de l'adresse, une main-d'oeuvre très qualifiée et a l'inconvénient d'être longue.

Note : Ce qui a été dit précédemment n'est que le résumé de la méthode. Les détails de manipulation varient d'un minerai à un autre, selon l'importance des métaux précieux contenus, la nature de la gangue... (pour les détails, voir l'ouvrage de L. Vompreon).

B) Analyse de la solution aurocyanurée : Application de la spectrophotométrie d'absorption atomique :

Le dosage de l'Or et de l'Argent en milieu cyanuré, par absorption atomique donne les meilleurs résultats. Les méthodes d'analyse par absorption sont nombreuses. On se contente donc de décrire que la spectrophotométrie de flammes, avec laquelle on a analysé nos échantillons.

a) Principe de l'analyse par absorption.

La loi fondamentale de cette méthode est celle-ci: Des substances sous forme de vapeur atomique ont la propriété d'absorber des radiations caractéristiques, identiques à celles qu'elles peuvent émettre. Les radiations absorbées sont proportionnelles au nombre d'atomes présents dans la flamme. La grandeur mesurant l'atténuation de ce faisceau monochromatique est appelée : « densité optique » ou « absorbance ». La densité optique est donc fonction de la concentration de l'élément à analyser.

b) Description d'un spectrophotomètre de flammes.

Les organes essentiels d'un appareil de spectrophotométrie de flammes d'absorption sont : (voir figure)

(1) Générateur de radiation (source lumineuse) : Émettant une radiation dont la fréquence correspond à celle de l'élément à doser. (2) Ensemble nébuleux-brûleur pour flammes : Il transforme un liquide en brouillard et par suite l'atomisation de l'élément à doser. (3) Monochromateur : Son système dispersif permet de ne sélectionner qu'une bande étroite du spectre. (4) Photomultiplicateur (détecteur) : Qui transforme la radiation électromagnétique en signaux électriques. (5), (6), (7) Accessoires de mesure : Fournissent les résultats qui seront comparés à l'étalon. (8) Table de distribution des échantillons (échantillonneur) : Comportant la solution étalon et les échantillons à analyser. (9) Pompe proportionnante : Qui permet d'aspirer les divers échantillons à analyser.

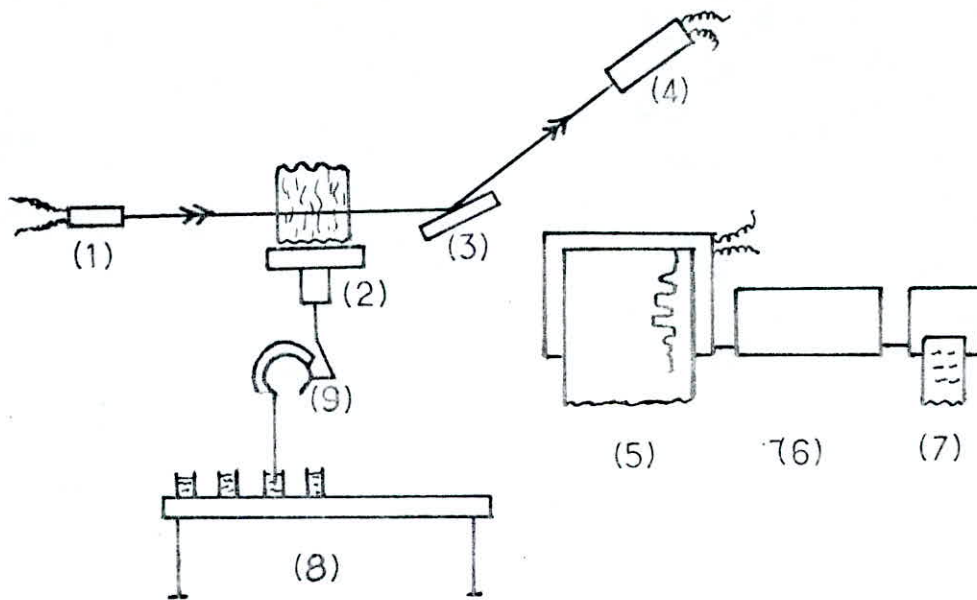


fig.1 : montage d'un spectrophotomètre

c) Fonctionnement d'un spectrophotomètre de flammes.

La figure ci-dessus, montre la source qui émet de la lumière dont le spectre des raies est caractéristique de l'élément à doser. La lumière émise traverse la flamme dans laquelle l'échantillon — qui était initialement sous forme d'une combinaison chimique — est introduit sous forme de brouillard. Cette vapeur atomique est le résultat de la dissociation thermique obtenue grâce à l'ensemble nébuleur-brûleur. L'intensité de la lumière absorbée est fonction de la concentration de l'élément dans la flamme. La radiation est ensuite isolée par le monochromateur et envoyée sur un détecteur photoélectrique, qui envoie les signaux électriques sur divers accessoires de mesures. Par suite l'instrument donne directement la densité optique recherchée.

d) Courbe d'étalonnage.

Nous avons vu que la Densité Optique est fonction de la concentration de l'élément à doser. La courbe d'étalonnage exprime donc la Densité Optique en fonction de la concentration. On mesure la densité optique d'un ensemble de solutions de l'élément à doser dont les concentrations sont variables dispersées et connues. Ces solutions sont appelées des étalons. On prépare généralement une dizaine d'étalons par élément. Par suite on trace la courbe d'étalonnage en portant en abscisses les concentrations et en ordonnées les densités optiques relatives correspondantes. On rejoint les points par une courbe (les points expérimentaux sont légèrement dispersés, traduisant des écarts expérimentaux).

L'intérêt de cette courbe est de déterminer par extrapolation la concentration de l'élément à analyser, en connaissant sa densité optique fournie par le spectrophotomètre.

Remarque: Aux fortes concentrations, pour les densités optiques élevées, le dosage perd toute précision. On procède alors par dilution.

e) Avantages et inconvénients.

Le champ d'application de l'analyse par absorption est à la fois vaste et limité: — Vaste par le nombre d'éléments que cette technique permet de détecter. — Limité par une sensibilité parfois insuffisante et par l'interaction chimique des autres éléments présents.

La spectrophotométrie présente tous les avantages des méthodes d'analyse sur solution, telles que souplesse d'utilisation, un emploi simple et rapide du fait que la mesure n'est pas liée à la formation d'un composé défini de l'élément à doser, ni même d'une valence particulière de cet élément. Mais elle subit les sévérités, en effet, malgré que cette mesure très rapide en elle-même, nécessite cependant pour chaque élément une lampe à cathode creuse spéciale (certaines lampes ont besoin d'un temps assez long pour s'exciter; la lampe d'Or a besoin environ 30 minutes.), un réglage et un réétalonnage, préparation des solutions étalons ... Par conséquent, on ne peut pas considérer comme rapide le dosage successif de plusieurs éléments.

f) Limite de détection et précision.

La limite de détection est étroitement liée à l'élément à doser, à la nature du milieu d'analyse, de la stabilité de l'appareillage (lampe, flamme...) L'absorption atomique étant une méthode relative, l'exactitude des résultats obtenus dépendra de la précision de l'étalonnage et de la manière d'utiliser l'appareillage ainsi que de sa qualité.

g) Conditions d'absorption de l'Or.

Raie la plus sensible : $\lambda = 2428,0 \text{ \AA}$ (domaine U.V) Limite de détection : de 0,1 à 0,3 mg/l. Autre raie : $\lambda = 2676,0 \text{ \AA}$ (domaine U.V), avec une limite de détection : 1,3 mg/l. Source : lampe à cathode creuse plaquée d'Or. Excitation : 14 m.Å. Fente : bande passante de 20 Å. Flamme : air-acétylène ou gaz de ville -air riche. Perturbation : il n'y a pas de raie voisine à moins de 10 Å sur 2428,0 Å.

h) Conditions d'absorption de l'Argent.

Raie la plus sensible : $\lambda = 3280,7 \text{ \AA}$ (domaine U.V) -Limite de détection : = 0,1 mg/l ; 0,05 mg/l et même 0,01 mg/l. -Autre raie : $\lambda = 3382,9 \text{ \AA}$ (domaine U.V), avec une limite de détection 0,15 mg/l. Source : lampe à cathode creuse en Argent ou alliage d'Argent. Excitation : 12 m.Å. -Fente : bande passante de 7 Å. -Flamme : indifférente. -Perturbation : il faut 1000 fois plus de thorium, iodate, tungstate ou permanganate que d'Argent pour que le dosage soit perturbé.

Références : (11), (12), (13), (14), (15).

1^{re} PARTIE

EXPI^{re}IMENTALE

A) Généralitéa) Présentation

La réalisation au laboratoire des expériences sur la cyanuration d'un minerai aurifère et le traitement des liqueurs obtenues par adsorption, est pratiquement facile ; toutefois elle exige la disponibilité d'un certain appareillage (broyeur, agitateur, dispositif de filtration, ...), des moyens d'analyse et surtout du temps.

Les tâches pratiques que notre promoteur a proposé ont été considérablement simplifiées car les conditions de manipulation décrites ci-dessus ont été plus au moins satisfaites. Notre partie expérimentale sera donc nécessairement mince, mais suffisante pour en déduire quelques conclusions pertinentes.

b) Objets.

Le travail experimental a double objets:

1°) Il nous permet la vérification de l'efficacité de la cyanuration directe appliquée au minerai aurifère en provenance de Hana-ne.

On n'a pas l'intention de faire un travail d'optimisation, en jouant sur les paramètres (surtout, la concentration en cyanure et le temps de contact) influençant sur la dissolution, car un tel travail exige davantage de temps. Nous, on se borne seulement à fixer les conditions de lixiviation approchées, conduisant normalement à tirer des conclusions valables sur l'aptitude du minerai considéré à être concentré par ce procédé ou non.

2°) L'essai de cyanuration nous fournira une liqueur aurocyanurée qui sera traitée par la suite, dans la deuxième partie, par :

- Du charbon actif seul -comme substance de référence-:pour confirmer son efficacité quant à son affinité vis-à-vis de l'or, et de calculer sa capacité d'adsorption.

- De la bentonite seule:pour déterminer sa capacité de fixation de l'or et de la comparer par rapport au charbon actif.

- Du mélange bentonite -charbon actif pour vérifier si le phénomène synergique peut avoir lieu; autrement, on cherche à affirmer si en associant la bentonite au charbon actif, le pouvoir d'adsorption de celui-ci augmente ou non.

D'autre part, les solutions rejet d'adsorption, après traitement par le charbon actif, contiennent toujours une faible concentration en or qui ne s'adhère pas au charbon, parce que l'adsorption tend vers un équilibre.

On essaye de voir si on pourra traiter ce résidu avec de la bentonite, qui a une capacité d'adsorption faible mais suffisante pour traiter les solutions pauvres.

B) Instruments et dispositifs.

a) Broyeur à boulets

Le minerai qu'on a traité était préalablement concassé. Le broyeur à boulets a complété l'action de fragmentation, en pulvérisant le minerai par écrasement au moyen d'une charge de boulets d'acier en mouvement libre à l'intérieur de son tambour tournant. Le tout venant est ensuite criblé afin de classer les particules de taille fine -selon la granulométrie choisie- pour traitement hydrométallurgique ultérieur.

Le broyeur à boulets nous a servi non seulement pour pulvériser le minerai ,mais aussi pour l'homogénéiser.

b) PH- mètre.

Le PH de la pulpe a été mesuré avec un PH -mètre ;utilisant la relation entre la force électromotrice d'une pile hydroélectrique et le PH de la solution qui constitue l'électrolyte de cette pile.

Avant chaque usage, on l'étalonne avec deux solutions étalons dont le PH est connu avec précision (les solutions étalons choisies ont respectivement un PH =4 et PH = 9).

c) Agitateur.

Il s'agit d'un agitateur de laboratoire ayant une vitesse d'agitation réglable;il nous a été utile lors de la pratique de la ~~le~~lixiviation et lors des essais d'adsorption.

Il est constitué d'une plaque métallique rectangulaire sur laquelle on a fixé des bouteilles en plastique contenant la pulpe. Cette plaque est liée:

- A son extrémité, le long de sa longueur, à un axe qui lui permet d'avoir un mouvement de rotation.
- A son centre est liée solidairement à un système bielle-manivelle entraîné par un moteur électrique.

L'ensemble communique à la plaque un mouvement circulaire oscillatoire.

d) Spéctrophotomètre de flammes

Se reporter au chapitre consacré aux techniques d'analyse quantitative.

Les analyses des solutions ont été effectuées au laboratoire central de l'E.R.E.M. (Boumerdés) , avec un analyseur de modèle:perkin-Elmer 603.

C) Produits et réactifs

a) Minerai aurifère de Hanane.

Le minerai d'or qu'on a traité provient du gisement de la région de Hanane(Hoggar);sa gangue est essentiellement quartzeuse. De sa composition minéralogique,il faut savoir qu'il ne contient ni sulfures,ni minéraux d'antimoine;cependant il renferme une quantité infime d'arsenic;mais qui n'entrave pas la cyanuration. Ce minerai est très riche:il a été prélevé d'un échantillon titrant à 41,3 g/t.(on n'est pas arrivé à analyser notre minerai,on prendra donc cette valeur pour nos calculs,qui seront alors nécessairement peu précises).

Autre indication importante:Les particules aurifères insérées dans le minerai de Hanane sont microscopiques,,à l'exception de quelques rares pépites qui son visibles à l'oeil nu,de dimensions:0,1 à 0,5 mm.

b) Cyanure de sodium

Le cyanure de sodium (Na CN) qu'on a utilisé est celui du commerce,d'une pureté de 97,98 % de Na CN. On doit noter qu'il était emmagasiné pendant 20 ans,mais dans un flacon bien fermé,ce qui diminue le risque de se périmer.

c) Chaux vive.

Pour régler le PH,on a opéré avec de la chaux vive(CO) commerciale,titrant à 97%.

Elle s'hydrate aussitôt mise en contact avec l'eau, selon l'équation suivante:

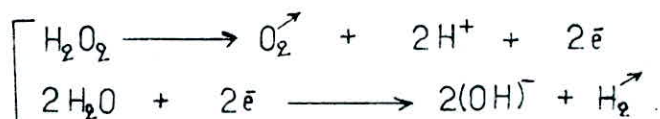


ainsi, cette chaux hydratée libérera les ions $(\text{OH})^-$ dans le milieu aqueux, en se dissociant:

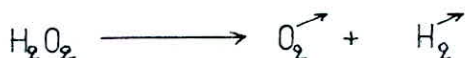


d) Eau oxygénée

De formule H_2O_2 , son rôle, dans notre manipulation, est de fournir l'oxygène: Au contact de l'eau, l'eau oxygénée s'oxyde selon les deux demi-réactions d'oxydo-réductions suivantes:



Donc, en milieu aqueux, l'eau oxygénée dégage simultanément de l'oxygène et de l'hydrogène:



e) Charbon actif

Pour ses propriétés et ses caractéristiques voir le chapitre IV.

On a utilisé deux types de charbon actif:

- charbon en grain d'une granulométrie 0,6 à 1,2mm; qu'on a appliqué à la 1ère opération.

- charbon pulvérulent destiné à être employé en mélange avec la bentonite

Rappelant que la surface spécifique des charbons activés varient entre 700 et 1500 m²/g.

f) Bentonite naturelle

Se reporter au chapitre IV pour ses caractéristiques et ses propriétés.

La bentonite dont on a fait usage provient de Mostaghanem; elle est en poudre.

Rappelant que ce genre de terre naturelle a une surface spécifique allant de 120 à 200 m²/g.

g) Soude caustique

De formule NaOH elle a servi à préparer la solution de désorption en association avec l'éthanol. D'une pureté de 99%; elle se présente en pastilles. Elle est très soluble dans l'eau et dans l'éthanol.

Remarque: La mise en solution est fortement exothermique, chose remarquée lors de la préparation de la solution de désorption.

h) Ethanol

C'est un alcool ordinaire appelé encore: alcool éthylique; de formule $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$; c'est un liquide incolore, qui bout à 78°C. L'éthanol utilisé portait l'indication: "alcool absolu", c'est-à-dire alcool chimiquement pur.

D) Courbe d'étalonnage de l'or et de l'argent

Les mesures de la densité optique respectivement des solutions étalons aurocyanurées et argentocyanurées, ont donné les résultats suivants:

Or	
concentration en mg/l	absorbance
1	1,0
2	2,0
3	3,0
4	4,0
5	5,0
10	10
20	20
30	30
40	40

Argent	
concentration en mg/l	absorbance
1	1,0
2	2,0
3	3,0
4	4,0
5	5,0
10	10
20	20

On remarque, d'après les deux tableaux ci-dessous, que la courbe d'étalonnage de l'or est identique et superposable à celle de l'argent; ces deux courbes sont rectilignes et même linéaires avec un coefficient directeur égal à 1; cela veut dire que la densité optique donnée par l'instrument analyseur est la concentration elle-même.

E) Pratique de la cyanuration directe.

Le minerai de Hanane présente toutes les caractéristiques rendant la cyanuration directe possible:

- Absence des minéraux réfractaires à la cyanuration, donc il n'y aura pas risque de désoxygénation ni la perte du cyanure.
- Le minerai est constitué de particules d'or infimes (sauf quelques rares pépites) donc l'attaque du métal noble sera aisée.

a) Mode opératoire.

(voir Figure (2))

- Préparation du minerai: On a pulvérisé le minerai, dans un premier temps, à l'aide du broyeur à boulets, puis un passage au tamis nous a permis de classer le produit fin selon la granulométrie fixée à 70 μm .

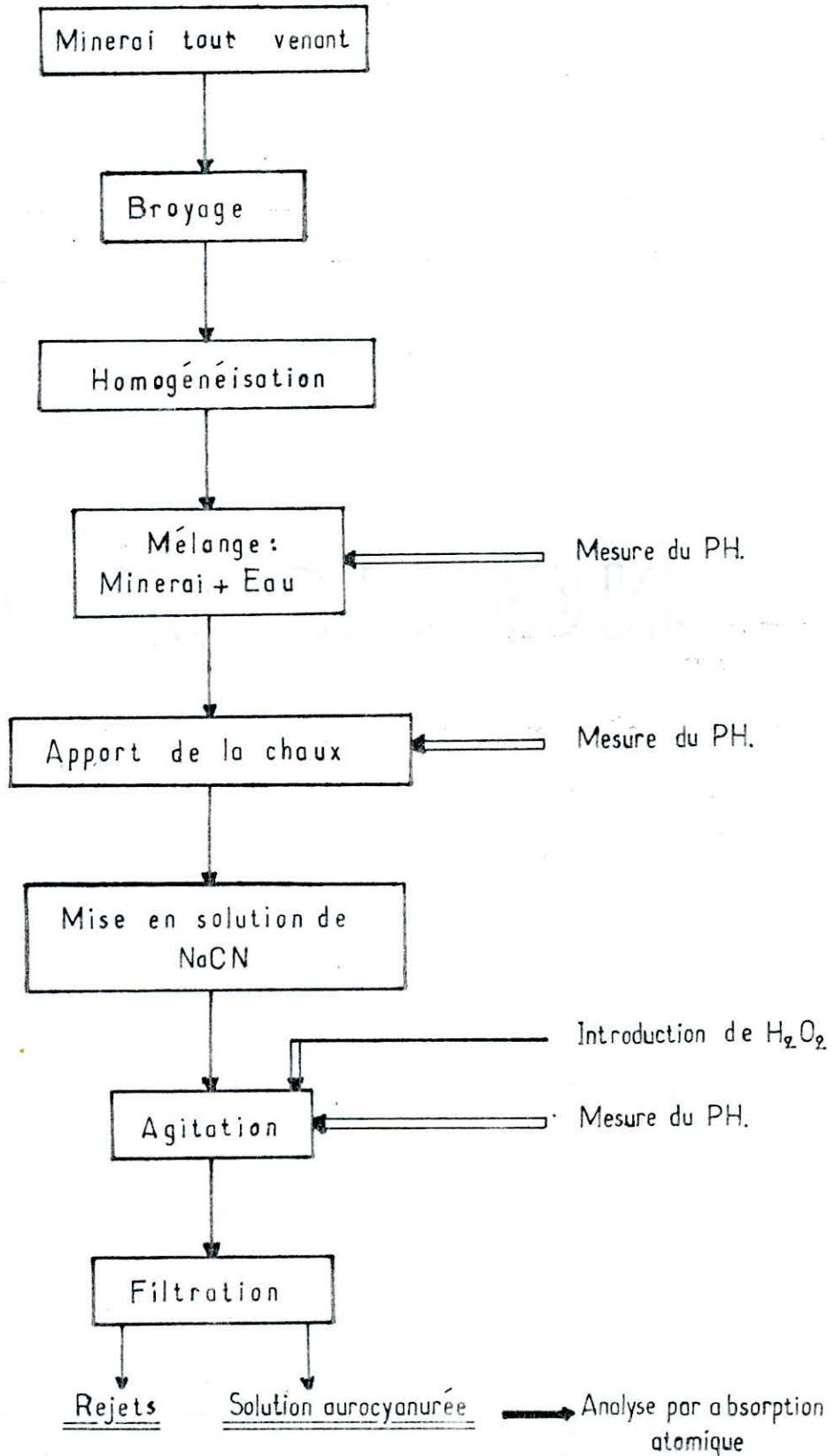
L'homogénéisation était l'étape suivante, elle vise à assurer l'uniformité de la composition chimique du minerai.

- Préparation de la pulpe: Avec le rapport $S/L = 1/3$.

Pour avoir suffisamment de liqueur, on a effectué quatre essais séparés, de 500 gr de minerai chacun, additionnés à 1,5 litres d'eau.

On avait pensé à mesurer le PH de la pulpe avant la mise en solution de la chaux. On a additionné ensuite de la chaux vive de manière à avoir un PH= 10,5: Il fallait ajouter 1gr de chaux par essai pour l'atteindre, soit environ 0,07%.

Finalement, on a ajouté du cyanure de sodium avec,



Fig(2) : processus de traitement, suivi au laboratoire, du minerai aurifère de Hanane, par cyanuration directe.

une concentration pondérale $c=0,1\%$: pourquoi ce choix de concentration qui semble être assez forte? Eh bien pour deux raisons : d'abord le minerai est très riche et puis le cyanure de sodium qu'on a utilisé est vieux d'où le risque d'avoir été altéré. Chaque essai était effectué dans une bouteille en plastique bien fermée où elle renferme 245 ml d'air (mesuré); Ce volume d'air peut contenir environ 70 mg d'oxygène (calculé); et en plus, on a introduit quelques gouttes de H_2O_2 ; l'oxygène en présence dans la pulpe est largement suffisant.

- Lixiviation: a été faite avec agitation; où le temps de contact a été fixé à 24 heures.

IL nous semble que 24 heures suffisent pour dissoudre environ 90% en raison de la finesse des particules d'Or.

On avait pris le soin de vérifier le PH pendant et après la lixiviation.

Enfin, on a procédé par filtration la séparation de la liqueur aurifère.

b) Résultats

- Le PH de la pulpe avant cyanuration: PH= 8 (la pulpe est donc alcaline).

- Le PH de la pulpe après cyanuration: PH=10,8.

- La liqueur aurifère récupérée, par essai, après séparation solide-liquide est: $V=1340$ ml.

- La liqueur aurifère, après analyse par absorption atomique, titre à 13 mg/l.

- La teneur en or du minerai tout venant est : 41,3 gr/tonne.

- Donc 500 gr du minerai contiennent : $\frac{500 \times 41,3}{1000 \ 000} \times 1000 = 20,7$ mg d'or
- 1340 ml de solution titrant à 13 mg/l, contiennent : $\frac{1340 \times 13}{1000} = 17,4$ mg d'or
- La récupération est de : $\frac{17,4}{20,7} \times 100 = 84\%$
- Et il reste dans les résidus : $\frac{41,3 (100-84)}{100} = 6,6$ gr/tonne.

Résumant les conditions de traitement et les résultats dans le tableau suivant :

tableau (1) :

conditions d'opération	par essai
Granulométrie	inférieure à 70 um
Rapport S/L	1/3
PH	10,5
NaCN	0,1%
CaO	0,07%
Temps de contact	24 heures
<u>Résultats:</u>	
Alimentation Au gr/t	41,3 gr/tonne
Résidus Au gr/t	6,6 gr/tonne
% Au dissout	84%

Exemple de minerai se prêtant bien à la cyanuration directe:

Cette expérience a été réalisée au Canada, dans les laboratoires de la firme SINGEX sur un échantillon provenant du gisement de Boudouaou.

De tous les procédés essayés, sur ce minerai, seule la cyanuration directe a donné de bons résultats.

Le procédé ayant extrait plus de 90% de l'or après broyage à 74 μ m et un temps de contact de 48 heures.

Deux essais de cyanuration du tout venant furent effectués sur ce minerai dont les conditions de traitement et résultats sont (Cf. référence: (9)):

tableau (2):

Conditions d'opération	1er essai	2er essai
Granulométrie	100% passant 74 μ m	100% passant 74 μ m
Rapport S/L	1/3	1/3
PH	10,3	10,3
NaCN	0,05%	0,05%
CaO	0,05%	0,05%
Temps de contact	48 heures	48 heures
<u>Résultats:</u>		
Alimentation Au gr/t	14,58	14,58
Résidus Au gr/t	1,37	0,94
% Au dissout	90,6	93,6

c) Discussion.

Des résultats précédents (tableau (1)) qu'on a obtenu sur

le minerai de Hanane, on peut déduire les affirmations suivantes :

- 1) Le PH après l'opération de cyanuration a augmenté pour atteindre la valeur de 10,8; cela signifie qu'au cours de la lixiviation, il y a eu libération d'ions $(OH)^-$ et comme l'attaque de l'or par le cyanure de sodium engendre de la soude, on prévoit alors, avant analyse, que la réaction de cyanuration, représentée par l'équation d'Elsner, a probablement **eu** lieu.
- 2) Un temps de contact de 24 heures a permis la récupération de 84% ; et sûrement, si on avait augmenté davantage ce temps, le taux de récupération aurait été plus important, en atteignant aisément les 90% et même plus. De là, on peut affirmer avec certitude que la cyanuration, sur le minerai de Hanane, donne de bons résultats et par conséquent, on pourra l'employer éventuellement comme procédé de traitement à l'échelle industrielle.
- 3) Le résidu obtenu après cyanuration, de ce type de minerai riche, contiendra une teneur en or notable, même si ^{on} emploiera les conditions de dissolution optimums (pour le cas de notre échantillon, si la récupération était de 94%, le résidu peut titrer à 2,5 gr/tonne). On prévoit donc la reprise de ce résidu pour une nouvelle attaque.

F) Traitement de la liqueur aurocyanurée.

Le traitement de la liqueur aurocyanurée par le charbon activé a pour fonction d'éliminer, dans un premier temps; les impuretés (Fe, Cu, ...) et de donner finalement une liqueur aurifère plus concentrée destinée à être électrolysée pour extraire le métal précieux.

Dans cette partie, on connaît le mode opératoire par le ^hcarbon actif, qu'on appliquera à la bentonite-charbon, pour voir qu'est-ce que ça donnera.

a) Modes opératoires. (voir figure(3))

- A chaque opération, on procède selon le processus établi sur la figure(3): on met l'adsorbant dans une bouteille en plastique contenant la solution mère (solution aurocyanurée), le tout sera agité avec un temps de contact suffisant (dans nos opérations, on a pris 3 heures), pour permettre le transfert de matière, ensuite, on filtre pour séparer la solution rejet d'adsorption de l'adsorbant chargé d'or, celui-ci est repris, pour lui arracher l'or qu'il fixe à ses surfaces, à l'aide de la solution de soude (2%) mélangée à l'éthanol (20%).

L'opération de désorption est obtenue dans un flacon en pyrex bien fermé, qu'on a introduit et qu'on le laissera pendant 5 heures, dans une étuve réglée à la température de 70°C.

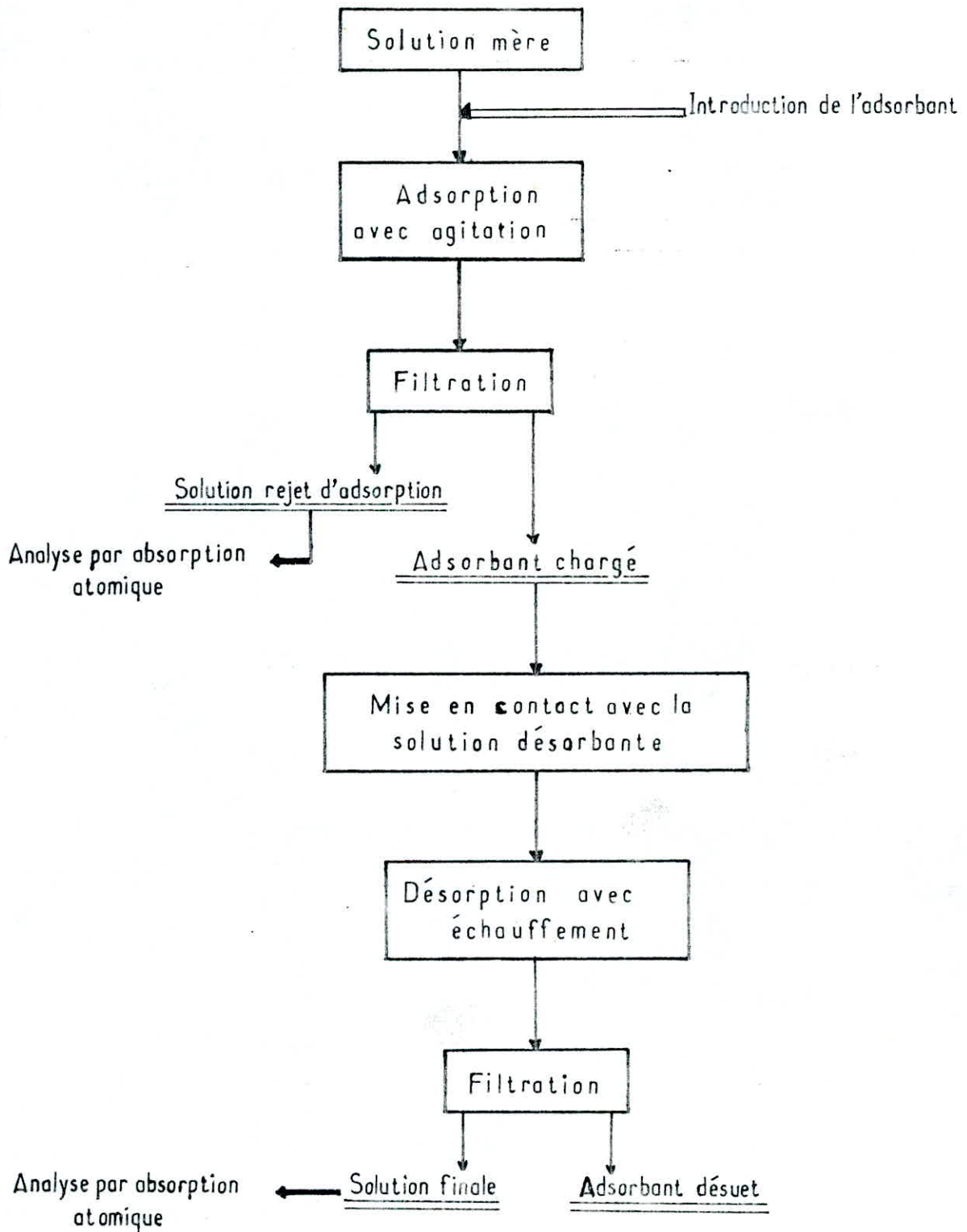
La fermeture des flacons permet d'opérer à une pression supérieure à la pression atmosphérique.

Toujours par filtration, on sépare la solution finale de l'adsorbant.

A la fin, chaque solution (solution mère, solution rejet, solution finale) subira une analyse par absorption atomique.

- On réalise quatre opérations:

- * 1ere opération: traitement par le charbon actif seul.
- * 2ere opération: traitement par la bentonite seule.
- * 3ere opération: traitement par le mélange charbon actif-bentonite.



Fig(3) : Essai, au laboratoire, d'adsorption-désorption d'une solution auocyanurée

* 4^{ème} opération: traitement par la bentonite de la solution rejet obtenue après adsorption par le charbon actif d'une solution aurocyanurée.

- Choix de la masse, d'un adsorbant, nécessaire pour traiter un litre de solution: Avant de procéder à la manipulation, on ne connaissait pas les résultats des analyses, on a travaillé alors par estimation. On avait évalué, par des calculs, que la solution aurocyanurée titrait à 10 mg d'or par litre de solution. Et comme, dans la littérature on dit qu'une tonne de charbon activé suffit pour adsorber 70 kg d'or (ou 1 gr de charbon activé/ 70 mg d'or), le choix de un gramme de charbon activé est largement suffisant pour traiter un litre de solution d'une teneur de 10 P.P.M.

La bentonite est un adsorbant faible, c'est pour cela qu'on traite la solution mère avec une masse plus importante que celle choisie dans le cas du charbon; on l'a fixé à 5 gr.

En ce qui concerne le rapport de masse choisie dans le mélange charbon-bentonite, il sera respectivement de 2/3 et 1/3 avec un total de 1 gramme.

Comme la solution rejet obtenue après le traitement sera probablement pauvre, on a pris 1 gr de bentonite pour traiter cette solution-rejet (volume à traiter faisait 955 ml).

- On veut obtenir finalement une solution dont la concentration en or serait de l'ordre de 100 mg/l. Sous la base de cette donnée qu'on a choisi le volume de la solution adsorbante pour faire déplacer l'or.

Ce volume a été fixé à 90 ml (fixé avec estimation en prenant le cas du charbon actif comme base de calcul) pour les trois premières opérations.

Pour la 4^{ème} opération, on l'a fixé à 50 ml, car la solution mère est pauvre.

Résumons les conditions opératoires comme suite:

- masse bentonite/litre solution : 5gr/l
- masse charbon actif/litre solution : 1gr/l
- masse bent-charbon/ litre solution : 1gr/l, avec proportion respectivement 1/3 et 2/3.
- masse bent/solution rejet : 1gr/955ml.
- temps de contact adsorption : 3 heures.
- composition solution de désorption : N_2O OH=2%.
et C_2H_5OH = 20%.
- temps de désorption : 5 heures
- température de désorption : 70°C
- pression - désorption : P>Pa.

b) Résultats

Les résultats des analyses des différentes solutions sont rassemblés dans le tableau (3).

Pour déduire le tableau des valeurs (5), on aurait besoin des données (obtenus par mesures) réunis dans le tableau suivant:

Tableau (4): Les volumes de solutions récupérées après les opérations de filtration.

opération \ concentration	solution mère (mg/L)		solution rejet (mg/L)		solution finale (mg/L)	
	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
Charbon actif seul.	13	3,4	2,4	1,9	125	18
Bentonite seule.	13	3,4	11,9	3,2	5,5	1,7
Charbon actif - Bentonite.	13	3,4	3,9	2,8	79	1,6
Traitement par la bentonite de la solution rejet.	2,4	1,9	2,2	1,8	0,8	0,5

Tableau (3) : Résultats des analyses.

Tableau (4) :

volume récupéré	solution rejet	solution finale
n°de l'opération	(ml)	(ml)
1ere	970	84
2ere	920	81
3ere	966	83
4ere	925	40

- Calcul du pouvoir d'adsorption du charbon actif et de la bentonite.

Selon nos expériences, avec les conditions adoptées:

* Un gramme de charbon actif a adsorbé $\frac{(80,8 + 1,3) \times 13}{100} =$

10,63 mg d'or; autrement, une tonne de charbon activé, peut adsorber 10,63 kg d'or.

* 5 grammes de bentonite naturelle a fixé $\frac{(3,4 + 12,4) \times 13}{100} =$

2,05 mg d'or, et un gramme fixe $\frac{2,05}{4} = 0,41$ mg; c'est-à-dire

qu'une tonne de bentonite peut fixer 0,41 kg d'or.

* En calculant le rapport entre les deux valeurs, on trouve que le pouvoir d'adsorption du charbon actif est 26 fois plus fort que celui de la bentonite.

Taux d'Or (Argent) N° de l'opération.	Non adsorbé (%)		Adsorbé (%)		Désorbé (%)		Non désorbé (%)	
	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
1 ^{ère} charbon actif seul.	17,9	54,2	82,1	45,8	80,8	44,7	1,3	1,1
2 ^e Bentonite seule.	84,2	86,6	15,8	13,4	3,4	4,1	12,4	9,3
3 ^e charbon actif - Bentonite.	29,0	79,6	71,0	20,4	50,4	3,9	20,6	16,5
4 ^e Traitement par la bentonite de la solution rejet.	88,8	91,8	11,2	8,2	1,4	1,1	9,8	7,1

Tableau (5) : Taux d'Or (et d'Argent) - calculés par rapport à la concentration de la solution mère - des différentes phases, après adsorption et désorption.

c) Interprétation

En méditant bien les résultats de la subdivision précédente, et notamment le tableau (5), on déduit les conséquences suivantes :

1) On s'est assuré que le charbon actif a une bonne affinité envers l'or, cependant, la quantité du charbon utilisé n'a pas adsorbé la masse d'or espérée, en effet le charbon activé peut adsorber plus de 90% d'or avant d'atteindre son équilibre; alors que dans notre essai, seulement 82,1% d'or ont été adsorbés et en plus la capacité d'adsorption du charbon activé calculée dans notre cas est de 1gr de charbon actif par 10,63 mg d'or; alors que dans la littérature, on dit 1gr de charbon actif peut adsorber jusqu'à 70 mg d'or. Ce rabatement est dû, soit parce que :

- le charbon utilisé n'a pas une surface spécifique importante.

- le temps de contact charbon/solution pris (3 heures) était insuffisant.

- notre solution contient trop d'impuretés (métaux lourds) qui peuvent abaisser l'adsorption de l'or.

Autre remarque: Le charbon activé en granulés ne permet pas seulement une très bonne adsorption vis-à-vis de l'or, mais aussi sa facilité de manipulation dans les opérations solide-liquide: dans notre essai, la filtration était aisée et pas un grain de charbon n'a été perdu, et c'est le contraire ce qui s'est passé avec la bentonite et le mélange bentonite-charbon en poudre.

2) La solution de désorption préparée a permis une bonne désorption de l'or (et de l'argent): en calculant le taux de désorption par rapport à la quantité fixée par le charbon actif, on trouve que 98,4% d'or (97,6% d'argent) ont été déplacés.

3) On constate aussi, en observant le tableau (5), que le charbon a adsorbé seulement 45,8% d'argent contenu initialement dans la solution, contre 82,1% d'or; cette remarque nous apprend que l'argent est plus lent à être adsorbé par le charbon actif que l'or.

4) La bentonite n'est absolument pas un bon fixateur de l'or, avec un pouvoir d'échange (calculé) est de 1gr de bentonite par 0,41 mg d'or, qui est 26 fois plus faible que celui du charbon actif.

On sait que les ions complexes aurocyanurés (et argents-cyanurés) s'adhèrent, au sein du charbon, par adsorption physique. Mais quel est le mécanisme d'échange dans le cas de la bentonite? On a lu à ce sujet dans le traité "technique de l'ingénieur", qui nous fournit la réponse: "on a constaté que la kaolinite et la montmorillonite peuvent échanger des anions et des cations. L'ion OH^- de ces minéraux ionisés peut s'échanger avec les ions Cl^- , SO_4^{2-} et PO_4^{3-} . Un échange semblable existe entre les ions OH^- et des ions complexes du type $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ et $[\text{Ag}(\text{CN})_2]^-$ " (cf référence (3)).

Il s'agit donc d'un échange d'anions.

5) La solution de soude et d'éthanol n'est pas la solution qui convient à déplacer l'or de la bentonite.

6) La bentonite a tout de même fixé une quantité d'or (et d'argent) notable, ceci nous amène à dire que s'il arrive qu'un minerai aurifère renfermant dans sa gangue de la bentonite, le traitement par voie humide occasionnere, sûrement, une baisse significative lors de l'extraction.

7) L'effet synergique souhaité n'a pas eu lieu l'orsqu'on a mêler la bentonite au charbon actif.

Au contraire elle n'a fait que diminuer le taux d'adsorption de

l'or, qui reste quand même important; mais en ce qui concerne l'argent, ce taux a décréû considérablement.

8) Le traitement par la bentonite du rejet d'adsorption par le charbon n'a pas donné, lui aussi, de bons résultats en ce qui concerne la fixation de l'or (et de l'argent).

CONCLUSION

CONCLUSION

A travers la partie théorique, exposée dans ce polycopié, on avait décrit le processus suivi dans l'élaboration de l'or, ainsi que les différents procédés et la tendance de cette métallurgie à se rénover.

La complexité du traitement d'un minerai aurifère donné dépend évidemment de la composition de sa gangue et de la taille des particules d'or qu'il renferme.

La cyanuration directe est la méthode de concentration la plus simple qui permet une récupération à haut rendement; c'est avec laquelle on a traité le minerai de Hanane, le résultat de notre essai permet de confirmer avec certitude que la cyanuration directe convient bien comme technique de traitement de ce minerai en provenance du Hoggar; d'ailleurs il présente toutes les qualités favorables à la cyanuration directe.

Un temps supplémentaire, nous aurait permis de définir les conditions d'opérations optimums, il suffirait de jouer sur les paramètres de dissolution et d'en faire une pesée.

Pour ce qui est du traitement de la solution aurifère, nos essais nous ont permis de s'assurer sur l'efficacité du charbon actif. Quant à l'effet synergique escompté, il n'a pas eu lieu en incorporant de la bentonite au charbon activé.

De même, le traitement par la bentonite en vue de fixer l'or résiduel d'une solution appauvrie après adsorption par le charbon actif, n'a pas donné un résultat satisfaisant. Il est aussi intéressant de refaire cette dernière opération avec du kaolin, qui possède une certaine affinité envers l'or; ou même avec de la bentonite activée.

Finale-ment, dans le cadre de la préparation à l'exploitation, en Algérie, des gisements aurifères (qui n'aura pas lieu probablement dans l'immédiat), il est raisonnable de chercher dès maintenant, une matière première à partir de laquelle on parviendra à fabriquer du charbon actif (idée de notre promoteur) qui conviendra à celui demander par la métallurgie de l'or, afin d'éviter le recours à l'importation.

On pourra essayer, dans cette investigation; par exemple: les coques des noyaux d'olives, pêches, prunes, abricots, etc.

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE.

- (1) P.PASCAL : Nouveau traité de chimie minérale.
L'Or par Hagemuller, tome III, Masson 1954.
- (2) R.MICHEL : Métallurgie de l'Or.
Technique de l'Ingénieur (M2384), 1982.
- (3) E.ROQUES : Métallurgie de l'Or; Métallurgie de l'Argent.
Technique de l'Ingénieur (M2280 et M2290), 1956.
- (4) Encyclopédie Générale Larousse : Article sur l'Or.
- (5) G.MILAZZO : Electrochimie. Tome 2 : Applications industrielles
Dunod.
- (6) R. PAPIN : Adsorption.
Technique de l'Ingénieur (J2730), 1965.
- (7) G. AUSTERWEIL et R.VINCENT : Echange d'ions.
Technique de l'Ingénieur (J2750), 1965.
- (8) DEGREMONT : Mémento technique des eaux.
Paris 1978.
-
- (9) Rapport SINGEX : Résultats des essais de concentration sur
échantillons technologiques.
Canada 1972.
- (10) G. ARDITTI : Technologie chimique industrielle.
Tome II : Transfert de matière sans intervention
de la chaleur. Eyrolles 1968.
- (11) G. CHARLOT : Chimie analytique quantitative. Tome II.
Masson et scie, Paris 1974.
- (12) L. CAMPREDON : Guide pratique du chimiste métallurgiste et
de l'essayeur.
Librairie polytechnique CH.Béranger, Paris 1923.
- (13) P. PRUVOT : Spectrométrie de Flammes.
Gauthier-Villars, Paris 1972.

- (14) M. PINTA : Spectrométrie d'absorption atomique.
Tome 2 : Application à l'analyse chimique.
Masson, Paris 1971.
- (15) G. KREMPP et D. MILLION : Méthodes d'analyses chimiques des
roches et des eaux naturelles.
Université Louis Pasteur, strasbourg. Septembre 1975.
- (16) A. BENDJEMAA : Etude des bentonites algériennes, application
à la décoloration des huiles.
Magister de Genie chimique, E.N.P. 1981.
- (17) G. AUBERT : Précis de minéralogie.
Masson et B.R.G.M , 1978.
- (18) F. BENKESSIOUER : Etude de la Fixation du Pb. dissous par une
bentonite . Thèse de Fin d'études.
département Genie Sanitaire (E.N.P), Promotion Janvier 1984.
- (19) K. GHERRAM : Etude technico-économique en vue de la mise en
valeur du gisement d'Or de Boudouaou.
-Thèse de Fin d'Etudes-
département Mines et Métallurgie (ENP), promotion : 1974.

