

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT GENIE MINIER



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
 BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
 Ecole Nationale Polytechnique

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
 Ecole Nationale Polytechnique

# Projet de Fin d'Etude

*Pour l'obtention de diplôme d'ingénieur d'état en génie minier*



*Thème*



**Essais de simulation d'une lixiviation  
 cyanurée en tas (sur colonnes) du  
 minerai d'or de TIREK (HOGGAR).**

Proposé par :

ENOR

Dirigé par :

Mr . A SAADA.

Etudié par :

Mr BELLILI Nouredine

Année universitaire 1999/2000

ENP 10 , Avenu Hassen Badi EL-HARRACH-ALGER

*Hacène*

# dédicace

**A** ma chère mère, source d'amour et de sacrifice,

**A** mon cher père pour son dévouement pour ses enfants.

**A** mes frères et sœurs.

**A** tous mes amis,

**Et a** tous ceux qui me sont chers

**Je dédie ce modeste travail.**

**Noureddine**

## Remerciements

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

C'est pour moi un grand plaisir d'exprimer mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Ces remerciements vont tout particulièrement à :

M<sup>r</sup> A. SAADA mon promoteur, pour le suivi et ses conseils très utiles durant la réalisation de ce travail.

A Madame CHABOU chef du département Génie Minier, pour ses aides et conseils.

A tous les enseignants du département pour leurs attentions particulières à mon égard.

Mes remerciements s'adressent également à :

M<sup>r</sup> A. NOUAOUA PDG de l'ENOR

M<sup>r</sup> K. BAAZIZ chef de projet de l'ENOR, M<sup>lle</sup> F. REBHI, géologue de l'ENOR, M<sup>r</sup> M. HAMISSI ingénieur de traitement, M<sup>r</sup> M. BICHIRI et M<sup>r</sup> R. TOUKEL ingénieur des mines( ENOR).

M<sup>r</sup> H. KERDJOUJI, professeur et directeur du laboratoire de valorisation (U.S.T.H.B) et toute son équipe.

M<sup>r</sup> M. ZIBOUCHE, directeur des laboratoires (ERGM),

M<sup>r</sup> M. AINOUCHE, chef du laboratoire de valorisation ORGM ; M<sup>r</sup> C. ABDELOUAHAB, chef de la section analyse et aux techniciens de l'ORGM.

M<sup>r</sup> T. AHMED-ZAID, chef du département génie chimique de l'E.N.P.

pour leur aide et l'attention qu'ils m'ont prêté durant la réalisation de ce projet de fin d'études.

Et enfin, je remercie :

Monsieur L. MOKHTARI, ingénieur d'état en électronique, pour son aide et ses conseils, et sa disponibilité pour la mise en œuvre de ce document

# Sommaire

الدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

## *Introduction générale*

1) Introduction générale : .....	1
2) Les propriétés : .....	1
3) Les minéraux d'or : .....	2
4) Les principaux pays producteurs : .....	3
5) Utilisation de l'or : .....	4

## **Partie théorique**

### *Chapitre I*

#### *Les méthodes de traitement*

1) Gravimétrie : .....	5
2) Amalgamation : .....	7
3) Flottation : .....	8
4) Chloruration : .....	9
5) Cyanuration : .....	10
6) Choix du procédé d'enrichissement des minerais d'or: .....	10

### *Chapitre II*

#### *La cyanuration*

1) Introduction.....	13
2) Réactifs de cyanuration : .....	13
3) Effet de la concentration de cyanure sur le taux de dissolution : .....	14
4) Effet de l'oxygène sur la dissolution de l'or : .....	15
5) Effet de l'alcalinité du milieu : .....	16
6) Effet de la température sur la cyanuration : .....	17
7) Influence des minéraux accompagnateurs : .....	18
8) Types de cyanuration : .....	20

8.1) La cyanuration en cuves agitées :	20
8.2) La Cyanuration en tas :	21
9) Traitement des minerais réfractaires :	23
10) Méthodes de récupération de l'or :	24
11) Cyanuration et environnement :	26

## Partie expérimentale

### Chapitre I

#### *Le gisement de TIREK*

1) Gisement de Tirek .....	27
2) Echantillonnage: .....	31
3) Identification du minerai : .....	34
4) Caractérisation physique et physico-mécanique : .....	35
5) Enrichissement physique de minerai d'or de Tirek.....	38
6) Analyse granulochimique .....	44

### Chapitre II

#### *Le traitement hydrométallurgique du minerai d'or de TIREK*

1) Introduction : .....	49
2) la cyanuration en cuve agitée : .....	52
3) Cyanuration en tas (lixiviation en colonnes): .....	65
4) Cyanuration en colonne (perfusion) : .....	79
<b>Conclusion générale</b> .....	85

Annexes

THE UNIVERSITY OF CHICAGO

PHYSICS DEPARTMENT

## 1) Introduction générale : [8]

L'or est un métal noble, connu depuis l'antiquité ; son inaltérabilité et sa rareté font que son cours soit élevé. Les exploitations sont caractérisées par des faibles teneurs d'extraction (quelques grammes ou dizaines de grammes par tonne suffisent pour rentabiliser son exploitation).

## 2) Les propriétés

### 2.1) Propriétés physiques :

L'or est le minéral le plus malléable, le plus ductile dans la famille des métaux.

Les possibilités mécaniques exceptionnelles de l'or justifient son emploi sous forme de feuilles très minces ou de filaments de très faible section.

L'or est un métal de structure cubique à faces centrées. Le rayon atomique est de l'ordre de  $R=1.44 \text{ \AA}$ .

### 2.2) Propriétés chimiques :

L'or est le moins électropositif des métaux, du fait de la grande stabilité de l'unique électron périphérique de son atome. Il ne se rencontre pas sous forme de composé ionique, la liaison étant toujours covalente. Il n'est attaqué qu'à chaud par les halogènes, et à température ambiante par l'eau régale, à la fois oxydante et complexante. L'or est pratiquement inoxydable et inaltérable dans les conditions usuelles d'emploi.

Les principales caractéristiques sont résumées ci-après :

. Masse atomique .....	197,2
. Masse volumique à 20°C.....	19,3g/cm <sup>3</sup>
. Température de fusion .....	1063°C
. température d'ébullition.....	2857°C
. Résistivité à 20°C .....	2,3 x 10 ohm.cm
. Tension normale du système AU/AU <sup>+</sup> .....	1,11 volts

### 3) Les minéraux d'or : [1][9]

L'or se présente le plus souvent à l'état natif, il peut être allié à l'argent, et, quand la teneur de ce dernier est supérieure à 20%, l'alliage prend le nom d'Electrum.

L'or existe dans la nature sous des formes minéralogiques peu nombreuses, résumées dans le tableau ci dessous :

Minéral	Formule	Densité	Dureté	% AU	Couleur
Or natif	AU	16 - 19	2,5 - 3	>75	Jaune D'or
Calaverite	(AU, Ag) Te <sub>2</sub>	9,2	2,5 - 3	40	Jaune bronze
Sylvanite	(AU, Ag) <sub>2</sub> Te	8,2	1,5 - 2	24 - 30	Gris acier
Petzite	(AU, Ag) <sub>2</sub> Te	9,1	2,5	19 - 25	Gris ,noir
Nagyagite	Au <sub>2</sub> Pb <sub>14</sub> Sb <sub>2</sub> Te <sub>7</sub> S <sub>17</sub>	7	1 - 1,5	6 - 13	Gris plomb
Hessite	(Au, Ag) <sub>2</sub> Te	8,4	2,5 - 3	<5	Gris Acier

Tableau 1: principaux minéraux d'or (1).



#### 4) Les principaux pays producteurs : [2]

Tous les pays cherchent à récupérer leurs métaux précieux, en particulier l'or, même si les exploitations ne sont pas toujours économiquement rentables. Ce pendant, les marchés mondiaux sont dominés par quelques géants qui concentrent la presque totalité des ressources mondiales de ces métaux.

Pays producteurs	Années					
	1995	1994	1993	1990	1980	1970
Afrique du sud	524	579	619	603	673	1000
Australie	294	256	248	244	30	23
Brésil	65	71	71	102	18	6
Canada	151	147	153	169	51	73
Ex. URSS :	218	230	239	245	270	400
Ouzbékistan	70	70	75	70		
Russie	132	140	144	145		
Chili	45	39	34	28	7	2
Chine	160	160	160	100	2	02
Colombie	21	27	27	29	16	6
Etats-Unis d'Amérique	312	326	331	294	30	56
Ghana	54	45	39	17	11	22
Indonésie	63	45	42	11	2	
TOTAL MONDE		2247	2228	2066	1205	1697
Pays à économie de marché		1864	1819	1712	923	1281
Pays à économie planifiée		383	409	354	282	416

Tableau 2: les principaux pays producteurs (2)

## **5) Utilisation de l'or : [1]**

Les usages de l'or sont, à l'heure actuelle, répartis entre :

- ❖ Joaillerie et décoration ;
- ❖ Electricité, thermocouples au Pb-Au, galvanométrie;
- ❖ Médecine(cible de rayons X et médicaments) ;
- ❖ Filature(alliage Pt-Au pour la fabrication de la viscose) ;
- ❖ Thésaurisations nationales et privées ;
- ❖ Pièces de monnaie ;
- ❖ Photographie(chlorure d'or pour la photographie en couleur).

# Chapitre I

## **Partie**

## **théorique**

# Chapitre I

## Méthodes de traitement des minerais aurifères

Si l'or est trop fin, il peut avoir tendance à flotter à la surface de l'eau ou du Mercure ;

❖ La présence de certains sulfures solubles dans l'eau provoquent des difficultés dans le processus de l'amalgamation ;

Les procédés d'amalgamation peuvent être effectués de deux façons :

-a-procédé ancien :

La pulpe coule au-dessus d'un film visqueux de mercure fixé sur des tables de cuivre légèrement inclinées, et, pouvant être animées de secousses transversales : c'est l'amalgamation par contact de surface.

-b-procédé moderne :

C'est l'amalgamation par le mercure liquide, appelé aussi procédé au tonneau (baril). Dans ce procédé on associe à l'amalgamation un traitement gravimétrique récupérant l'or libre et les sulfures dans un concentré, qu'on amalgame ensuite dans un baril.

Cependant, l'amalgamation de l'or, présente des inconvénients, ayant pour conséquence un rendement encore insuffisant, dû :

-au manque de contact entre mercure-or ;

-à certains minerais réfractaires (tellurures, sulfures, surfaces ternies ou trop grande finesse des produits qui flottent sur le mercure) ;

-à la perte de mercure ;

-à la contamination des surfaces par l'huile, les graisses, le talc, le soufre.

### 3) Flottation [11]

La flottation est la méthode de concentration mécanique la plus répandue ; on peut caractériser ce procédé comme le mode de séparation d'un minerai finement broyé, mélangé à un liquide, permettant à certains minéraux de flotter à la surface de la pulpe, tandis que les autres se déposeront au fond.

La flottation utilise les différentes propriétés des interfaces entre les solides, une solution aqueuse et un gaz.

Les phénomènes de base de la flottation peuvent ainsi s'interpréter en terme de chimie physique des surfaces :

- l'interface solide-gaz.

Le processus de flottation est réalisé dans des cellules de flottation, dans lesquelles la pulpe est agitée intensivement par l'envoi d'un courant d'air qui crée des bulles.

La flottation des minerais d'or est mise en œuvre suivant une grande variété de configurations intervenant comme :

- procédé de concentration,
- procédé complémentaire de récupération,
- ou comme moyen d'élimination des espèces nocives.

L'or libre ne flotte pas aussi facilement que la plupart des sulfures et la durée de traitement devra être d'autant plus longue que le pourcentage du métal libéré est plus élevé.

La combinaison des réactifs comprend généralement :

❖ Des collecteurs : appelé aussi agglomérants, qui sont des substances hétéro polaires, agissant sur la surface des minéraux pour les rendre plus hydrophobes et s'attacher aux bulles d'air et aux molécules polaires du moussant soit :

- aérofloat liquide,
- xanthate d'alcool supérieur,
- dithiophosphate.

❖ Des régulateurs : ce sont principalement des réactifs déterminant le degré d'acidité ou d'alcalinité de la pulpe, autrement dit fixant le pH.

Dans le cas de l'or, le pH est généralement compris entre un pH naturel et une valeur de dix, réglé par le carbonate de sodium ou la soude.

❖ Des moussants : ce sont des agents tensioactifs qui agissent à la surface liquide-gaz et qui contribuent à former sur la surface de la pulpe une couche de mousse de propriété déterminée. les moussants utilisés sont : l'huile de pin ou l'acide crésylique.

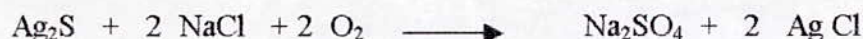
Les principales mines, utilisant la flottation comme moyen de concentration, sont celles situées aux U.S.A relevant de l'état de l'Idaho. La teneur en or de ces gisement dépasse les 1000g/t et le concentré de flottation est directement envoyé à la fonderie. Il en est de même pour certaines mines du Pérou et du Mexique.

Comme moyen de pré-concentration, la flottation est utilisée dans certaines mines de Canada où la teneur des gisement est moyenne. Le plus souvent l'or est associé à des sulfures.

#### 4) Chloruration : [1,2]

Parallèlement à l'amalgamation, et souvent pour retraiter les résidus de cette méthode, on a utilisé la chloruration, soit à froid en présence d'eau pour l'or, soit par grillage chlorurant pour l'argent.

La deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle a vu prédominer le grillage chlorurant pour la valorisation du minerai d'argent. Ce grillage s'opérait à 500-600<sup>0</sup>C en atmosphère oxydante :



Pendant la même période, on récupérait l'or des minerais pauvres ou des résidus d'amalgamation par action du chlore en présence d'eau. L'opération, presque complètement disparue au profit de la cyanuration, se pratique dans des cylindres tournants garnis intérieurement de plomb. L'or se dissout sous forme de tri-chlorure, précipité par H<sub>2</sub>S sous forme de sulfure. Si le minerai contient des sulfures, tellurures, arséniures ou antimoniures, on le soumet à un grillage préalable en présence d'un peu de ClNa (chlorure de sodium) qui réduit, par cette première chloruration partielle, le chlore consommé, à une température au plus égale à 300<sup>0</sup>C, pour éviter la valorisation du chlorure d'or formé. Une fusion alcaline en présence de borax et de chlorate de potassium permet la séparation de l'argent et des autres impuretés. Le brome peut également être utilisé si l'on veut un rendement plus grand, malgré un coût de traitement supérieur.

Ce procédé a été encore utilisé récemment au Mexique, en faisant suivre le grillage chlorurant d'une cyanuration (Minera Kildun).

## 5) Cyanuration : [13]

La cyanuration est la méthode de traitement des minerais d'or la plus largement utilisée. L'action dissolvante des cyanures, connue depuis longtemps, n'a été utilisée industriellement que vers 1887, à la suite des travaux de "MAC ARTHUR et FORREST".

Depuis, la méthode de cyanuration a connu des améliorations successives tant au niveau du procédé que de sa mise en œuvre.

La plus récente modification du procédé est l'emploi de charbon activé, pour adsorber l'or de la solution, au lieu d'employer le zinc pour le précipiter.

## 6) Choix du procédé d'enrichissement des minerais d'or: [2]

Le choix du procédé, dans le traitement des minerais d'or, dépend en premier lieu du type de gisement: gisement alluvionnaire ou placer, gisement primaire avec telle ou telle caractéristique.

La gravimétrie est la technique de prédilection pour traiter les placer où l'or, libre, souvent grossier, est inclus dans un matériau meuble ou peu consolidé.

Les gisements primaires sont, quant à eux, traités préférentiellement par cyanuration. Mais pour un nouveau gisement, une étude minéralogique est nécessaire pour définir les étapes du traitement minéralurgique et optimiser la récupération de l'or. Il faut déterminer les minéraux porteurs d'or, leur granulométrie, les minéraux hôtes et l'association qu'ils forment avec les minéraux portant l'or.

Par exemple, les parties superficielles oxydées d'amas sulfurés polymétalliques contiennent de l'or natif à des teneurs parfois exploitables. La finesse de l'or et la nature de son porteur imposent dans certains cas un traitement direct par cyanuration sans préconcentration. Des analyses minéralogiques fines permettent alors d'expliquer et de prévoir le caractère réfractaire d'une fraction de l'or contenu. Les oxydes de fer sont en outre responsables de problèmes importants de flottation, lorsqu'ils constituent le principal porteur de l'or.

Lorsqu'il s'agit de minerais sulfurés complexes aurifères, l'or ne s'exprime pas à l'état natif, mais s'intègre au réseau cristallin de sulfures, ce qui le rend invisible au microscope. La minéralogie quantitative permet tout d'abord d'évaluer l'opportunité d'une phase de préconcentration. Elle aide ensuite à sélectionner la phase minérale à préconcentrer et à faire le choix d'un procédé de traitement du concentré adapté à chaque cas. Une répartition hétérogène de l'or au sein des cristaux oriente la première partie du traitement vers une attaque ménagée, comme l'attaque bactérienne, pour avoir accès à l'or.

Bien évidemment, des essais sont nécessaires pour quantifier le comportement du minerai, lorsqu'il est soumis à telle ou telle opération. Les résultats des essais confirment les choix des procédés ou les orientent différemment.

Le schéma de la figure ci-dessous montre, de façon simplifiée, les différentes possibilités d'opérations, de la préparation mécanique à la récupération de l'or, en fonction du type de minerai.

En fait, le choix du meilleur procédé de traitement pour un minerai donné ne dépend pas seulement de sa minéralogie et en particulier des associations de l'or, mais aussi des évaluations techniques et économiques (taux de récupération de l'or, investissements et coût opératoires prévisionnels par once d'or), incluant l'aspect environnement et le risque technique.





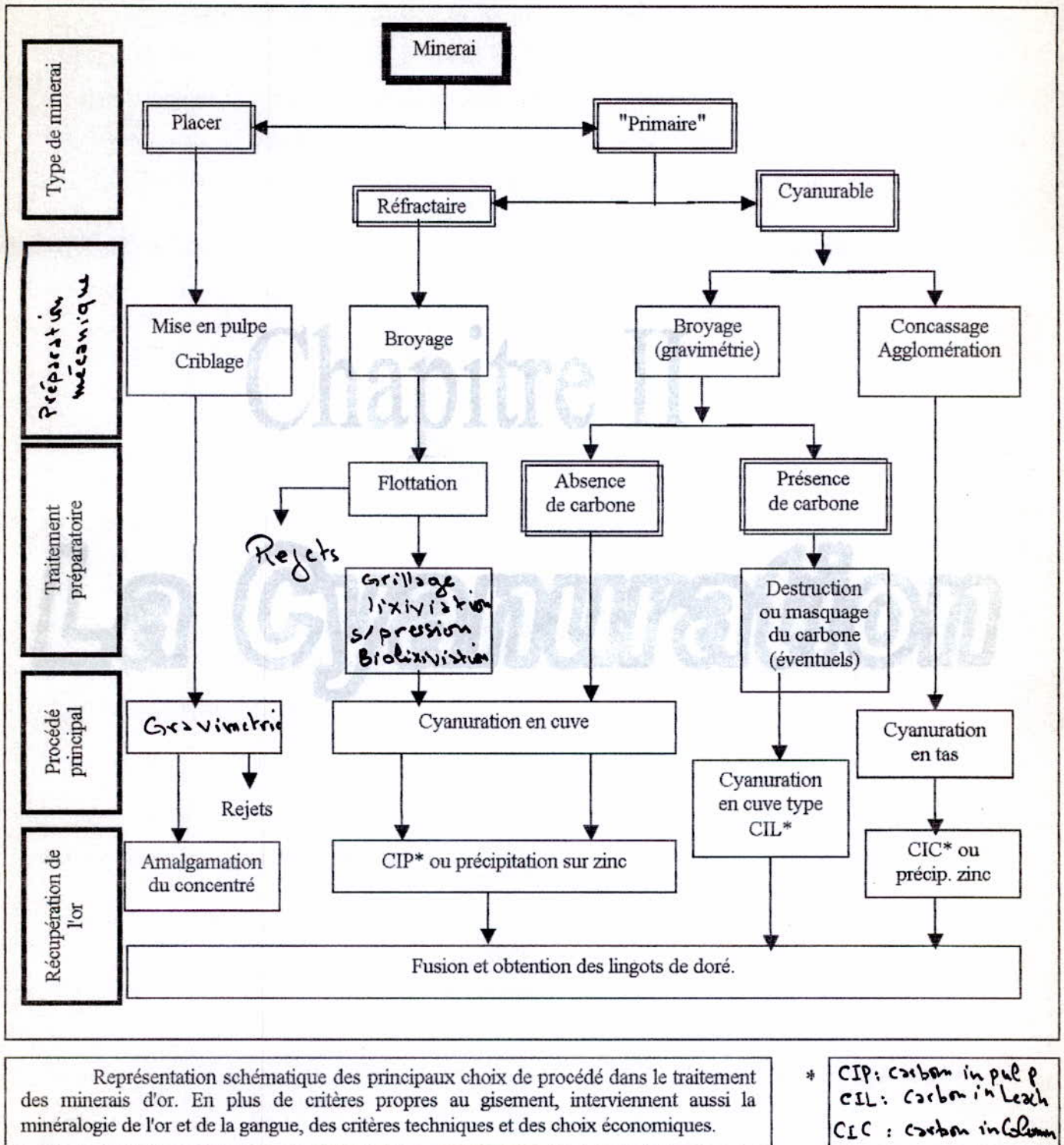


Figure 1 : choix du procédé dans le traitement des minerais d'or.

## Chapitre II

# La Cyanuration

## 1) Introduction

La Cyanuration est un procédé de lixiviation en milieu basique, ayant pour but de dissoudre le maximum d'un métal précieux en phase liquide. La récupération des métaux précieux par la cyanuration est beaucoup plus importante, lorsque les grains de minerai sont fins; dans le cas contraire, les procédés gravimétriques pour la concentration, et, l'amalgamation pour la dissolution de l'or sont utilisés.

Ce procédé a remplacé à peu près partout le précédent comme moyen le plus efficace de récupérer l'or et l'argent.

L'action dissolvante des cyanures, connue depuis longtemps, n'a été utilisée industriellement que vers 1887.

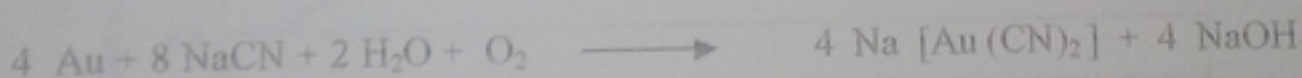
## 2) Réactifs de cyanuration : [1,2,14,]

### 2.1) les cyanures :

les cyanures les plus utilisés dans la cyanuration sont le cyanure de sodium et le cyanure de potassium. Ces deux sels sont toxiques et constituent des poisons; il faut les manipuler avec précaution. Le NaCN est largement utilisé dans la cyanuration, parce qu'il est moins coûteux que le KCN.

### 2.2) Chimie de la mise en solution des métaux précieux par le cyanure :

la réaction, qui se produit durant la dissolution de l'or dans les solutions de cyanure, sous les conditions normales de température et de pression, a été définie comme suit :



Par l'équation d'ELSNER pour la dissolution de l'or, on fait réagir le cyanure de sodium sur le métal. Le cyanure se dissocie pour donner les ions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{CN}^-$ ; ces ions vont s'associer à l'or pour former de nouveau des ions complexes  $[\text{Au} (\text{CN})_2]^-$ , solubles dans le solvant.

Selon la réaction, la présence d'oxygène est indispensable pour la cyanuration; il faut environ quatre (4) moles de cyanure dans la solution.

Plusieurs minerais d'or réagissent selon cette réaction. Les problèmes dans l'extraction sont plus mécaniques que chimiques; d'autres minerais présentent des problèmes chimiques dépendant des différents constituants des minerais, tels que le quartz, les minéraux

de silicates de métal alcalin, relativement inactifs aux solutions de cyanure ; de tels constituants sont fréquemment présents dans les minerais, dans des proportions quantitatives très supérieures à la quantité d'or contenue.

### 3) Effet de la concentration de cyanure sur le taux de dissolution : [18]

Les solutions de cyanure dissolvent aussi les autres métaux, tels que le cuivre, le nickel, le cobalt ; cette solubilité est fonction de la concentration en cyanure. Les quantités de cyanure utilisées dépendent également de la teneur du métal précieux et de la nature du minerai à traiter.

Pour la dissolution de l'or et de l'argent, on utilise des solutions très diluées, en général, l'optimum de solubilisation est de 0.05 % de NaCN pour l'or et de 0.1 % de NaCN pour l'argent.

Le taux de dissolution de l'or augmente linéairement avec une augmentation de la concentration de cyanure jusqu'à atteindre un maximum, au delà de ce maximum de concentration en cyanure il n'y a plus d'or, au contraire, cela a un effet retardateur, cette diminution du taux, aux fortes concentrations en cyanure, est due à l'hydrolyse des ions CN.

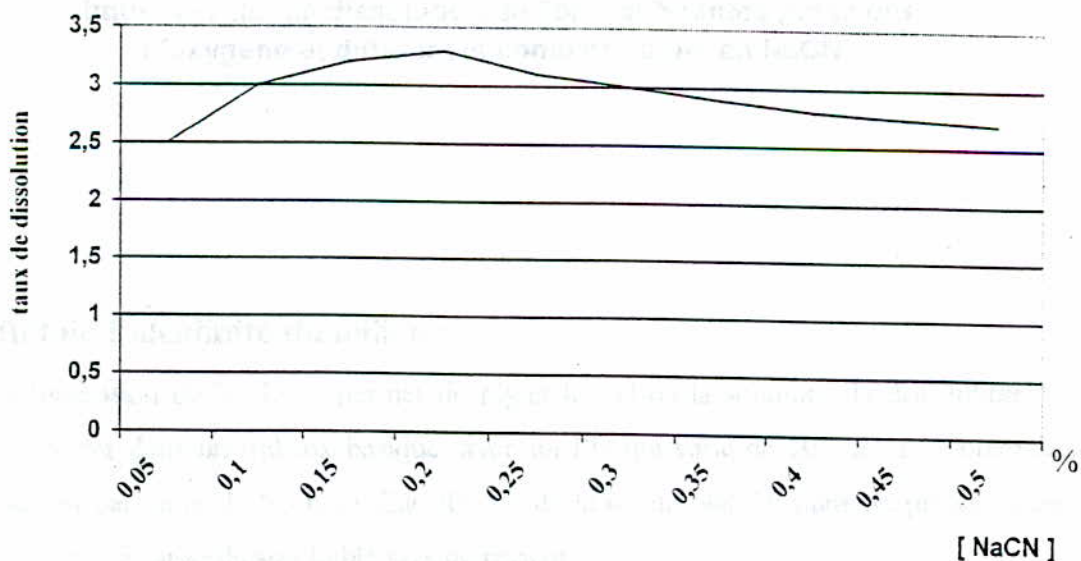


Figure 1 : effet de la concentration en cyanure. [18]

#### 4) Effet de l'oxygène sur la dissolution de l'or : [14]

L'utilisation de l'oxygène ou d'un agent d'oxydation est essentielle pour la dissolution de l'or sous les conditions normales de la cyanuration.

La présence d'oxygène augmente le rendement et empêche la réduction de l'or dissous en or élémentaire. A partir des résultats, on pourrait noter que le taux de dissolution de l'or est directement proportionnel à la teneur d'oxygène du gaz utilisé, et, aussi directement proportionnel à la pression partielle de l'oxygène.

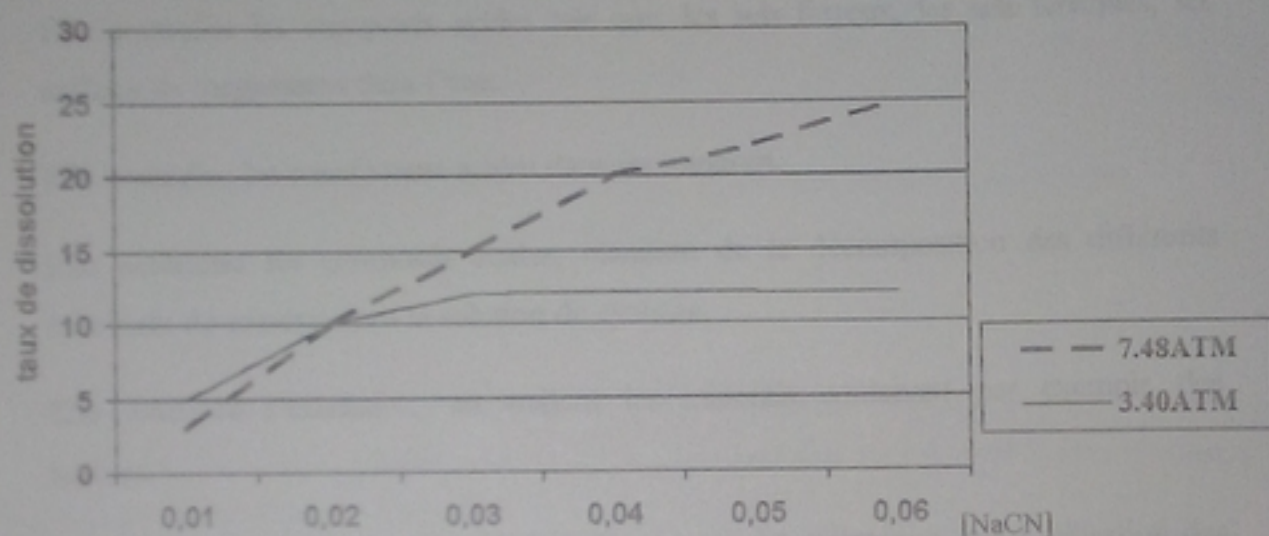


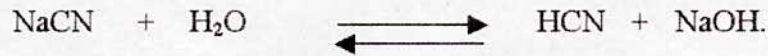
figure-2-Taux de dissolution de l'or à différentes pressions d'oxygène et différentes concentrations en NaCN

#### 5) Effet de l'alcalinité du milieu :

L'utilisation de la chaux permet de régler le PH de la solution ; la dissolution de l'or doit se dérouler dans un milieu basique, avec un PH qui varie de 10.5 à 11. L'obtention de ce PH se fait par ajout de la chaux  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ou de la soude  $\text{NaOH}$ , mais on préfère utiliser le premier réactif, à cause de son faible prix de revient.

La fonction de la chaux dans la cyanuration s'établit comme suit :

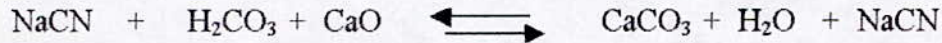
- Elle empêche la perte de cyanure par l'hydrolyse du cyanure :



- Elle empêche la perte de cyanure par l'action du dioxyde de carbone de l'air :



- décomposant les bicarbonates dans l'eau avant de l'utiliser dans la cyanuration



L'ajout de la chaux neutralise ou maintient l'alcalinité de la solution, et, réagit avec le dioxyde de carbone, formé à partir du  $\text{CO}_2$  de l'air

- Elle neutralise les composés acides tels que, les sels ferreux, les sels ferriques, les sulfates de magnésium dans l'eau.
- Elle neutralise les constituants acides dans les minerais.
- Elle neutralise les composés acides, résultant de la décomposition des différents minéraux du minerai dans la solution de cyanure.
- Elle améliore l'extraction, en traitant les minerais contenant par exemple des tellures.

L'alcalinité protectrice dans la solution de cyanure est maintenue, par l'utilisation des autres alcalins, tels que l'hydroxyde de calcium et les carbonates de sodium.

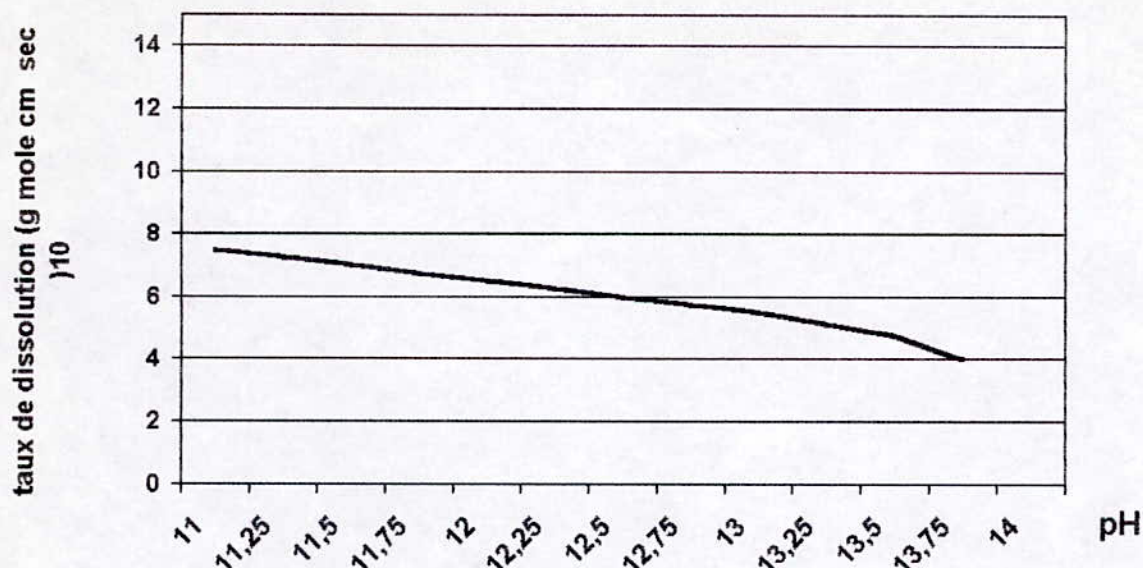


Figure - 3 -: Effet du pH sur le taux de dissolution de l'or par le KCN

### 6) Effet de la température sur la cyanuration : [13]

Lorsqu'une solution de cyanure contenant l'or métallique est traitée à chaud, deux facteurs s'opposent touchant le taux de la dissolution :

- L'augmentation de la température serait prévue, pour augmenter l'activité de la solution et ceci augmenterait le taux de dissolution de l'or.
- Au-delà d'une certaine valeur, une augmentation de la température a pour effet de réduire la concentration d'oxygène en solution.

Le taux de dissolution maximum est atteint vers 80°C, au-dessous de 100°C (degré d'ébullition), il y a décomposition très importante du cyanure.

En pratique, l'utilisation des solutions chaudes pour l'extraction de l'or, à partir d'un minerai, présente plusieurs inconvénients : soient le coût de l'énergie utilisée dans le réchauffement du minerai et de la solution, la décomposition croissante du minerai due à la réaction accélérée entre le cyanure et les constituants du minerai, tels que les sulfures de cuivre, de fer, etc...

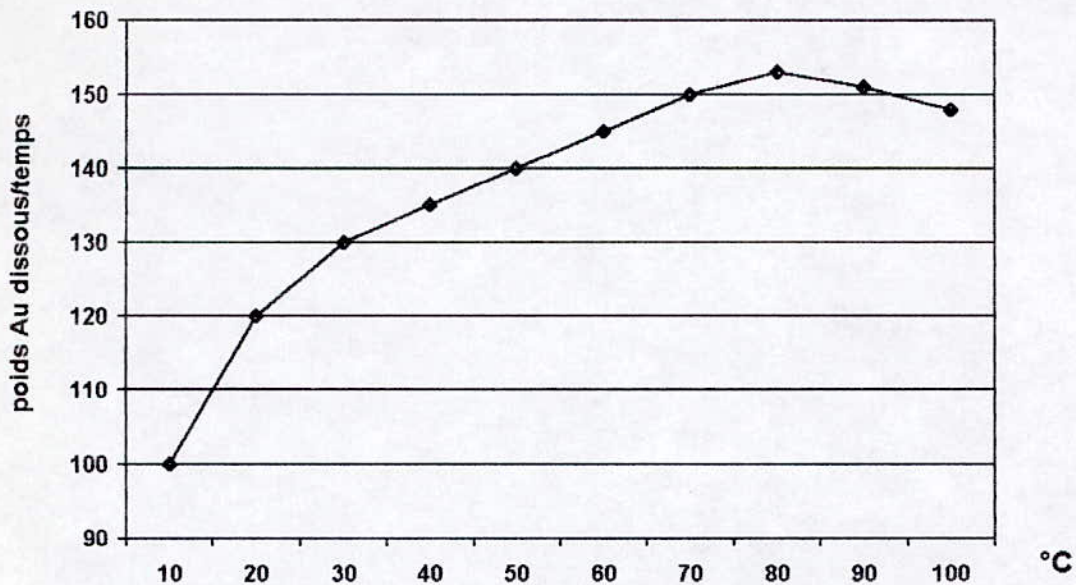


figure -4-: Effet de la température sur la dissolution de l'or.

## 7) Influence des minéraux accompagnateurs : [1,2]

1/ Les minéraux de cuivre et zinc :

Il est pratiquement impossible de prévoir comment un minerai agira durant la cyanuration. En général chaque minerai a ses spécifications dans sa réaction avec la solution cyanurée. Une des fréquentes sources de trouble dans la cyanuration est la présence de minéraux de cuivre dans un minerai ; son effet sur la dissolution et la précipitation de l'or ou autres est gênante.

Le zinc dans une solution de cyanure se dissout comme suit, exemple de la sphalérite :



La dissolution de ces minéraux entraîne une consommation excessive de cyanure.



## 2/ Les minéraux d'arsenic et d'antimoine :

Ces minéraux sont plus ou moins solubles dans les solutions de cyanure , augmentant la consommation de réactifs et d'oxygène, et, retardant la cinétique d'extraction de l'or en formant un film à la surface des grains d'or, résultant de la précipitation des produits d'attaque de l'arsenic et de l'antimoine. Une autre inconvénient, est l'apparition de l'arsenic, lors de la précipitation sur la poudre de zinc, et, surtout la formation de  $AsH_3$ , gaz très toxique.

Dans ce cas, l'or est en général concentré et grillé.

## 3/ Les minéraux de fer :

les sulfures de fer : pyrite, marcassite et pyrrhotine, s'oxydent et passent en partie à l'état de sulfate de fer lors de la cyanuration. Cependant la pyrrhotine,  $Fe_nS_{n+1}$ , très oxydable et beaucoup plus instable que les pyrites pose de sérieux problèmes, lors de la dissolution, car, étant attaquée par le cyanure ou la chaux, cela entraîne une consommation supplémentaire d'oxygène et un ralentissement de la cinétique par la formation d'un film protecteur de sulfure ( $AuS$ ), ainsi que la précipitation de l'or par les ions de fer.

## 8) Types de cyanuration : [1, 2, 15, 17]

### 8.1) La cyanuration en cuves agitées :

Après concassage, le minerai mélangé à de l'eau est broyé à une dimension de l'ordre de 0,1 millimètre dans des broyeurs à barres ou à boulets. La pulpe ainsi préparée traverse une série de quatre à huit cuves, dans lesquelles la réaction de dissolution a lieu après ajustement de la concentration en cyanure de sodium NaCN aux environs de 0,5 g/l. De l'air est injecté dans les cuves. L'addition de chaux ( de 1 à quelques kg/t de minerai traité) maintient l'alcalinité du milieu à un pH de 10 à 11 ; cela évite la formation de gaz cyanhydrique extrêmement toxique. Le temps de séjour moyen de la pulpe dans les cuves varie de douze(12) à quarante(40) heures, en fonction du minerai traité et de la dimension des grains d'or. L'attaque chimique consomme de 0,2 à 1 kilogramme de cyanure de sodium par tonne de minerai ; l'attaque est conduite à la température ordinaire, ce paramètre n'ayant une influence que sur la cinétique d'extraction.

Lorsqu'elle est possible, la récupération préalable des grosses particules d'or par gravimétrie réduit le temps de séjour et les pertes de métal dans les rejets de cyanuration .

Les cuves de cyanuration peuvent être de différents types. Historiquement, on trouve d'abord les pachucas : ce sont des réacteurs à forme haute, dans lesquels l'air est injecté par le bas dans un tube central, assurant le mouvement de la pulpe dans la cuve. Par la suite, les agitateurs DOOR apparaissent : ces réacteurs de forme basse possèdent un racleur en fond de cuve et une injection d'air par l'axe soutenant le racleur. Aujourd'hui, ces deux types de réacteurs ont pratiquement disparu au profit des cuves agitées ; ces réacteurs possèdent un système d'agitation mécanique (du type hélice), qui maintient la pulpe en suspension et assure une dispersion homogène de l'air dans la cuve. Les cuves agitées consomment moins d'énergie et sont moins sujettes au phénomène de court-circuitage.

La cinétique de la cyanuration et les consommations de réactifs sont grandement influencées par la minéralogie du minerai traité. Certains minerais restent cependant réfractaires à la cyanuration. Un traitement avant cyanuration est alors nécessaire pour rendre au minerai ou à la pulpe traitée, son aptitude à la cyanuration (voir traitement des minerais réfractaires).

## 8.2) La Cyanuration en tas :

La cyanuration en tas est la seconde innovation majeure de ces vingt dernières années pour les minerais d'or.

Fondée sur le même processus chimique, elle diffère de la cyanuration en cuves par une mise en œuvre plus économique : Au lieu d'être finement broyé, le minerai est simplement concassé et disposé en tas sur une aire imperméabilisée. La solution de cyanure, répandue sur le dessus du tas, percole à travers la masse de minerai et dissout l'or qu'elle rencontre. Un réseau de drains et de caniveaux récupère et dirige la solution aurifère vers un bassin. Cette dernière est envoyée dans des colonnes garnies de charbon actif, qui retient le complexe or-cyanure ou sur une unité utilisant la poudre de zinc.

La première unité industrielle de cyanuration en tas de l'or a démarré à la mine de Cortez en 1971 au Nevada (ETATS -UNIS). La simplicité du procédé, son coût de production, réduit de moitié par rapport à la cyanuration conventionnelle, et un investissement divisé par deux ou trois, expliquent son succès. Ces avantages sont contrebalancés par un taux de récupération en or généralement inférieur à celui de cyanuration en cuve.

Le choix entre les deux techniques repose sur des critères économiques.

La cyanuration en tas permet d'exploiter des gisements à des teneurs aussi faibles que 1 à 2 grammes d'or par tonne .

Elle va alors généralement de pair avec une exploitation en masse (quelques millions de tonnes par an) à ciel ouvert avec peu de recouvrement. Elle permet aussi de retraiter certains rejets anciens.

On rencontre aujourd'hui la cyanuration en tas sur tous les continents, mais sa terre d'élection est l'ouest Américain, qui possède de nombreux gisements oxydés, où la libération naturelle de l'or de sa gangue de sulfures favorise son application .

Elle est également très adaptée au traitement des minerais superficiels et intensément oxydés des régions tropicales. En effet, la grande porosité des roches facilite la pénétration de la solution de cyanure jusqu'au cœur des fragments. Il est courant d'obtenir pour eux des taux de récupération en or équivalents à ceux de la cyanuration en cuves.

La technique de cyanuration en tas comprend les opérations successives suivantes :

***A/ Préparation de l'aire imperméabilisée :***

Une zone plate, correctement nettoyée et nivelée, est rendue imperméable par la mise en place de feuilles plastiques soudées et d'une couche d'argile. Un réseau de drains et de caniveaux est créé pour collecter la solution à la base du tas et la diriger vers des bassins.

***B/ Constitution du tas :***

Elle se fait par l'intermédiaire d'une série de convoyeurs mobiles, dont le dernier déverse le minerai concassé en une couche de 5 à 10 m d'épaisseur, ou plus simplement, par un déversement de camion .

Les minerais peu consolidés ou contenant des argiles doivent, avant la mise en tas, être bouletés, sinon ils formeraient des tas imperméables.

***C/Phase de lixiviation statique :***

Un réseau de tuyauteries et d'arroseurs(goutte à goutte ou aspergeurs) permet d'arroser le dessus du tas avec une solution de cyanure. Cette dernière percole librement à l'intérieur du tas. Collectée à la base du tas par le système de drainage, elle est ensuite envoyée dans l'unité de récupération de l'or. La solution devenue stérile retourne sur le dessus du tas pour un nouveau cycle.

Ce processus se poursuit jusqu'à ce que l'extraction de l'or ne progresse plus que très lentement. L'opération de lixiviation d'un tas peut durer de quelques jours à quelques mois selon l'aptitude du minerai à la cyanuration et de l'épaisseur du tas.

***Les conditions d'utilisation de cette méthode :***

Le principe de la lixiviation en tas ne permet pas la mise en œuvre d'un pré-traitement du minerai avant sa cyanuration. En conséquence, le minerai doit être :

- naturellement apte à l'utilisation de cette technique, en particulier, la dimension des grains d'or doit être aussi petite que possible ; la dissolution des grains d'or grossier peut demander un temps extrêmement long (une à deux années).

- de même le minerai ne doit pas contenir de matières carbonées, qui pourraient adsorber l'or dans le tas.
- il ne doit contenir que de faibles quantités d'éléments cyanicides, tels que des sulfures ou des sulfo-arséniures partiellement oxydés de Sb, Fe, Zn, Cu. Ces minéraux sont alors plus ou moins solubles dans les solutions de cyanure et ils abaissent le pH. Leur présence augmente la consommation en réactifs, parfois jusqu'à rendre le procédé non économique.

### 9) Traitement des minerais réfractaires : [1, 13]

Dans certains minerais d'or, en particulier les minerais sulfurés, l'or n'est pas récupérable de façon satisfaisante par cyanuration directe, car, par exemple, l'or est inclus à l'intérieur du minéral hôte et ne peut être dissous. Ce sont des minerais réfractaires, c'est-à-dire, ne répondant pas favorablement à la cyanuration, s'ils n'ont pas subi, au préalable, un traitement spécial permettant de rendre l'or accessible à la solution cyanurée.

D'une façon simplifiée, on peut indiquer que le caractère réfractaire d'un minerai d'or résulte de ce que :

- ❖ L'or soit sous forme de particules extrêmement fines, incluses dans des cristaux de pyrite ( $\text{FeS}_2$ ), ou de mispickel ( $\text{FeAs}$ ).
- ❖ Dans certains cas, l'or fait même partie intégrante de la structure cristalline des sulfures.
- ❖ L'or ne soit pas sous forme native, mais sous forme tellures insolubles dans le cyanure.
- ❖ Pour cela, il est recommandé un traitement spécial permettant de rendre l'or accessible à la solution cyanurée ; parmi ces procédés citons :

#### 9.1) Oxydation des sulfures sous pression :

On pratique la destruction des sulfures sous pression d'oxygène, en présence d'acide sulfurique, dans un autoclave. Les sulfures sont oxydés en sulfates à une température de  $160^{\circ}\text{C}$  à  $220^{\circ}\text{C}$ , sous une pression de 15 à 30 atm.

L'oxydation sous pression des sulfures est une technique coûteuse, un investissement (matériaux des autoclaves, usine d'oxygène ) et des coûts opératoires (qualification du personnel mesure de sécurité ), qui nécessitent, pour être économiquement valable, une teneur en or du gisement aurifère sulfuré plus élevée qu'un gisement oxydé.

### 9.2) Biolixiviation des sulfures :

Cette technique est basée sur le pouvoir de certaines bactéries, (les thiobacilles) d'oxyder le soufre et les sulfures. Son principe est d'introduire en continu le minerai sulfuré (généralement un concentré de flottation), souvent rebroyé, puis introduit en continu dans une série de 4 à 6 réacteurs agités,ensemencés avec de bactéries. Dans ces réacteurs, se produit la bio-oxydation des sulfures. L'air introduit fournit l'oxygène nécessaire à l'oxydation de ces derniers, et, le gaz carbonique indispensable aux métabolismes des bactéries. Celles-ci détruisent progressivement les sulfures avec une production d'acide sulfurique et de sulfate ferrique, qui, à leur tour, dissolvent les sulfures.

## 10) Méthodes de récupération de l'or : [8, 14]

Deux procédés sont utilisés actuellement pour récupérer l'or des solutions de traitement :

- La préparation sur la poudre de zinc ou d'aluminium.
- L'adsorption de l'or sur charbon actif.

1/ préparation sur zinc ou aluminium :

La cémentation par la poudre de zinc des métaux précieux de la solution cyanurée n'est rapide et complète, que si celle-ci a été préalablement clarifiée et désaérée. Le procédé Merrill-Crowe, universellement adopté, comporte :

- Une clarification sous vide de la solution, suivie d'une désaération.
- La précipitation proprement dite.

La réaction qui a lieu :



2/ adsorption sur charbon actif :

## 2/ adsorption sur charbon actif :

Dans ce procédé l'extraction de l'or 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.

Les types de charbon peuvent être les suivants :

-Charbon de bois dur ou tendre

-Coke de pétrole

-Charbon fabriqué à partir d'écorce de noix, noix de coco, d'abricot ou de pêche.

L'utilisation et le développement effectifs de cette méthode sont dûs en grande partie à la mise au point d'un procédé économique et efficace d'éluion de l'or du charbon ; l'avantage de l'utilisation de la méthode d'adsorption sur charbon actif réside dans le fait, qu'elle peut traiter des solutions aurifères, mais aussi directement des pulpes de minerais après

En fin d'adsorption, le charbon est récupéré et traité pour être recyclé .

Les solutions éluantes aurifères sont ensuite traitées par électrolyse .

Intérêt de l' utilisation de charbon actif dans l'industrie :

le charbon actif reste de loin, l'adsorbant le plus utilisé dans le domaine industriel , du fait de son importante surface spécifique (600-1500 m<sup>2</sup>/g) et de sa capacité d'adsorption même s'il est humide, car les corps adsorbables déplacent l'eau. C'est un adsorbant à très large spectre, vu que la plupart des molécules organiques se fixent à sa surface ; on peut citer les composés aromatiques et hydrocarbures substitués.

## 11) Cyanuration et environnement : [1]

Du point de vue de la protection des personnes et de l'environnement, on pourrait penser que l'abandon de l'amalgamation au mercure au profit de la dissolution au cyanure, qui est un poison violent. Mais c'est aussi un composé qui s'oxyde facilement en composants élémentaires, gaz carbonique et azote.

Dans les usines, la manipulation du réactif est entourée des précautions indispensables pour prévenir les intoxications : ventilation, solution diluée,...les cas d'intoxication sont rarissimes.

Les rejets en pulpes, provenant d'un circuit de C.I.P ou C.I.L, où l'eau rejetée provenant d'opérations de cyanuration contiennent des concentrations plus au moins élevées en cyanures. Le sol des zones d'épandage de ces rejets est généralement recouvert d'une couche d'une trentaine de centimètres d'argile compactée surmontée de feuilles de polyéthylène soudées et parfois par une membrane géotextile. Dans les bassins d'épandage, se produit une certaine dégradation naturelle des composés cyanurés résiduels. Ce qui fait que, contrairement au mercure, le cyanure ne présente aucun phénomène d'accumulation dans la nature. Il est toutefois nécessaire de mettre en œuvre des contrôles spécifiques pour garantir l'innocuité permanente des rejets.

Pour réduire le plus possible la teneur en cyanure au moment de la mise à dépôt définitif des rejets, plusieurs procédés peuvent être utilisés. Ils ont pour but de détruire les composés cyanurés, il existe même un procédé permettant de récupérer le cyanure pour le réutiliser dans l'installation. Ce dernier a été mis en œuvre, la première fois, en 1991 en Nouvelle Zélande. L'abaissement du pH, par ajout d'acide dans la pulpe ou la solution, permet le dégagement de HCN(acide cyanhydrique), qui est transformé, dans une tour de récupération, en cyanure de calcium par addition de chaux. Les rejets débarrassés de l'ordre de 80 % de leur cyanure, sont mélangés à de la chaux pour élever leur pH, puis ils sont transportés dans les zones d'épandage.

Ce procédé de récupération s'effectue en circuit fermé en dépression, pour empêcher toute fuite de gaz cyanhydrique vers l'extérieur.



*Partie*

*Expérimentale*

*de TIREK*

# Chapitre I

## *Le Gisement de TIREK*

## 1) Gisement de Tirek

### 1.1) Implantation : (voir figure 1)[5]

Les gisements d'Amesmessa et Tirek sont situés dans l'extrême Sud algérien, dans la partie sud-ouest du massif de l'Ahaggar (Hoggar), à 400 kilomètres au Sud-ouest de la ville de Tamanrasset et à l'Est de Bordj-Badji -Mokhtar , près de la frontière de Mali. Les coordonnées géographiques du centre sont  $21^{\circ} 30'$  de latitude nord et  $2^{\circ} 31'$  de longitude est , l'altitude du gisement est de 561 à 569 mètres.

Le climat de la région est nettement continental, avec des températures de  $50^{\circ} - 60^{\circ} C$  en Juillet, et de  $0^{\circ} - 5^{\circ} C$  en Décembre- Janvier.

La moyenne pluviométrique varie de 10 à 15 mm/an.

Le point d'alimentation en eau le plus proche est un forage dans le bassin du Tanezrouft, à 40 Km à l'Ouest du gisement. Les ressources en eau sont estimées à  $4200 m^3$ /jour sur une période de 27 ans.

Sur le plan économique, la région concernée est très peu développée, les ressources énergétiques et en combustibles sont inexistantes.

La population est rare, représentée par des nomades, qui s'occupent d'élevage.

La main d'œuvre qualifiée vient essentiellement du Nord du pays (voir carte -figure n° 2).

### 1.2) Historique :[5]

La découverte des gisements d'or dans l'Ahaggar (Hoggar) remonte à la décennie 1970. Le projet développé par ENOR (Entreprise Nationale d'Exploitation des mines d'OR) concerne les gisements de Tirek et d'Amesmessa, découverts par la SONAREM respectivement en 1971 et 1978. L'évaluation géologique de ces gisements s'est poursuivie de 1983 à 1992 grâce aux efforts de l'Entreprise Nationale de Recherche Minière (EREM), bientôt relayés par ceux de l'Office National de Recherche Géologique et Minière (ORGM). L'étude de pré-faisabilité de ce projet a été initiée dès 1989 par l'Entreprise Nationale des Produits Miniers non-ferreux et des substances utiles (ENOF).

Il a fallu attendre l'évaluation géologique complète des gisements d'Amesmessa et la création de l'ENOR en avril 1992, pour parachever les études techniques et économiques

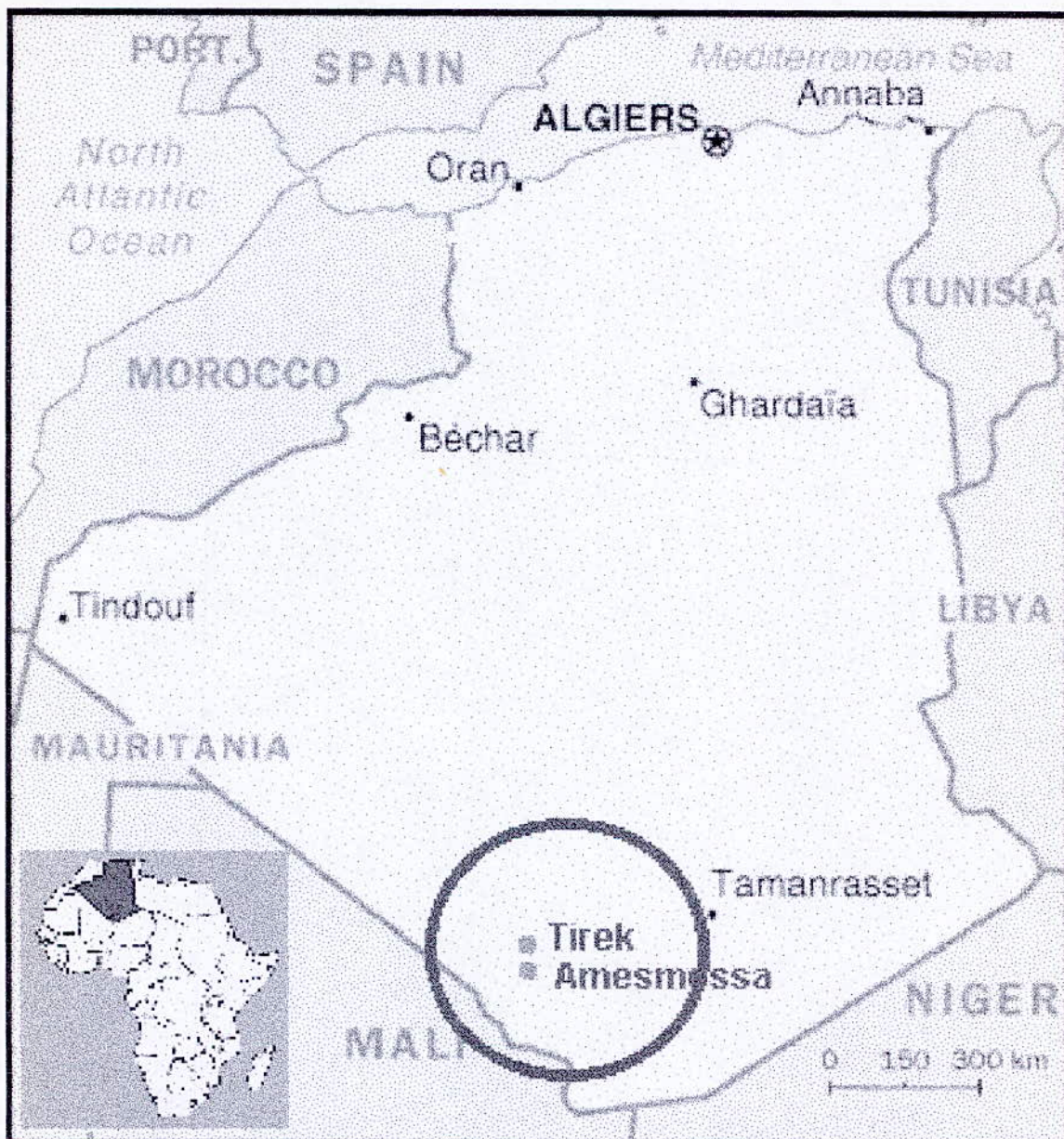


Figure 1 : Implantation géographique du gisement de TIREK (d'après ENOR)

nécessaires à la mise en exploitation de ces deux gisements. A cet effet, un contrat a été signé avec un bureau d'étude canadien (SIDAM) pour la réalisation d'une étude de faisabilité. Cette étude fut suivie d'études d'ingénierie de base réalisées par KILBORN TESCULT (Canada).

### 1.3) Caractéristiques géologiques : [3, 4, 5]

#### 1.3.1) Géologie régionale (figure n° 2) :

La région des gisements aurifères est située dans la partie sud-ouest du bouclier Touareg (Ahaggar) d'âge Précambrien (Archéen) recouvert en discordance par les formations du Paléozoïque inférieur à moyen. Cette région est constituée de deux domaines structuraux distincts :

1. A l'Ouest le bloc d'In-ouzzal constitué de granulites fémiques et felsitiques ainsi que de différentes variétés de gneiss, de schistes et de marbres. A ces deux variétés lithologiques sont associés des charnochites et enderbites. L'âge des formations archéennes du bloc d'In-ouzzal est de 2800 à 3000 millions d'années.

Les relations cartographiques, les compositions pétrographiques et géochimiques montrent que les roches archéennes d'In-ouzzal constituent une ancienne ceinture verte semblable à celle de Barberton (Afrique du Sud) ou de l'Abitibi (Canada), mais plus métamorphisées. Toutes les formations archéennes sont recoupées par des granites d'âge Panafricain (530 - 620 millions d'années).

2. A l'Est, un domaine protérozoïque constitué de gneiss et des quartzites, recoupés par des gabbros, diorites et granodiorites qui constituent un grand batholites d'âge Panafricain.

Ces deux domaines sont séparés par une faille majeure (shear zone) de direction sub-méridienne et qui est constituée par des ultramylonites qui forment une bande large de 2 à 3 km. Ces mylonites contrôlent la mise en place de petits massifs de gabbros. Tout le long de cette zone de mylonites, on a mis en évidence un grand nombre d'indices d'or, dont plusieurs ont une importance économique : Amesmessa, Tirek, In Allarène, Derreg et Timeg.

#### 1.3.2) Géologie du gisement de TIREK (figure n° 3) :

Le gisement de Tirek et le gisement occupe une superficie d'environ 25 km<sup>2</sup>. Il est constitué par trois champs filoniens : Ouest, centre et Est. le champ Ouest est localisé dans des mylonites, alors que les champ centre et Est sont situés à l'intérieur d'un massif de gabbro Pré-Panafricain.

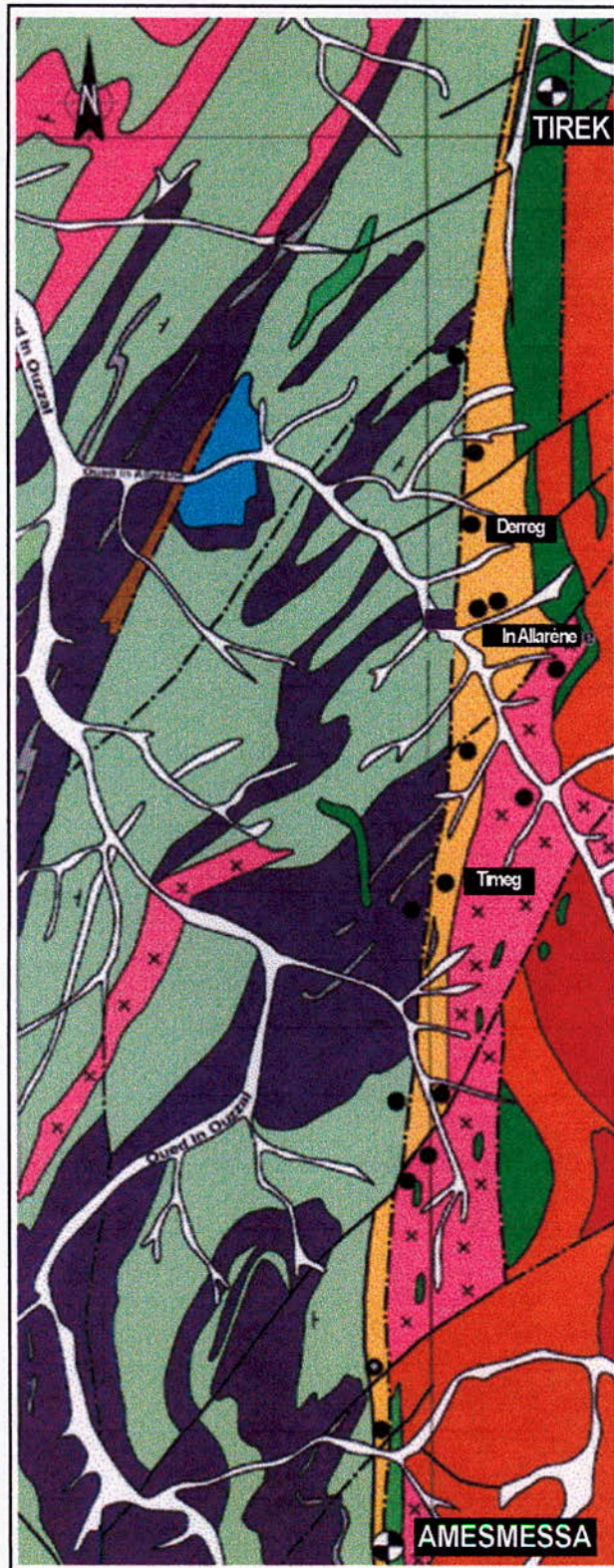
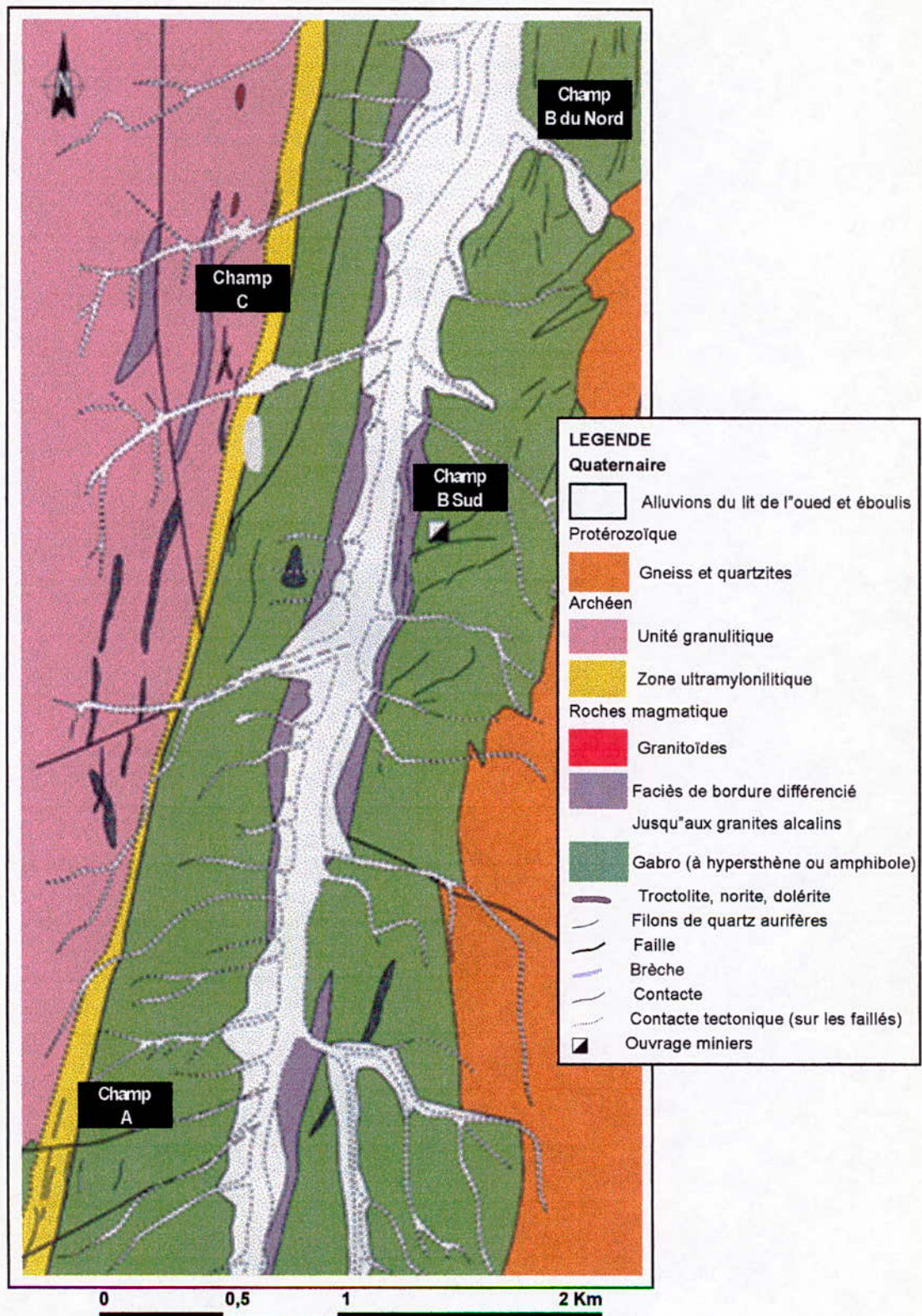


Figure n°2  
 Carte géologique de la région Tirek - Amesmessa



**Figure n° 3**  
**Carte géologique du gisement de Tirek**

Les gabbros de Tirek forme en réalité toute une gamme de roches allant des gabbros à olivine à des monzodiorites quartziques.

Parmi les accidents tectoniques on distingue :

- Les accidents d'orientation sub-méridienne cicatrisés par des dykes acides .
- Les accidents de direction NE, remplis par des dykes de gabbro et gabbro-diorite, le long de ces accidents on remarque des transformations hydrothermales.
- Les accidents de direction NW, constitués par des zones de broyage et de schistification.
- Les accidents de direction EW sont rares, ils affectent les corps minéralisés.

### 1.3.3) Les secteurs minéralisés :

Les secteurs minéralisés se présentent sous forme de filons de quartz, dont les contacts sont nets ; l'altération hydrothermale aux épontes est très faible.

La minéralisation aurifère est essentiellement localisée dans le quartz, alors les épontes sont faiblement aurifères. Les filons de quartz sont répartis dans trois champs minéralisés : central, occidental et oriental. Dans ces trois champs, on dénombre 70 filons de quartz aurifères.

a. **Le secteur central** : Les corps minéralisés sont situés dans la partie Ouest du massif de gabbro, l'encaissant étant constitué soit de gabbros, soit de mylonites ; leur orientation est sub-méridienne. Les filons minéralisés ont un pendage de  $75^{\circ}$  à  $90^{\circ}$  W et une épaisseur moyenne de l'ordre de 0,4 à 0,6 m. Dans ce secteur sont concentrées 54 % des réserves d'or.

b. **Le secteur oriental** : Ce secteur s'étend sur une longueur de 5 km, l'orientation des corps minéralisés est de  $50^{\circ}$  à  $70^{\circ}$  W. L'épaisseur moyenne est de l'ordre de 0,6 à 0,8 m. Dans ce secteur on retrouve le 1/3 des réserves du gisement de Tirek.

c. **Le secteur occidental** : Ce secteur s'étend sur plus de 9 km de long, les corps minéralisés se localisent dans des mylonites, formant la bordure des roches archéennes. L'épaisseur maximale atteint 2,2 m.



### 1.3.4) Composition de la minéralisation :

L'or est contenu dans du quartz filonien, qui constitue 90 à 95 % de la masse du minerai, dans le quartz, on observe une faible quantité de sulfures (2 à 4 % de la masse totale). Le pourcentage de l'argent varie de 7,8 à 15 %. Les épontes sont faiblement aurifères (moins de 1 g/t).

### 1.4) Volume des travaux :

Sur les 70 filons recensés dans le gisement de Tirek, 33 furent l'objet d'étude détaillée :

- En surface, par tranchées espacées de 5 m.
- En profondeur, par forage à la maille de 40 x 40 m, pour les réserves prouvées (réserves de catégorie C1), et de 80 x 80 m pour les réserves probables (réserves de catégorie C2).
- Au niveau -40 m, on a percé des galeries d'exploration.

### 1.5) Alimentation en eau :

- Etudes hydrogéologiques du bassin du Tanezrouft, dont les ressources en eau sont estimées à 4.200 m<sup>3</sup>/jour pour une période de 27 ans.
- Engineering pour la réalisation d'un ouvrage pour l'alimentation en eau (une conduite de 95 km, des réservoirs semi-enterrés et des stations de pompage).
- Etude et implantation du forage hydraulique.

### 1.6) Energie : centrale électrique de 4 Mégawatts :

Toutes les études sont complètes, la construction du bâtiment, ainsi que le montage de la centrale électrique sont en cours.

### 1.7) Base de vie :

- Etudes pour la réalisation de la base de vie en matériaux locaux. Etudes géotechniques du sol.

Actuellement il existe sur site un campement temporaire en cabines sahariennes.

## 2) Echantillonnage:

Une mission sur Tirek a été effectuée dans le but de prélever des échantillons à analyser et de reconnaître la zone du gisement de Tirek.

Au total, quatre échantillons ont été prélevés, dont :

- deux échantillons dans le filon de quartz ;
- un échantillon dans l'encaissant hydrothermal ;
- un échantillon dans les dépôt de surface (éluvions).

Le but de l'échantillonnage est de prélever des échantillons qui sont représentatifs du lieu de prélèvement.

Les moyens utilisés sont :Pelle ; marteau ; masse ; burin ; sachets en plastique ; fûts ; double décimètre ; double mètre ; boussole ; loupe ; échelle ; balance, véhicule de service (Toyota) et auge de maçon.

Procédé suivi :

Après avoir choisi la paroi de la tranchée à échantillonner, on commence à relever toutes les mesures concernant le lieu de prélèvement, pour dessiner la coupe géologique schématique, à savoir:

❖ Les éléments du gisement (filon) :

-Pendage du filon ;

-Direction de pendage ;

-épaisseur (normales) sur la longueur de filon ;

- longueur du filon ; de la surface jusqu'au fond de tranchée.

❖ Les mesures concernent les roches alternées hydrothermales ; sols rouges ; dépôts de surface; les roches encaissantes, à deux mètres de part et d'autre du filon ; ces mesures sont essentiellement l'épaisseur et la longueur.

❖ Ensuite, on entame les travaux de prélèvement de l'échantillon :

Les modes de prélèvement sont les suivants:

- Par saignée verticale pour la couche altérée hydrothermale (tranchée 3) ; et pour le dépôt de surface (tranchée 5) ;

- par saignée suivant l'épaisseur normale sur le filon de quartz (tranchées 7 et 8).

❖ Les échantillons sont récupérés dans des sachets en plastique placée sur l'auge au bas de la partie à échantillonner.

❖ L'échantillon sera ensaché et mis dans un fût bien hermétique, le double de l'échantillon est placé dans un autre fût.

❖ Chaque échantillon est muni d'une étiquette, qui porte :

-le numéro de l'échantillon (Tirek1, Tirek2, ...etc)

-le numéro de la tranchée à échantillonner

-le type de matière prélevée,

-la date de prélèvement.

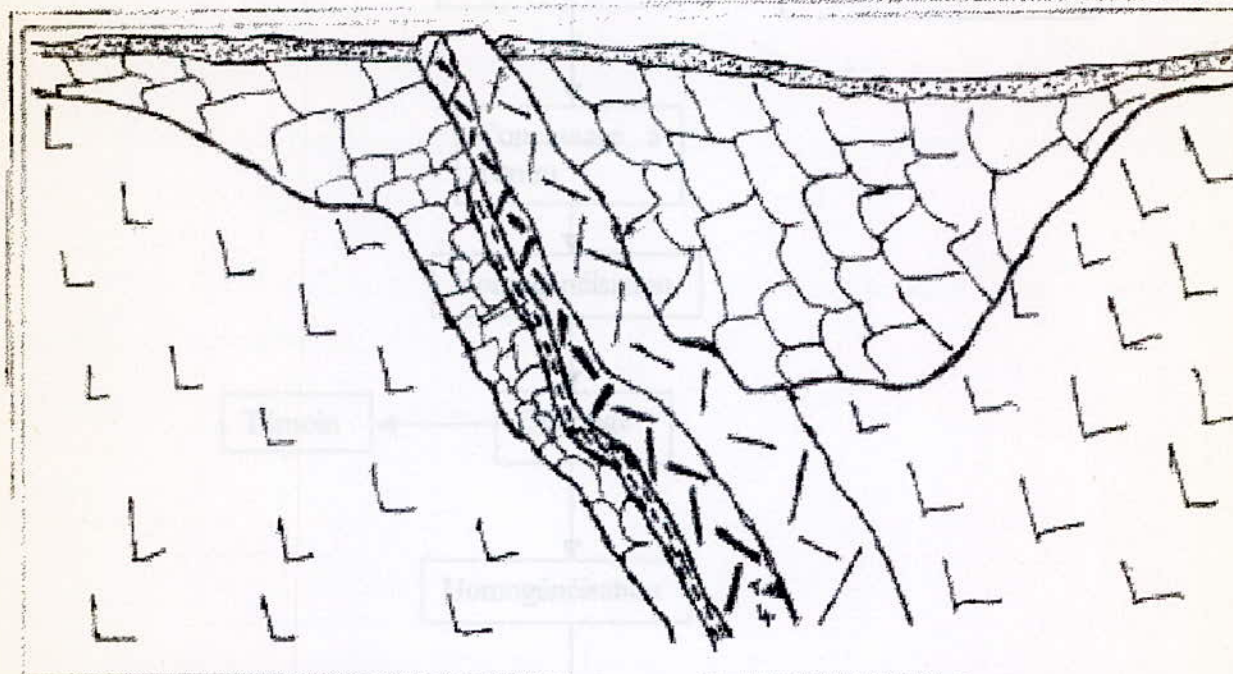
Ensuite, on met fin aux travaux de terrain, pour entamer les travaux de bureau, qui sont essentiellement :

-la schématisation des lieux de prélèvement ;

-l'étude de la documentation géologique du gisement de Tirek.

Filon III trançhée N° 7:

schéma de lieu de prélèvement



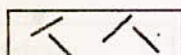
Légende:

échelle 1/50

Direction de pendage 325°



**Filon de quartz:** de couleur brune, à blanchâtre avec des cavernes à l'intérieur de quelle se trouve des cristaux de quartz bien formés; des impuretés noires, des cassures remplis d'une matière noire, jaune.



**Filon de quartz:** de couleur blanche laiteuse, fortement cataclásé; avec des cavernes remplies d'une matière noire.



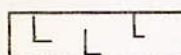
**L'encaissant hydrothermal:** de couleur jaune rougeâtre, noir, violette, tendre, grains très fins et compact.



**L'encaissant altéré:** de couleur jaunatre avec des micro-cristaux, compact, moyen dure.



**Sable éolien:** de couleur jaune et débris de surface



**Gabbro altéré:** de couleur grise, leocrate (tend vers le blanc) fortement saturée n cristaux de feldspath grainu, à grain moyen.

## 3) Identification du minerai :

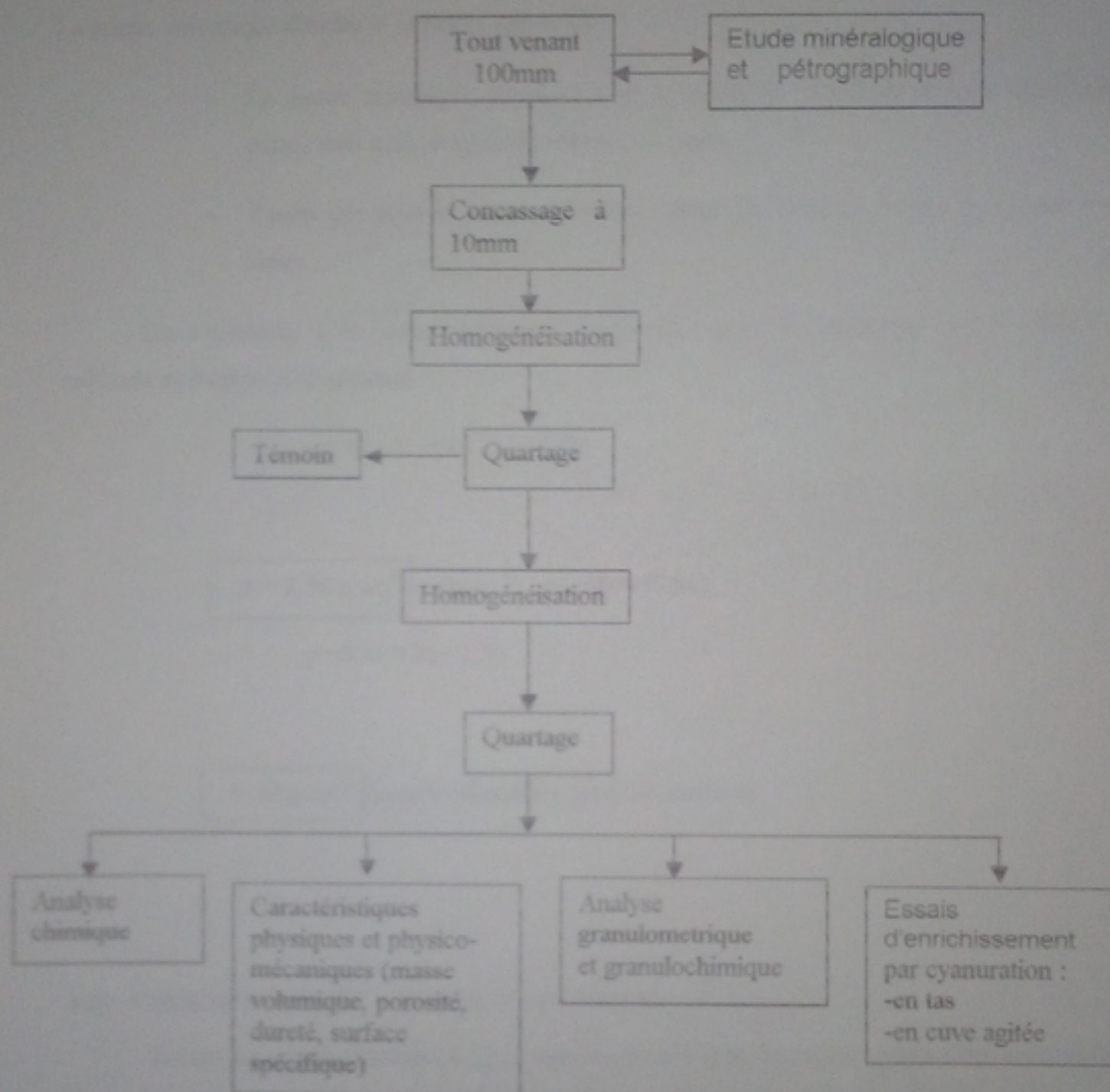


Figure 5 : Schéma de répartition du minerai pour essais et analyse.

## 4) Caractérisation physique et physico-mécanique :

## 4.1) Calcul de la masse volumique : (procédé en annexe n°1)

La masse volumique d'un corps est la masse de volume de corps, on distingue :

La masse volumique absolue et la masse apparente .

- La masse volumique absolue : c'est la masse de l'unité de volume absolu du corps, sans tenir compte du volume de vide .
- Tandis que pour la masse volumique apparente, on tient compte du volume des vides.

On s'intéresse à la masse volumique apparente ; pour la déterminer, on a utilisé la méthode de l'éprouvette graduée.

$$\rho = M / V = 400 / 155 = 2,58$$

$$\rho = 2,58 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{pour l'échantillon filon})$$

$$\rho = 300 / 130 = 2,30$$

$$2,30 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{pour l'échantillon dépôt de surface})$$

## 4.2) Calcul de la porosité : (procédé en annexe n°1)

Toutes les roches présentent, dans une proportion plus ou moins grande, des fissures ou des petits vides, qui renferment souvent l'eau ; on appelle porosité d'une roche, le volume des vides contenus dans l'unité de volume de matière.

$$P(\%) = \frac{\text{volumes des vides}}{\text{volumes des matières}} \times 100$$

$$= \frac{(M_r - M_d) \times \rho}{M_d}$$

$$p(\%) = \frac{M_1 - M_0}{V}$$

$$= \frac{(663.8 - 662.5) \times 2.58}{662.5} \times 100 = 0.506\%$$

$$p(\%) = 0.506$$

pour l'échantillon de filon.

$$p(\%) = \frac{(723.7 - 720.7) \times 2.3}{720.7} \times 100 = 0.957\%$$

$$p(\%) = 0.957$$

pour l'échantillon de dépôt de surface.

#### 4.3) Calcul du taux d'humidité : (procédé en annexe n°1)

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

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

$$M_0 = 1017,6\text{g}$$

$$M_1 = 1017,2\text{g}$$

$$T(\%) = 0.039\%$$

pour l'échantillon de filon.

$$M_0 = 1001,0\text{g}$$

$$M_1 = 1000,9\text{g}$$

$$T(\%) = 0.01\%$$

pour l'échantillon de dépôt de surface.

#### 4.4) Calcul de la surface spécifique : (procédé en annexe n°1)

La surface spécifique se calcul par la formule suivante :

$$S_s = \frac{0.354 \times K \times \sqrt{t}}{0.5 \times \rho \times \sqrt{\eta}}$$

avec :

$$K = 11.8011$$

$$\eta = 1798 \cdot 10^{-7}$$

$$\rho = 2,58 \text{ g/cm}^3$$

$$t = 340 \text{ s}$$

donc :

$$\text{nous trouvons } S_s = \frac{0,354 \times 11,8011 \times \sqrt{340}}{0,5 \times 2,58 \times \sqrt{1798 \times 10^{-7}}} = 4453,28 \text{ cm}^2/\text{g}.$$

#### 4.5) Mesure de la dureté: (procédé en annexe n°1)

La dureté est définie par la résistance d'un minerai à la rayure ou à l'abrasion.

Pour notre échantillon (le Quartz) sa dureté sur cette échelle –comme l'indique le tableau- est de 7, donc, il raye l'Orthose, et il est rayé par le Topaze.



## 5) Enrichissement physique de minerai d'or de Tirek

### 5.1) Introduction

Le choix d'un procédé de concentration des minerais est lié aux caractéristiques physiques et chimiques des éléments qui constituent le minerai à traiter.

Ce choix sera non seulement fonction de la propriété spécifique mise en jeu, mais aussi de l'intensité de cette propriété.

L'efficacité de la séparation sera d'autant plus élevée, que la sélectivité et la souplesse d'utilisation est grande.

Les critères techniques résultent généralement de l'examen de trois paramètres :  
le rendement en poids [R] : c'est le rapport exprimé en pourcentage recueilli au poids de minerai traité. Ce poids est toujours exprimé en sec.

Le rendement métal ou récupération [ $\rho$ ] : c'est le rapport exprimé en 100% de poids de métal contenu dans le concentré au poids de métal contenu dans l'alimentation.

Le taux de concentration [ $\tau$ ] : c'est le rapport exprimé en pourcentage de poids de minerai traité au poids de concentré obtenu.

Le calcul de ces paramètres pour une séparation en deux produits (un concentré et un stérile) est donné en annexe.

Au cours de ce travail nous avons utilisé la fragmentation et classification, étape nécessaire pour tout traitement.

#### Concentration par fragmentation et classification

Toute méthode de concentration d'un minerai impose que le minerai soit fragmenté à une dimension dite « dimension de libération ».

La fragmentation des solides dans le cadre de l'enrichissement des minerais groupe un ensemble de techniques, ayant pour but de réduire, par action mécanique, un solide de volume donné en éléments plus petits, et de libérer dans le matériau hétérogène des éléments valorisables des minéraux de gangue.

L'opération comprend plusieurs stades permettant à chaque fois l'élimination des éléments, dont le degré de réduction est suffisant. Ces stades sont :

- Le concassage,
- Le tamisage (criblage),
- Le broyage.

#### Conduites d'une opération :

Un échantillon de minerai provenant du filon III de la tranchée 7 a subi un concassage (10 mm environ) et a été divisé en lots homogènes à l'aide d'un diviseur-échantillonneur de types Jones, permettant d'obtenir des lots représentatifs du minerai concassé.

Les opérations de classification ont été effectuées à l'aide d'un vibro-tamis sur toiles normalisées AFNOR. Les différentes fractions recueillies sont ensuite pesées et la teneur de l'élément valorisable qu'elles contiennent déterminée.

Les mêmes opérations sont effectuées pour l'échantillon provenant du dépôt de surface (filon XI tranchée 5).

#### Présentation des résultats

Il s'agit de tracer les courbes granulométriques et granulochimiques.

Les résultats obtenus sont reportés dans les tableaux N° 1 et 2, représentés par les figures 4 et 5.

Classe granulométrique	Poids du refus -g-	Poids en %	Refus cumulé -%-	Passant cumulé -%-
+15	154,20	7,73	7,73	92,27
-15 10	320,40	16,60	23,79	76,21
-10 +8	821,40	41,17	64,96	35,04
-8 -6,3	56,80	2,85	67,81	32,19
-6,3 +5	110,50	5,54	73,35	26,65
-5 +4	151,40	7,58	80,94	19,06
-4 +3,15	67,10	3,36	84,30	15,70
-3,15 +2,5	64,20	3,22	87,51	12,49
-2,5 +2	52,30	2,62	90,14	9,86
-2 +1,25	32,10	1,61	91,75	8,25
-1,25 +1	63,40	3,18	94,93	5,07
-1 +0,5	35,50	1,78	96,71	3,29
-0,5 +0,2	31,80	1,59	98,30	1,70
-0,2	33,90	1,70	100	0
TOTAL	1995,00	100	_____	_____

Tableau 1 : Classification granulométrique (échantillon de filon).

Classe	Poids -g-	Poids -%-	Refus cumulé -%-	Passant cumulé -%-
+12,5	55,2	2,76	2,76	97,24
-12,5 +10	159,5	7,99	10,76	89,24
-10 +8	530,50	26,58	37,33	62,67
-8 +6,3	80,40	4,03	41,36	58,64
-6,3 +5	104,40	5,23	46,59	53,41
-5 +4	151,30	7,58	54,17	45,83
-4 +3,15	73,10	3,66	57,83	42,17
-3,15 +2,5	68,50	3,43	61,27	38,73
-2,5 +2	57,90	2,90	64,17	35,83
-2 +1,6	37,50	1,88	66,05	33,95
-1,6 +1,25	55,30	2,77	68,82	31,18
-1,25 +1	46,10	2,31	71,13	28,87
-1 +0,8	42,50	2,13	73,26	26,74
-0,8 +0,6	83,00	4,16	77,41	22,59
-0,6 +0,5	42,00	2,10	79,52	20,48
-0,5 +0,4	65,00	3,26	82,77	17,23
-0,4 +0,315	73,20	3,67	86,44	13,56
-0,315 +0,25	64,10	3,21	89,65	10,35
-0,25 +0,2	31,90	1,60	91,25	8,75
-0,2	174,60	8,75	100	00
Total	1996,00	100		

**Tableau 2 : Classification granulométrique (échantillon de dépôt de surface).**

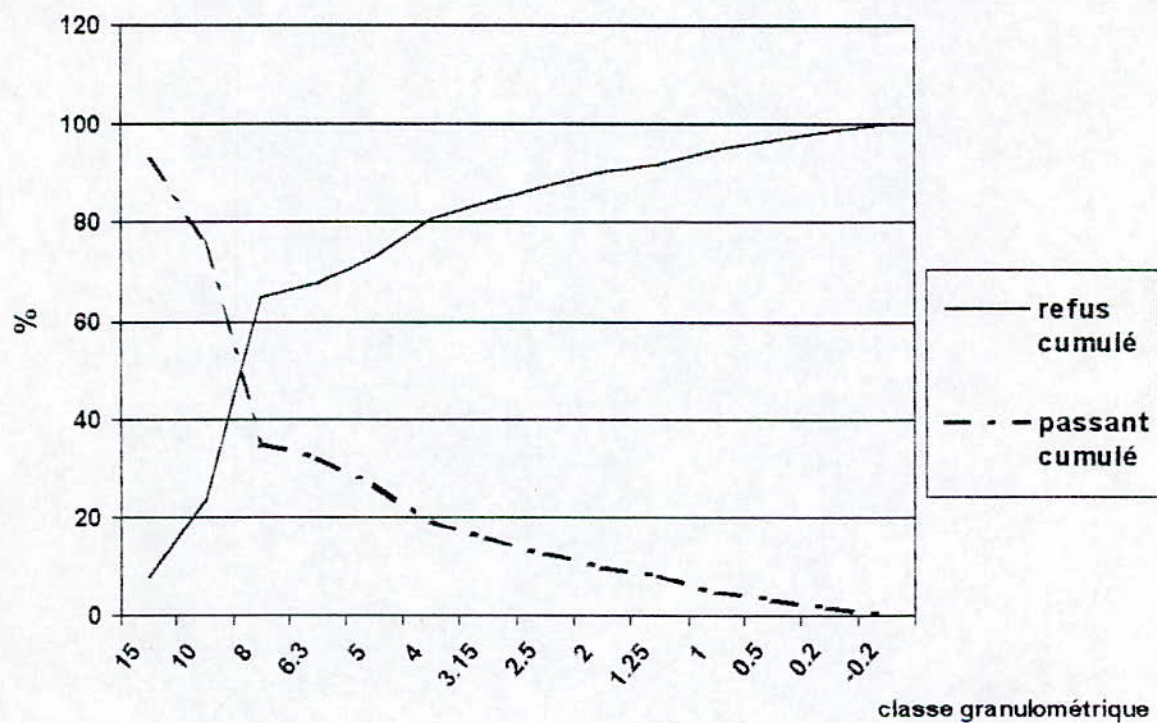
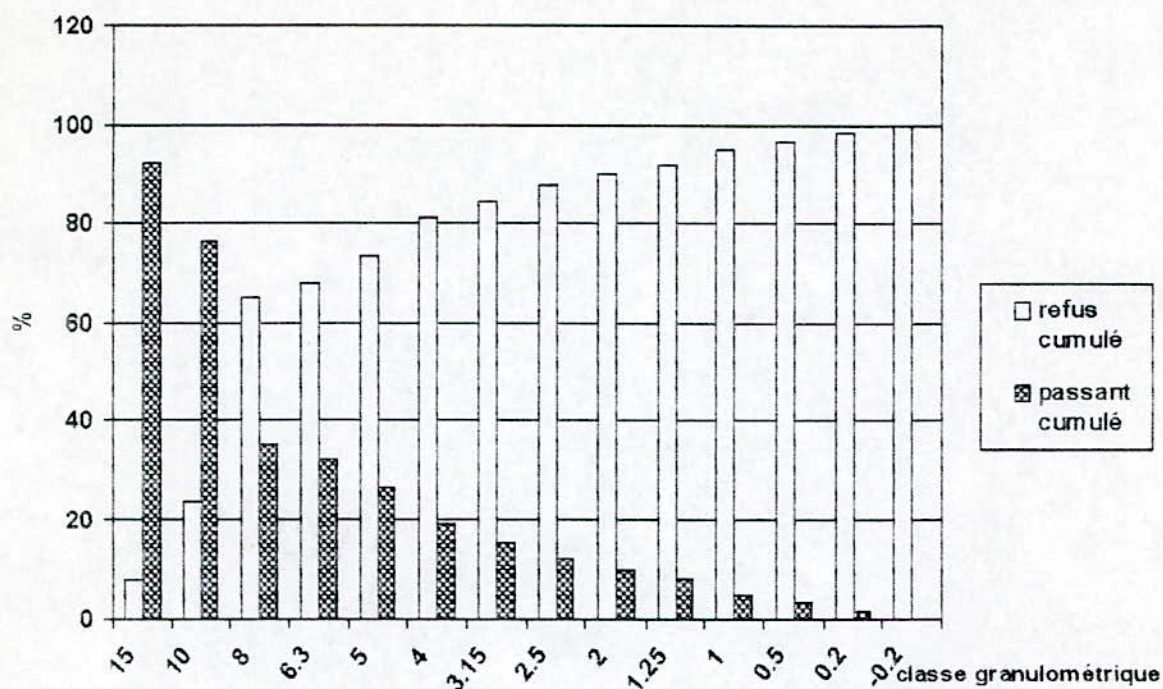


Figure 4 : Classification granulométrique (échantillon de filon)

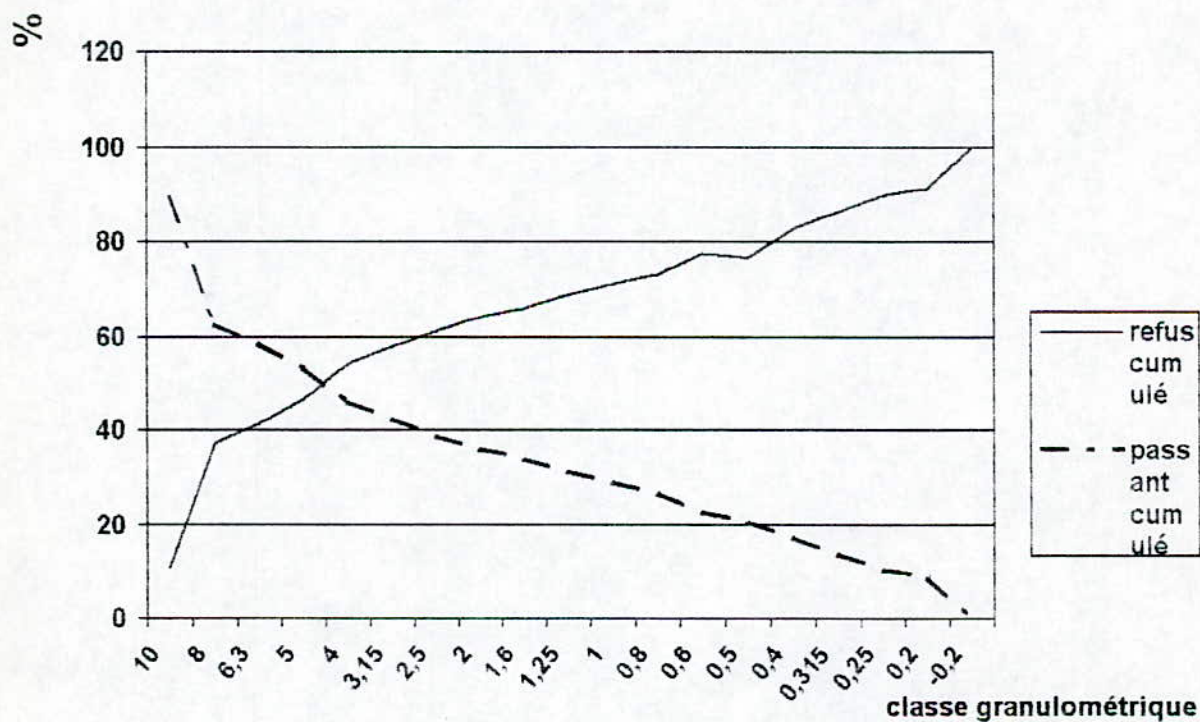
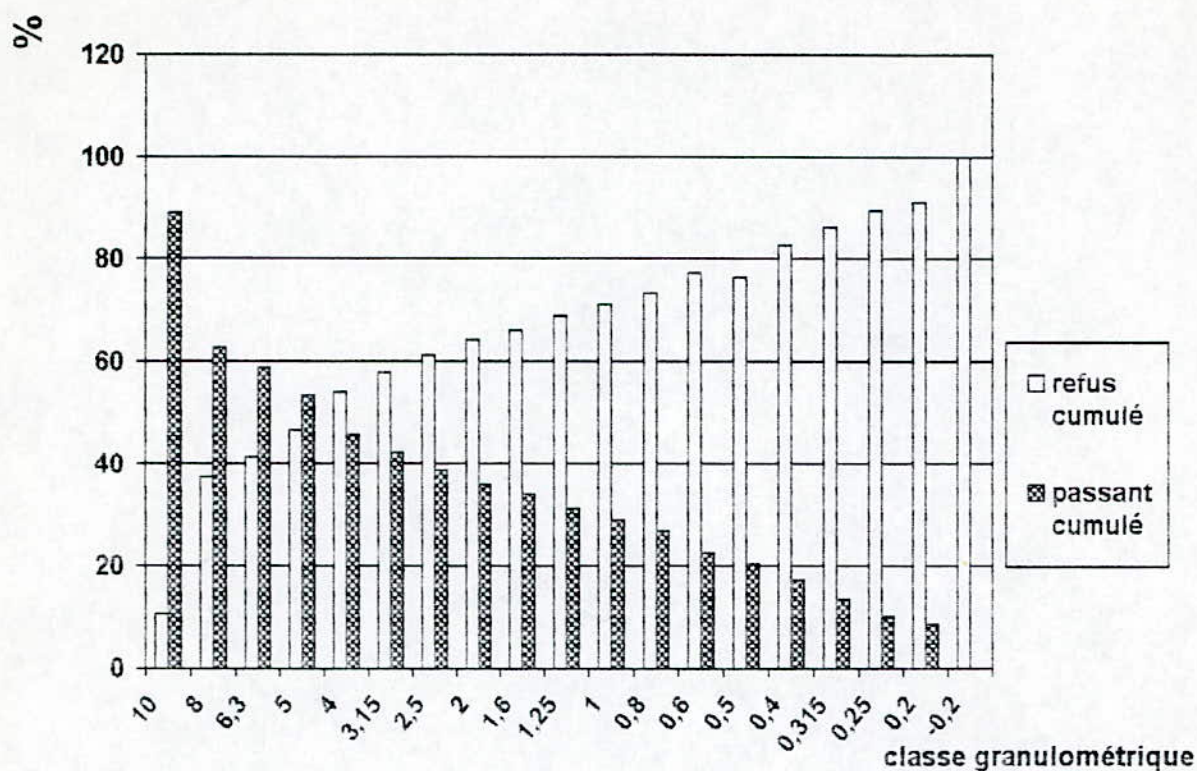


Figure 5 : Classification granulométrique (échantillon de dépôt de surface)

## 6) Analyse granulochimique

L'analyse granulochimique a pour objet de quantifier l'or, tout en faisant ressortir l'aspect qualitatif au niveau des différentes tranches granulométriques.

Cette analyse permet en quelque sorte de faire ressortir l'aspect enrichissement ou appauvrissement des différentes classes granulaires en éléments présentant une valeur économique.

L'analyse chimique des différentes classes granulométriques apporte sur la détermination des teneurs en or.

Cette analyse s'est faite par spectrophotométrie d'absorption atomique (tableau 3 et 4).

Classe granulométrique (mm)	Poids en%	Teneur (g/t)	Répartition (%)
+15	7,73	10,08	2,96
-15 +10	16,60	28,49	17,99
-10 +8	41,17	24,20	37,91
-8 +6,3	2,85	42,48	4,60
-6,3 +5	5,54	41,40	8,72
-5 +4	7,58	47,59	13,72
-4 +3,15	3,36	16,13	2,06
-3,15 +2,5	3,22	5,90	0,72
-2,5 +2	2,62	13,97	1,39
-2 +1,25	1,61	34,94	2,14
-1,25 +1	3,18	17,75	2,15
-1 +0,5	1,78	30,75	2,07
-0,5 +0,2	1,59	24,20	1,46
-0,2	1,70	32,26	2,09
<b>Teneur reconstituée</b>	100	26,29	100

Tableau 3 : analyse granulochimique (échantillon de filon).

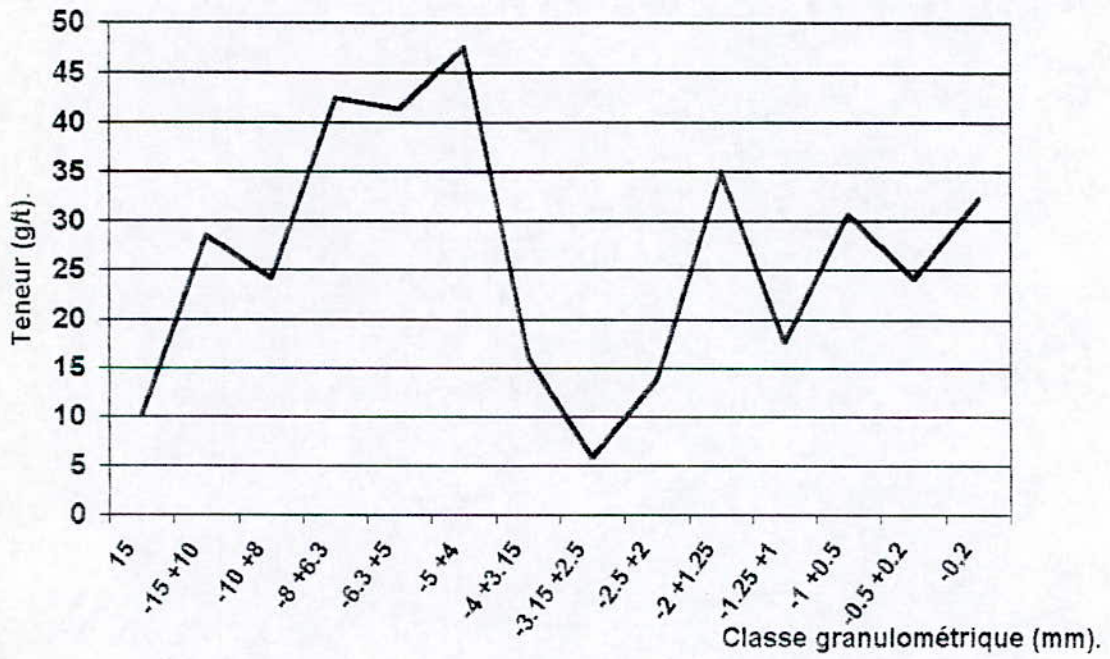
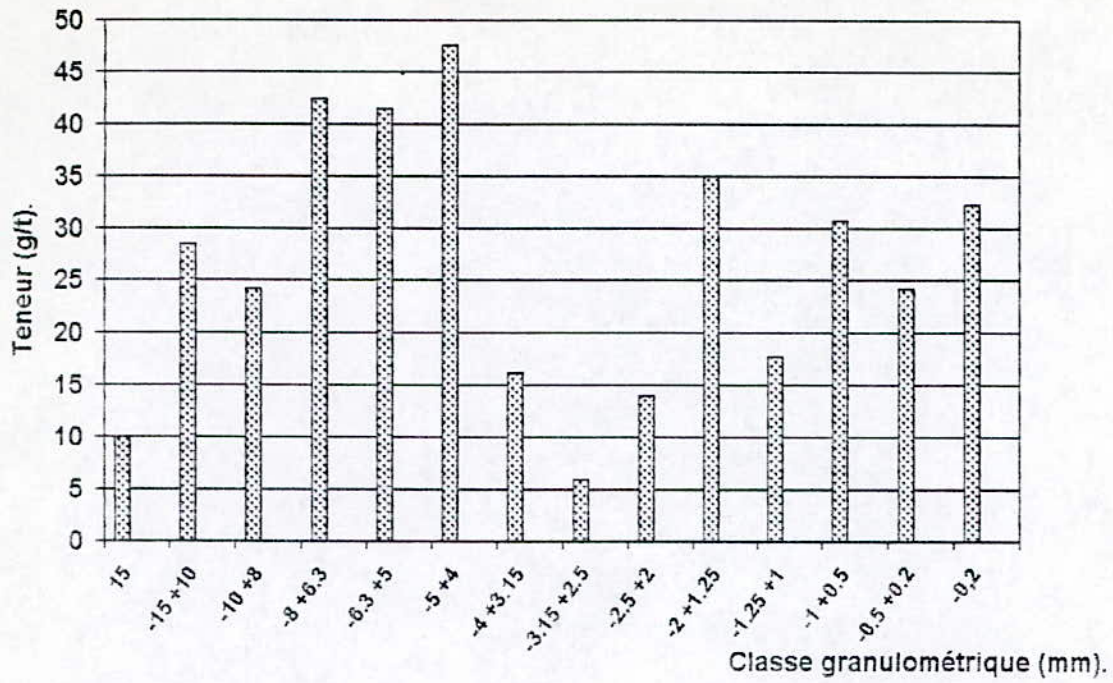


Figure 6 : Analyse granulochimique du tout-venant (échantillon de filon).



Classe granulométrique (mm)	Poids -%-	Teneur (g/t)	Répartition (%)
+12.5	2,76	6,64	3,42
-12.5 +10	7,99	20,00	29,81
-10 +8	26,58	1,,32	6,54
-8 +6.3	4,03	2,64	1,98
-6.3 +5	5,23	24,40	23,8
-5 +4	7,58	4,00	5,65
-4 +3.15	3,66	5,32	3,63
-3.15 +2.5	3,43	4,00	2,56
-2.5 +2	2,90	6.64	3,60
-2 +1.6	1,88	4,40	1,54
-1.6 +1.25	2,77	6,00	3,10
-1.25 +1	2,31	2,80	1,20
-1 +0.8	2,13	2,64	1,05
-0.8 +0.6	4,16	7,20	5,60
-0.6 +0.5	2,10	4,80	1,88
-0.5 +0.4	3,26	2,64	1,60
-0.4 +0.315	3,67	0,00	0,00
-0.315 +0.25	3,21	2,80	1,67
-0.25 +0.2	1,60	2,64	0,79
-0.2	8,75	0,00	0,00
<b>Teneur reconstituée</b>	<b>100</b>	<b>6,36</b>	<b>100</b>

Tableau 4 : Analyse granulochimique (échantillon de dépôt de surface).

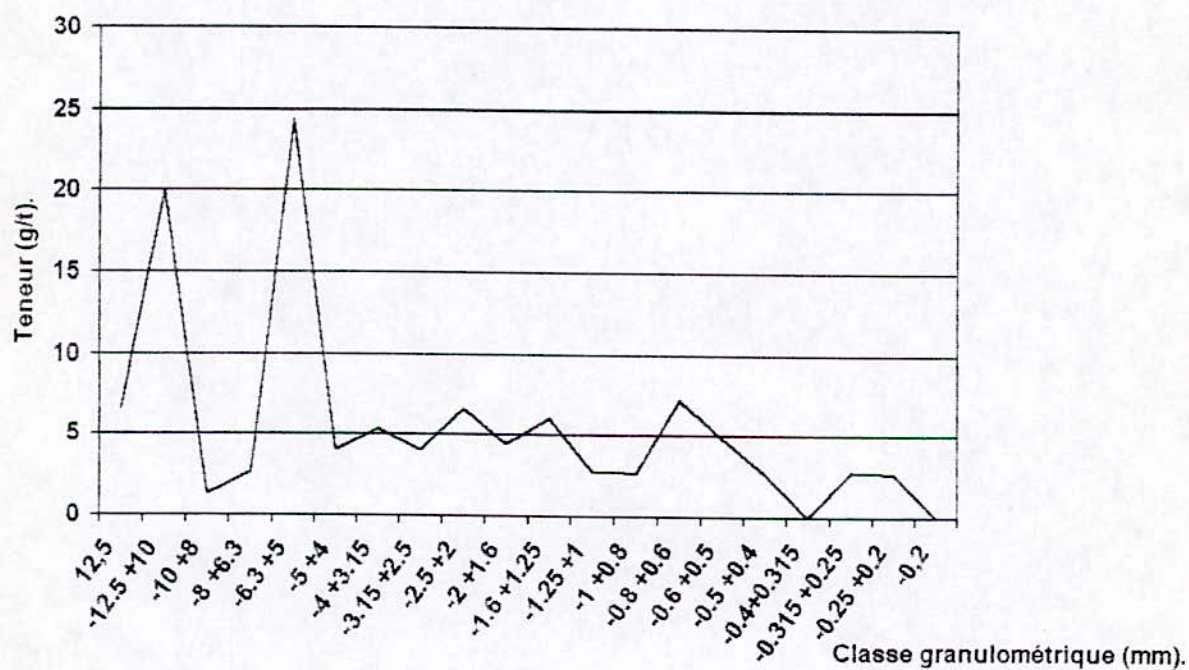
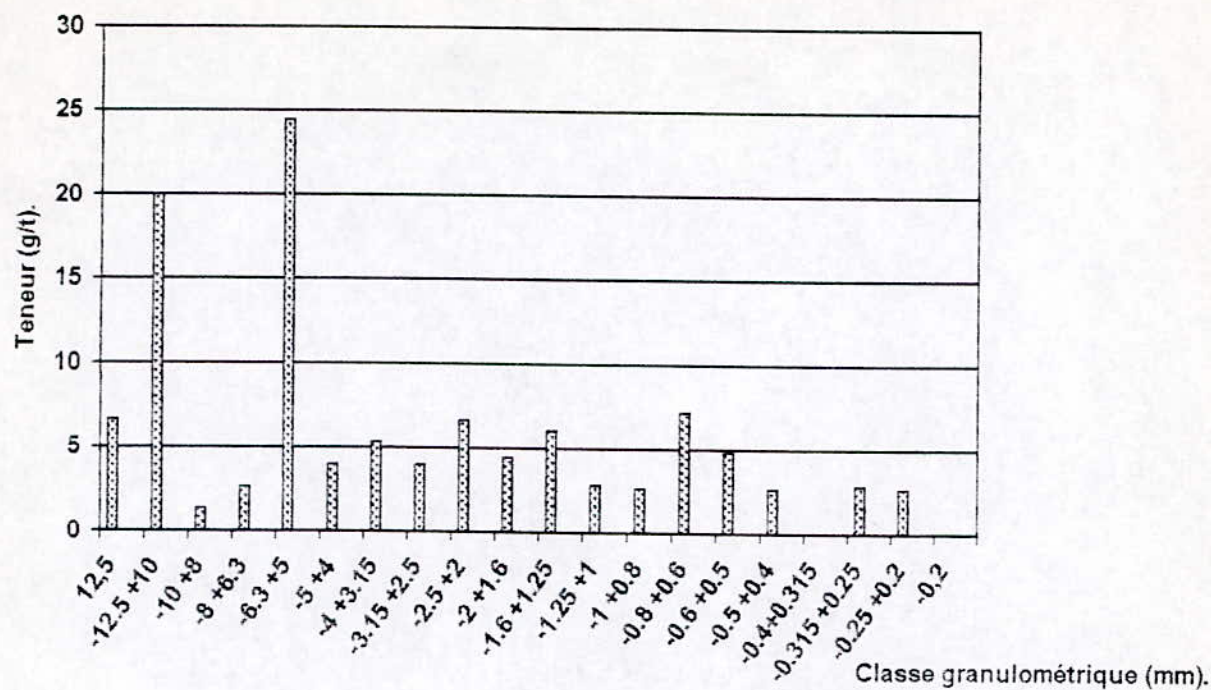


Figure 7 : Analyse granulochimique du minerai tout venant (échantillon du dépôt de surface)

**Conclusion**

D'après les résultats obtenus dans les deux tableaux ci-dessus, et représentés par leurs schémas correspondant, nous pouvons constater que pour l'échantillon de dépôt de surface, la répartition de l'or est uniforme dans les classes granulométriques à l'exception des deux tranches granulométriques (-12 +10 et -8,3 +5) ; Par contre, pour l'échantillon de filon, la répartition n'est pas uniforme. Ceci démontre que le minerai utile (l'or) est finement disséminé dans la gangue. Ce qui laisse à prévoir qu'il soit nécessaire de broyer fin pour la meilleure libération de l'espèce minérale.

# Chapitre II

*Le traitement*

*hydrométallurgique du*

*minerai d'or de TIREK*

## Le traitement hydrométallurgique du minerai d'or de Tirek

### 1) Introduction :

L'hydrométallurgie, recouvre une suite d'opérations chimiques, caractérisées par la mise en solution aqueuse du métal (lixiviation) et son raffinage à partir de cette solution.

Les paramètres intervenant lors de la mise en solution ou lixiviation de l'élément, où les éléments recherchés sont d'une part, des phénomènes physiques de transfert et d'autre part des phénomènes chimiques de transformations des composés.

Au cours de ce travail, nous avons tenté de mettre en solution l'or par lixiviation complexante; pour cela deux méthodes ont été utilisées :

- La cyanuration en tas ;
- la cyanuration en cuve agitée

Si on considère la répartition des différents types d'échantillon (minerais et éluvions) devant être traités, les paramètres technologiques à investiguer, les moyens matériels limités et rudimentaires disponibles à notre niveau, le démarrage tardif des essais, tout cela contribue à justifier le nombre réduit d'essais technologiques liés à cette étude. Cette répartition des travaux, liés à cette étude d'orientation, comporte:

N°	Désignation des essais	Nombre d'essais	Quantité d'échantillons	Observations
1	Préparation et lixiviation par percolation au NaCN du minerai d'Or en colonne	09	9 x 3700 = 33,3 Kg	La durée de rétention limite retenue est de 15 jours
2	Préparation et lixiviation par perfusion au NaCN sur les éluvions ( dépôt de surface)	04	4 x 900 = 3,6 Kg	La durée de rétention est de 10 jours
3	Préparation et lixiviation sur cuves au NaCN sur l'échantillon filon	12	12 x 260 = 3,12 Kg	Le temps de cyanuration limité est de 30 heures

Concernant l'organisation des différentes étapes du traitement du minerai et des éluviions (dépôt de surface), nous avons pu les réaliser au niveau des laboratoires ci-après désignés :

N°	Désignation Des opérations	Désignation des laboratoires ou site	Entreprises ou universités	Observation
1	Echantillonnage Minerai de filon et d'éluviions	Gisement de TIREK (hoggar)	E.N.O.R	Stage réalisé sur site (3 semaines ) D.G entreprise
2	Préparation mécanique du matériau	Laboratoire de valorisation des mineraies	E.N.P	Fragmentation classification
3	Caractérisation du matériau	Départements Génie minier Génie civil	E.N.P	Analyse minéralogique Granulométrique, Caractéristiques physiques et physico-mécaniques
4	Essais technologiques de lixiviation en tas (percolation, perfusion, cuves)	Laboratoire de valorisation des mineraies département génie minier	E.N.P	
5	Analyses chimiques de l'or (I)	Département génie minier - génie chimique	E.N.P	Broyage, division, préparation solution
6	Analyses chimiques de l'or (II)	a)laboratoire de valorisation des mineraies b) laboratoire de chimie	a)U.S.T.H.B département chimie minérale b) O.R.G..M Boumerdes	a)analyse de l'or par absorption atomique b) stage d'initiation pour analyse par absorption atomique documentation

Nous avons soumis le minerai d'or du gisement de Tirek à quelques essais de lixiviation agitée et à des essais subséquents de lixiviation en colonnes, afin de déterminer les caractéristiques de la lixiviation en tas. La série d'essais préliminaires, utilisant des conditions de lixiviation avec agitation, avait pour objectif de déterminer les besoins en solution cyanurée (NaCN) et en produit oxydant si nécessaire, pour la lixiviation en colonne. Nous n'avons pu déterminer que les besoins de la solution cyanurée pour la lixiviation agitée (en cuve) avec une oxygénation à l'air. Il n'en demeure pas moins qu'il faille choisir et traiter le minerai avec des oxydants peu coûteux.

Une série d'essais technologiques sur colonnes, simulant une lixiviation en tas, a été menée en utilisant deux techniques de lixiviation, à savoir:

- une lixiviation cyanurée par percolation du minerai sur des colonnes
- une lixiviation cyanurée par perfusion des éluviions (dépôts de surface).

## 2) la cyanuration en cuve agitée :

### 2.1) Déroulement d'une expérience :

Des essais préliminaires de cyanuration ont porté sur becher de (900 g du minerai de granulométrie: -0,3; -0,16; -0,074 mm).

Les liqueurs agitées de la lixiviation ont été conduites à la température et à la pression atmosphérique ambiantes, durant une durée de lixiviation de trente heures. Nous avons prélevé

des échantillons après un certains temps (une à deux heures).ceux ci ont été filtrés et tous les produits, résidus et filtrats, ont été analysés.

Les différentes concentrations de cyanure de sodium dans le solvant sont 0,3; 0,5; 0,7; 1 g/l.

Afin de maintenir le pH de la solution entre 10 et 11,5, le contrôle des solutions s'effectue par ajout de chaux(CaO ) .

L'échantillon est soumis à la cyanuration avec agitation en présence d'agents de cyanuration, dont les concentrations sont préalablement fixées pendant un temps donné.

Après décantation, la solution claire est séparée par filtration du résidu. Le filtrat est jaugé puis analysé.



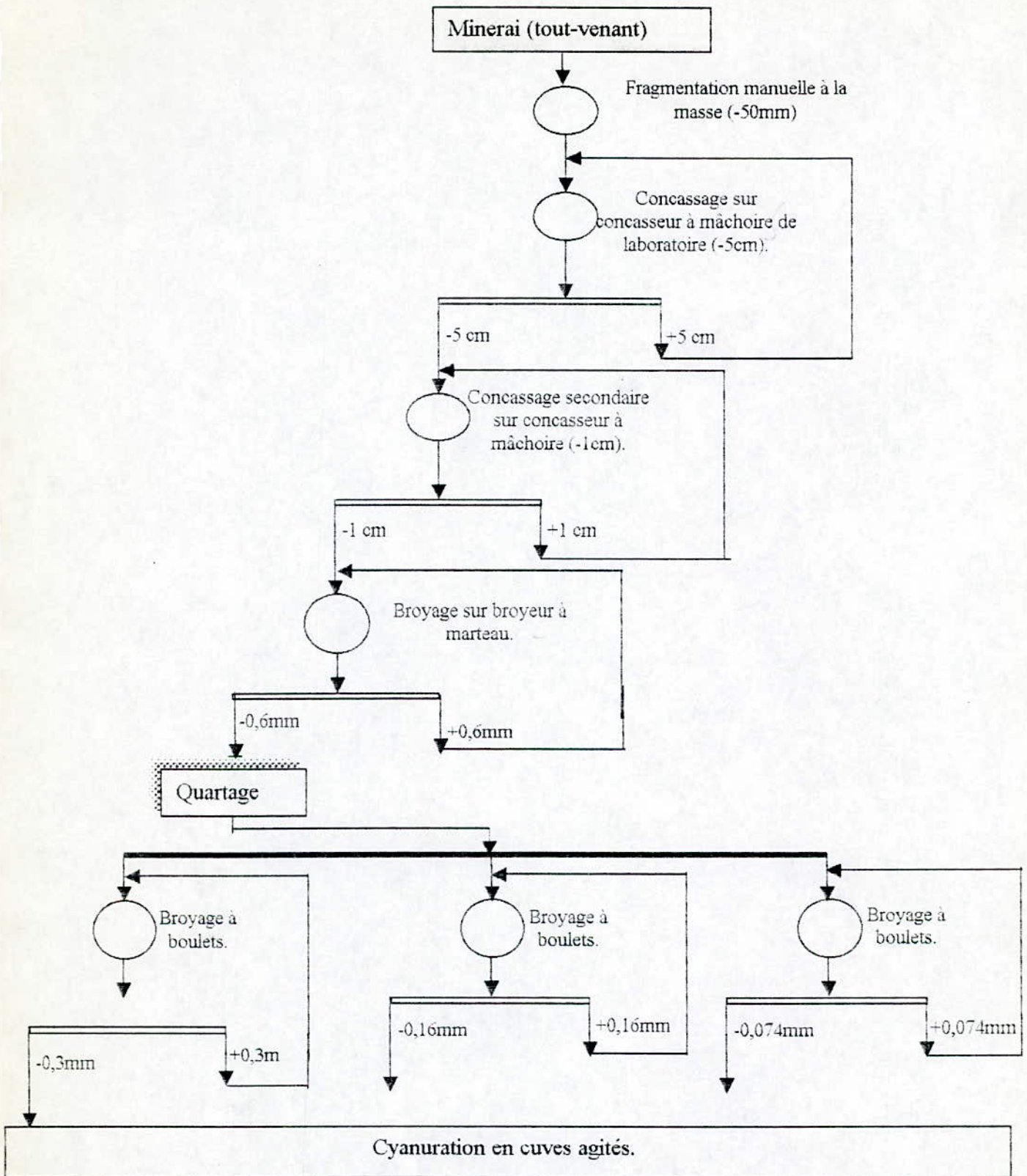


Schéma de préparation mécanique du minerai pour les essais de cyanuration en cuves agitées.

## 2.2) Paramètres étudiés :

La vitesse et la sélectivité de la dissolution des métaux présents dans le minerai sont fonction d'un grand nombre de variables fortement indépendantes. Le rapport liquide –solide est fixé à 2,5.

Nous avons étudié l'influence des paramètres intéressant la dissolution (concentration en réactif, durée de rétention et granulométrie).

### 2.2.1) Influence de la concentration en réactif

La figure 6 montre que la dissolution de l'or augmente avec une augmentation de la concentration en cyanure, la récupération maximale de l'or est atteinte si le solvant présente une concentration en cyanure de 1g/t.

### 2.2.2) Influence de la granulométrie :

D'après la figure 5, on déduit qu'il y a une linéarité entre la granulométrie et la récupération métal. Le maximum de récupération est atteint pour une granulométrie de -0,074mm. Nous pouvons dire que la dissolution de l'or augmente avec le degré de libération des grains d'or.

### 2.2.3) Influence du temps de cyanuration :

Nous avons entrepris d'étudier l'influence du temps de cyanuration sur trois classes granulométriques ( -0,3 ; -0,16 ; -0,074 ) à des intervalles de temps allant de 1 à 30 heures.

Les résultats obtenus (les tableaux et les figures 1, 2, 3 et 4) montrent que le temps de dissolution est fonction de la granulométrie étudiée ;

La durée de la cyanuration diminue avec les fines granulométries.

Dans le cas de la granulométrie -0,074 mm, la dissolution maximale est atteinte pour un temps inférieur ou égal à 17 heures. Pour les autres granulométries, un temps de 25 heures et plus est nécessaire pour une dissolution maximale.

Temps (h)	Broyage-0,3mm		Broyage-0,16mm		Broyage-0,074mm	
	Concentration Au (g/t)	Récupération Au (%)	Concentration Au (g/t)	Récupération Au (%)	Concentration Au (g/t)	Récupération Au (%)
1	10,05	39,14	12,93	42,45	8,59	49,42
3	12,89	50,18	16,97	55,70	11,32	65,12
4	14,17	55,19	19,08	62,60	12,20	70,18
7	16,11	62,74	20,65	67,75	13,82	79,48
9	17,22	67,04	21,58	70,80	14,22	81,78
11	18,37	71,54	23,21	76,14	14,60	83,98
13	21,35	77,54	26,25	85,18	14,81	86,14
17	21,85	84,09	27,05	87,52	15,49	90,06
19	22,16	86,30	27,05	88,70	15,66	90,07
25	22,19	86,40	27,05	88,78	15,66	90,07
30	22,44	87,40	27,36	88,79	15,84	90,10
Teneur de Au dans le tout venant (g/t)	25,68		30,48		17,39	
Teneur de Au dans le stérile (g/t)	3,20		3,15		1,53	
Teneur reconstituer	3,22		3,19		1,54	

Tableau 1: Résultats des essais de lixiviation en cuves pour une concentration de cyanure de 0.3 g/l.

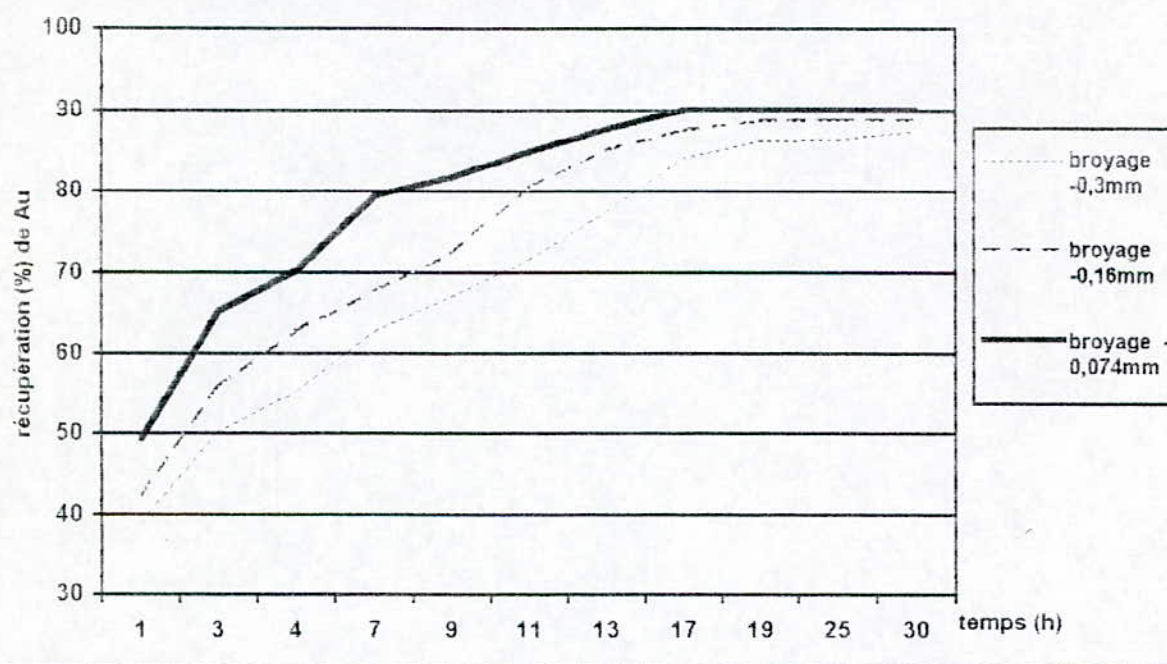
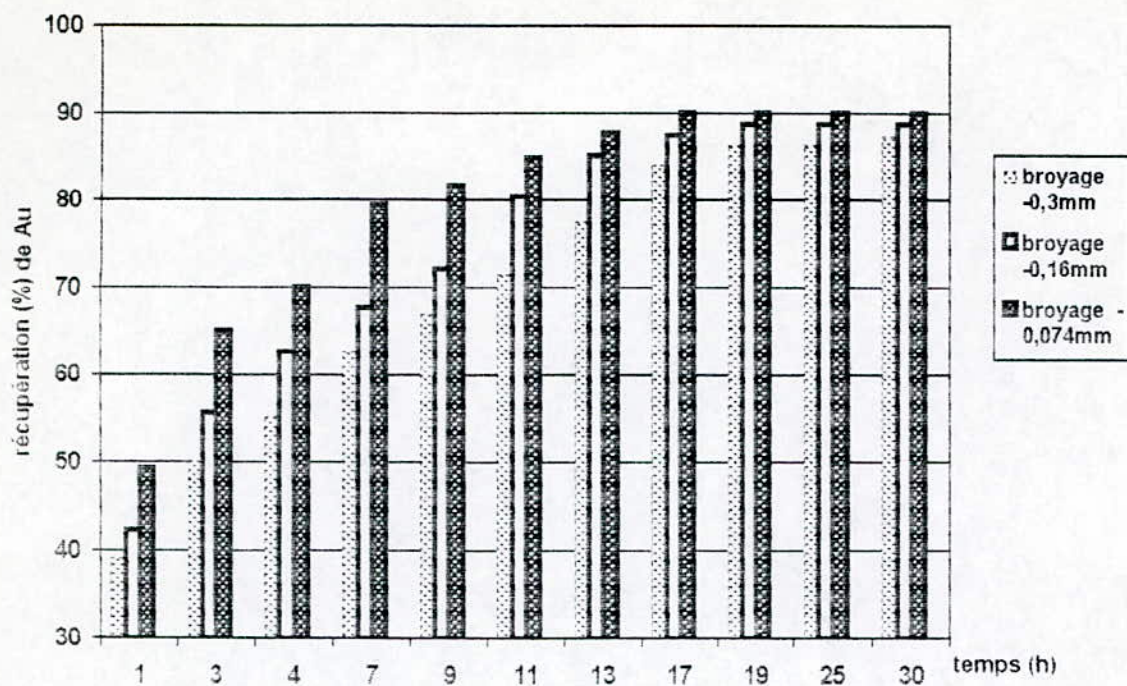


Figure 1 : Influence du temps de cyanuration pour une concentration de 0.3 g/l.

Temps (h)	Broyage-0,3mm		Broyage-0,16mm		Broyage-0,074mm	
	Concentration Au (g/t)	Récupération Au (%)	Concentration Au (g/t)	Récupération Au (%)	Concentration Au (g/t)	Récupération Au (%)
1	11,12	44,23	8,85	46,17	16,94	47,78
3	12,43	49,43	9,61	50,14	18,48	52,14
4	13,24	52,67	10,44	54,47	20,62	58,17
7	14,11	56,14	11,23	58,57	21,58	60,87
9	14,64	58,23	11,73	61,14	25,10	70,80
11	17,73	70,54	13,90	72,47	27,34	77,14
13	20,11	80,00	15,63	81,47	30,30	85,47
17	22,74	90,25	17,53	91,10	32,66	92,13
19	22,74	90,35	17,53	91,30	32,66	92,13
25	22,74	90,46	17,53	91,40	32,66	92,13
30	22,48	90,47	17,54	91,45	32,67	92,14
Teneur de Au dans le tout venant (g/t)	25,14		19,18		35,45	
Teneur de Au dans le stérile (g/t)	2,66		1,64		2,79	
Teneur reconstituer	2,63		1,65		2,77	

Tableau 2: Résultats des essais de lixiviation en cuves pour une concentration de cyanure de 0.5 g/l.

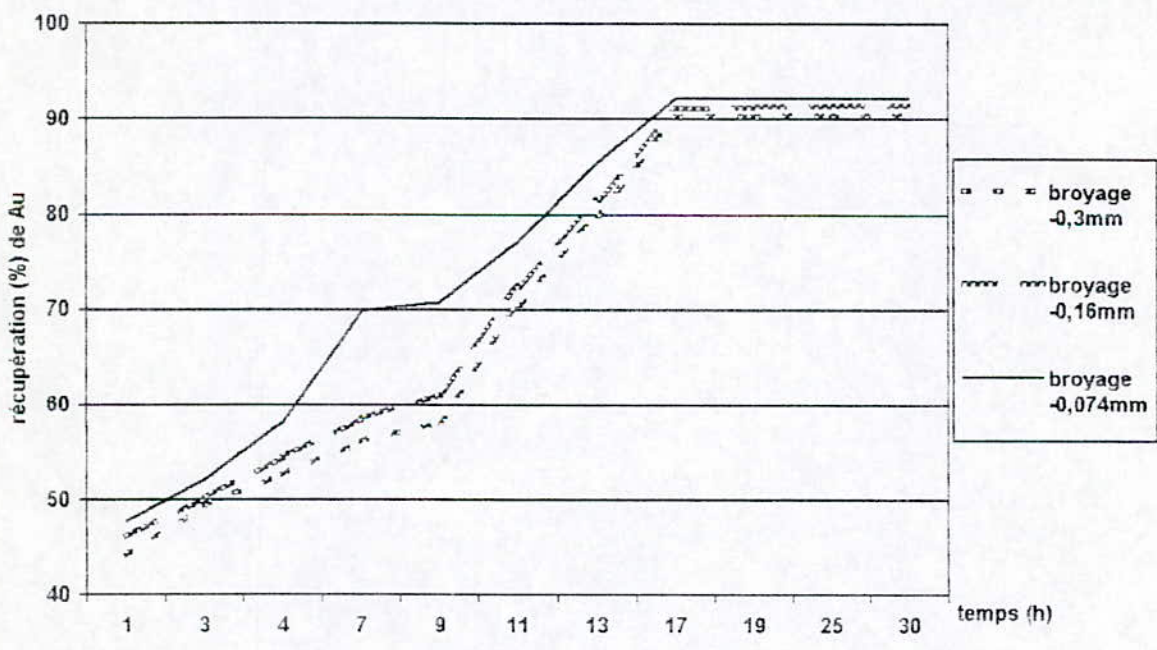
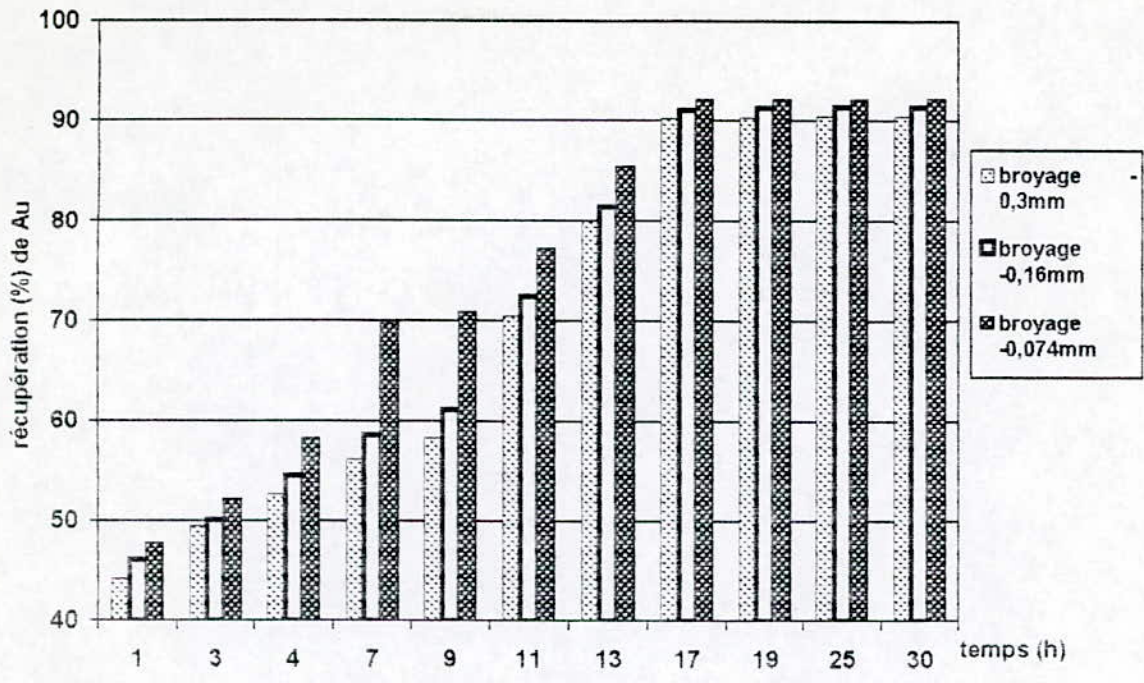


Figure 1 : Influence du temps de cyanuration pour une concentration de 0.5 g/l.

Temps (h)	Broyage-0,3mm		Broyage-0,16mm		Broyage-0,074mm	
	Concentration Au (g/t)	Récupération Au (%)	Concentration Au (g/t)	Récupération Au (%)	Concentration Au (g/t)	Récupération Au (%)
1	15,07	49,36	16,97	51,14	16,94	60,17
3	16,53	54,14	18,63	56,14	18,24	64,78
4	17,45	57,14	20,28	61,14	19,19	68,14
7	18,38	60,18	22,37	67,41	19,71	70,00
9	19,89	65,14	23,85	71,87	21,27	75,45
11	23,26	76,18	26,54	80,00	24,13	85,70
13	25,37	83,08	29,68	89,45	25,66	91,12
17	27,53	90,05	30,98	93,39	27,03	96,02
19	27,54	90,10	31,32	94,30	27,03	96,08
25	27,54	90,20	31,32	94,45	26,05	96,10
30	27,55	90,21	31,34	94,46	27,08	96,17
Teneur de Au dans le tout venant (g/t)	30,54		33,18		28,16	
Teneur de Au dans le stérile (g/t)	3,04		1,89		1,11	
Teneur reconstituer	3,00		1,80		1,09	

Tableau 3: Résultats des essais de lixiviation en cuves pour une concentration de cyanure de 0.7 g/l.

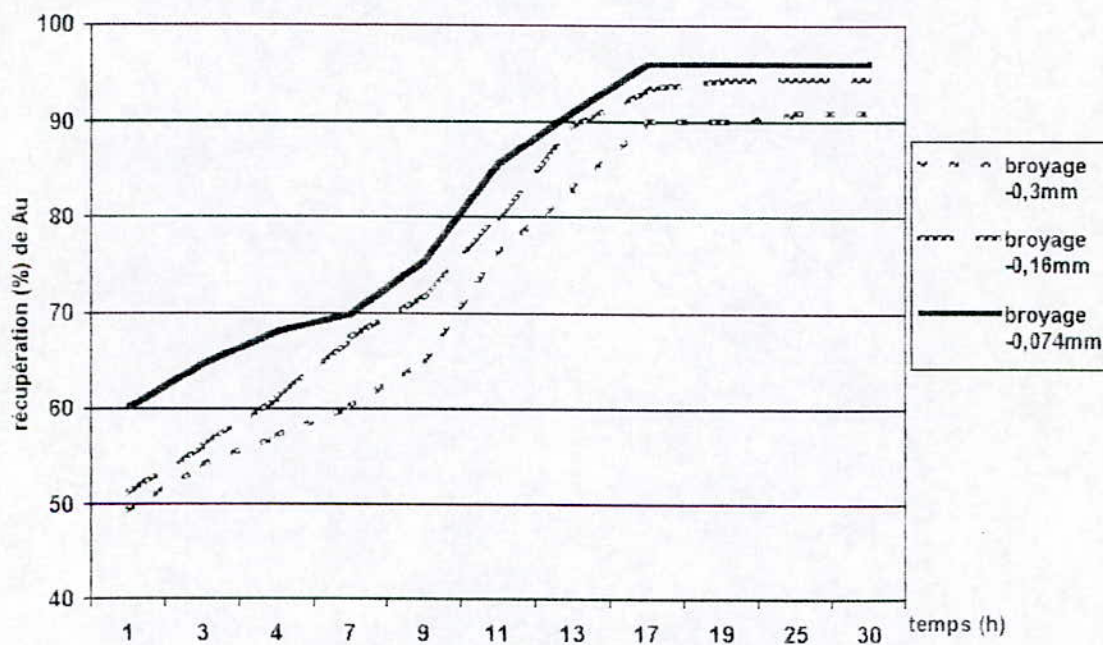
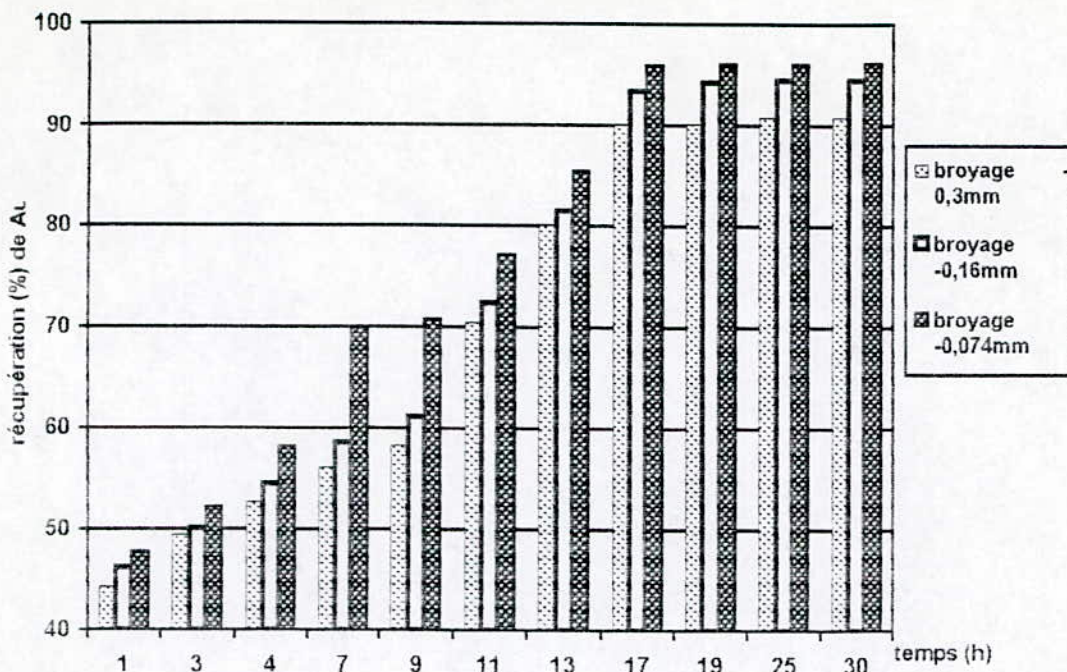


Figure 1 : Influence du temps de cyanuration pour une concentration de 0.7 g/l.



Temps (h)	Broyage-0,3mm		Broyage-0,16mm		Broyage-0,074mm	
	Concentration	Récupération	Concentration	Récupération	Concentration	Récupération
	Au (g/t)	Au (%)	Au (g/t)	Au (%)	Au (g/t)	Au (%)
1	12,18	47,87	9,47	52,17	16,42	58,87
3	13,35	52,47	10,20	56,17	18,02	64,60
4	14,11	55,46	10,63	58,54	20,80	74,6
7	15,47	60,78	11,65	64,15	22,20	79,60
9	17,86	70,19	13,65	75,21	24,99	89,60
11	20,65	81,14	15,43	85,00	26,48	94,97
13	22,94	90,17	17,20	95,20	27,58	98,89
17	24,60	95,10	17,29	96,59	27,58	98,89
19	24,60	95,20	17,29	96,90	27,58	98,89
25	24,60	95,70	17,46	97,78	27,58	98,89
30	24,63	95,71	17,76	97,80	27,58	98,89
Teneur de Au dans le tout venant (g/t)	25,45		18,16		27,89	
Teneur de Au dans le stérile (g/t)	0,80		0,45		0,32	
Teneur reconstituer	0,82		0,44		0,33	

Tableau 4: résultats des essais de lixiviation en cuves pour une concentration de cyanure de 1 g/l.

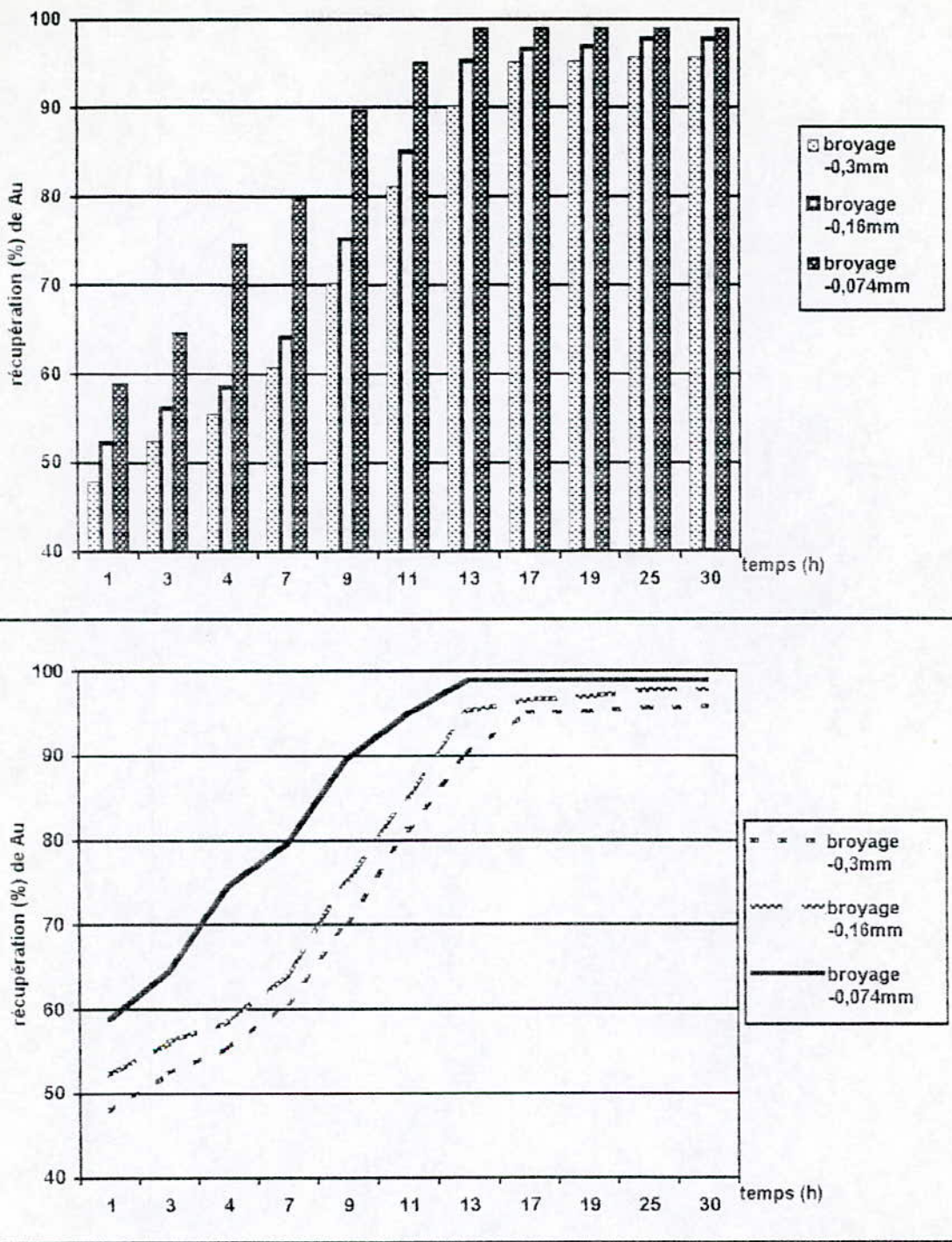


Figure 4 : influence du temps de cyanuration pour une concentration de 1 g/l.

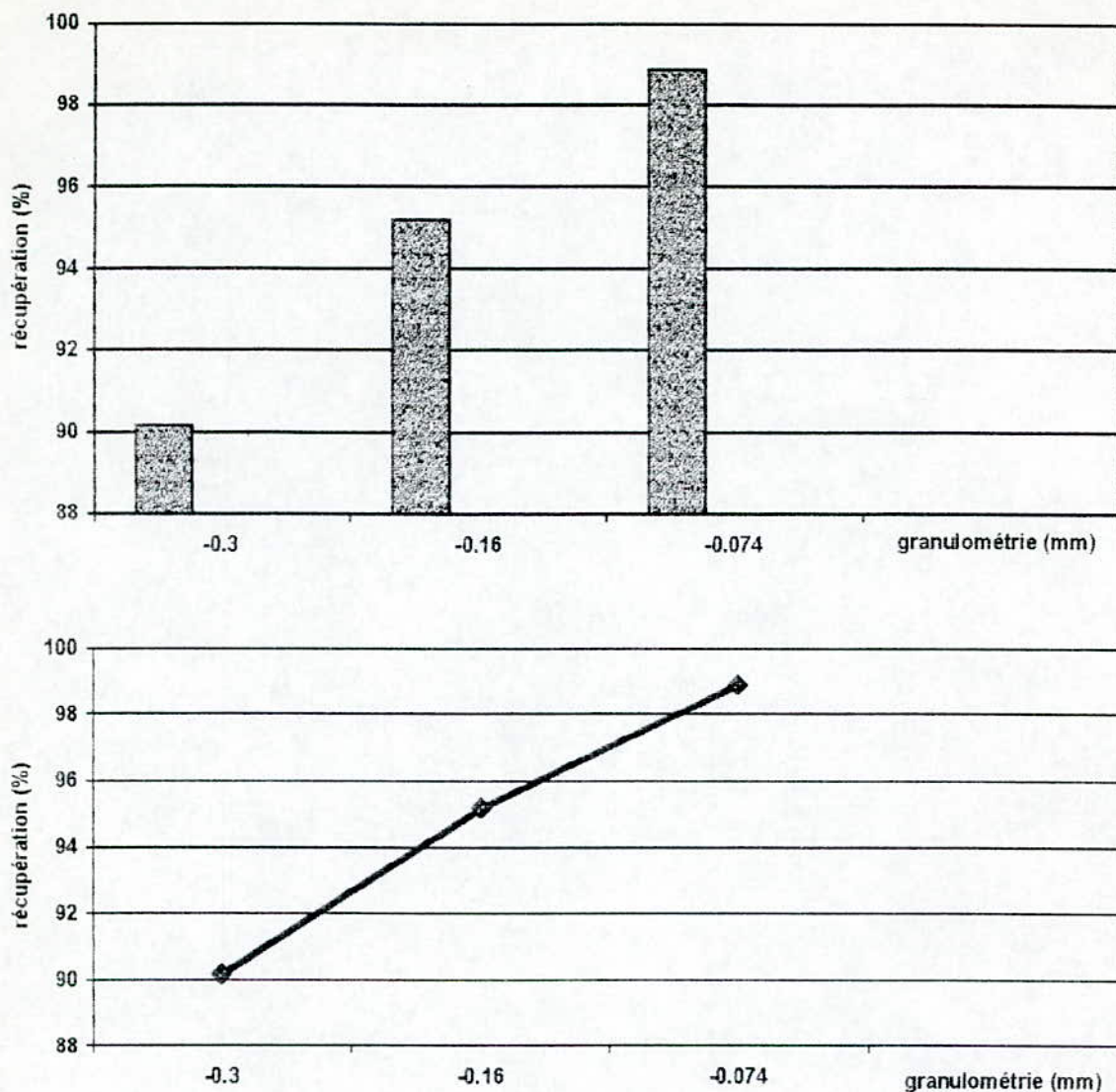


Figure 5 : influence de la granulometrie sur la récupération de l'or.

**Conditions fixées:**

- concentration de cyanure(NaCN): 1g/l=540,5g/tonne
- temps d'agitation:17 heures.
- Rapport liquide-solide = 2,5.
- pH = [10,5-11].

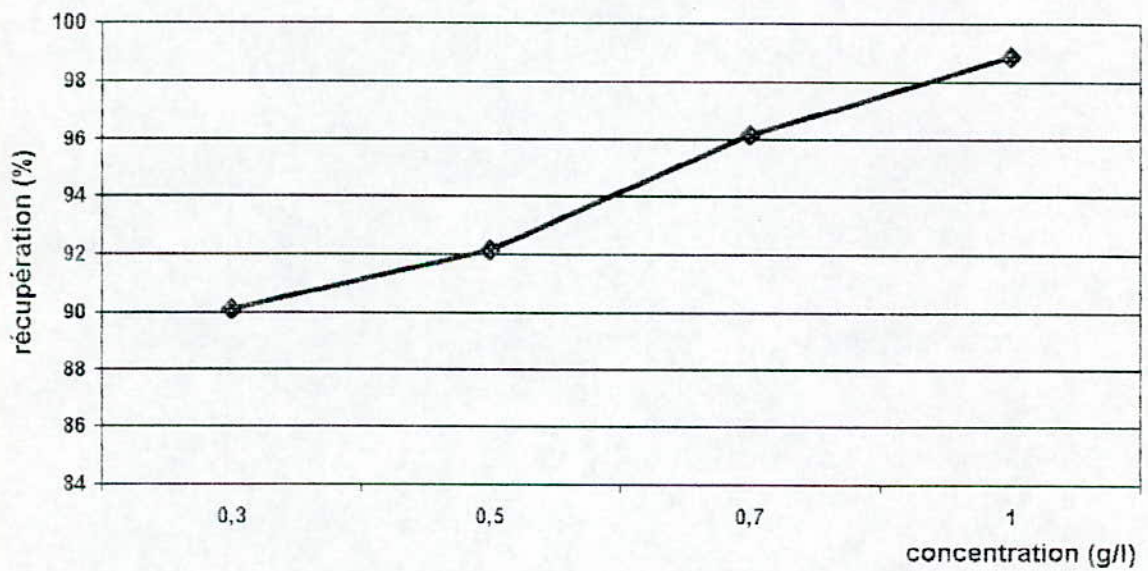
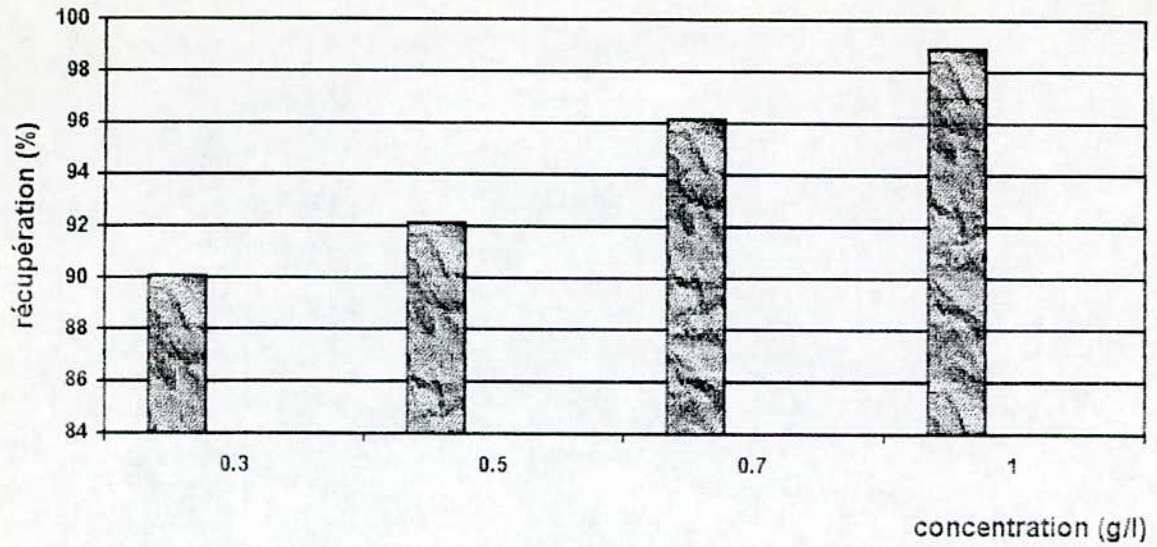


Figure 6 : influence de la concentration du cyanure sur la récupération de l'or.

Conditions fixées:

- Broyage  $-0,074$  mm.
- temps d'agitation: 30 heures.
- rapport liquide-solide = 2,5.
- pH = [10,5-11].

### 3) Cyanuration en tas (lixiviation en colonnes):

Dans la deuxième série d'essais, nous avons procédé à la simulation d'une lixiviation en tas, en utilisant une série de trois colonnes en verre de 154 cm de hauteur avec un diamètre de 6 cm.

Nous avons placé des charges de 3,7 kg du minerai de même granulométrie (soit - 12,5 ou -9 ou -5 mm). Ces trois granulométries, représentant nos échantillons ont été lixiviées, en utilisant trois concentrations différentes (0,3; 0,5; 0,7 g/l) en cyanure de sodium (NaCN) pour chacune d'entre elles.

Comme régulateur de pH, nous avons injecté après contrôle de pH entre 10,5 et 11, de la chaux. L'air ici sert d'agent oxydant.

Durant l'opération, la solution lixivante a été pompée (pompe péristaltique), à partir d'un récipient positionné à la sortie inférieure de la colonne, de telle façon qu'elle soit transférée vers le sommet de la colonne.

La solution lixivante se déplacera dans la colonne de haut en bas (effet de gravité) tout en diffusant dans le matériau. L'effluent retourne dans le récipient collecteur, occasionnant un circuit fermé (voir figure). Ce qui permet donc au minerai concassé, à telle ou telle granulométrie, d'être lixivié dans une colonne inondée de solution lixivante continuellement recyclée.

Des échantillons intermittents sont prélevés au niveau du récipient collecteur pour analyser leur contenu en or.

En fin de lixiviation, lorsque nous remarquons que les petits blocs de minerai ont tendance à s'effriter, nous drainons tout le liquide de chaque colonne, tout en enregistrant le volume final du récipient et son analyse en or.

Nous avons lavé les trois colonnes. Les eaux de lavage doivent être analysées. Le minerai lixivié a été extrait de chaque colonne, pesé, séché, et une partie de ce minerai a été

broyée Pour analyser l'or, qui s'y trouve. Les résultats apparaissent dans les tableaux ci-dessous.

### 3.1) Matériel utilisé :

Pour effectuer ces expériences on a utilisé le matériel suivant :

1. Une masse pour casser les gros blocs d'échantillon.
2. Une pelle pour l'homogénéisation et pour le quartage du tout-venant.
3. Un diviseur pour partager le tout-venant homogénéisé.
4. Un concasseur à mâchoires de laboratoire pour la préparation mécanique de l'échantillon destiné à l'expérience.
5. Des colonnes en verre devant contenir l'échantillon à traiter.
6. Les pompes péristatiques pour le recyclage de la solution de cyanure.
7. Des tuyaux en plastique pour monter la solution en haut des colonnes.
8. Des cuves collectrices en plastique pour recycler la solution mère.
9. De laine de verre pour distribuer uniformément la solution de cyanure sur toute la section de la colonne.
10. Du papier pH pour contrôler la variation de pH et un pH mètre.
11. Une pipette pour les prélèvements à analyser.
12. De La chaux CaO pour maintenir le pH entre 10,5 et 11.
13. Des fioles en verre pour conserver les prises.
14. Un broyeur pour broyer les prises des échantillons provenant des colonnes avant et après l'expérience (pour déterminer la quantité d'or qui se trouve dans cette colonne, afin de calculer le taux de dissolution de l'or).
15. Une pulvérisette pour le même objectif que précédemment.

### 3.2) Procédure de l'expérience :

Les essais ont été menés sur des colonnes contenant des minerais concassés de granulométries (-12,5 ; -9 ; -5 mm).

Chaque dimension du minerai a été lixiviée avec une solution de NaCN, avec des concentrations de 0,3 ; 0,5 ; 0,7 g/l.

On utilise l'air ambiant comme agent d'oxydation.

Nous avons utilisé de la chaux pour réguler et maintenir le pH entre 10,5 et 11.

Les essais ont été conduits dans trois colonnes individuelles en verre. Les colonnes ont une hauteur de 154 cm et un diamètre de 6 cm ; les fonds des colonnes ont été colmatés par

un bourrage de laine de verre, maintenant le minerai dans la colonne, et, laissant passer l'effluent ; se déversant dans un récipient en plexiglas.

La solution lixivante est recyclée vers le haut de la colonne à l'aide d'une pompe péristaltique à débit variable. Au début des essais, les colonnes ont été lavées avec de l'eau déionisée, comme étape de conditionnement, cette eau permet de déplacer l'air dans les couches de minerai et assurer le mouillage. L'eau de conditionnement de chaque colonne a été utilisée pour la préparation des solutions cyanurée lixiviantes.

Des échantillons de l'effluent ont été prélevés périodiquement des collecteurs (réservoirs) pour l'analyse de l'or contenu.

A la fin de la période de lixiviation, la solution lixivante a été drainée de la colonne. Trois lavages de déplacement ont été passés dans chaque colonne et recueillis séparément.

Les lavages de déplacement ont été analysés pour l'or.

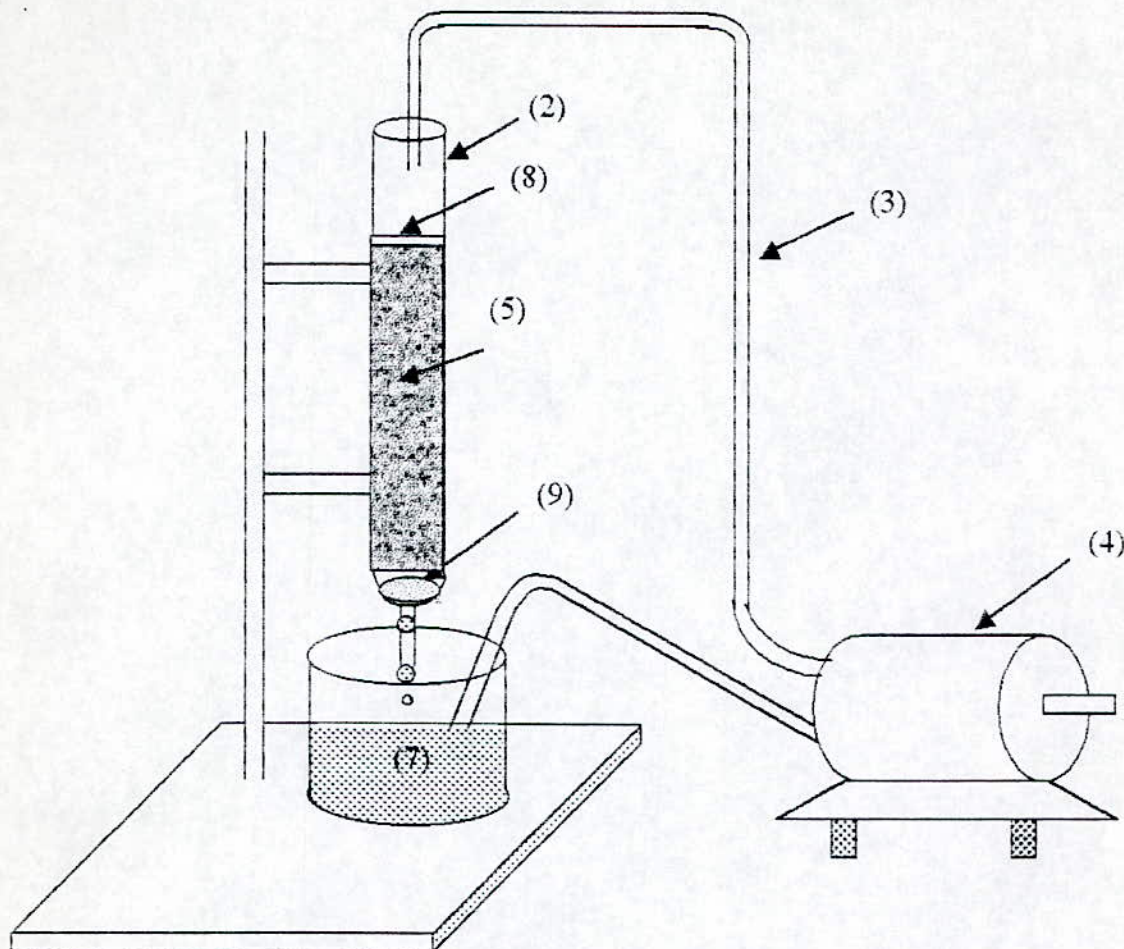
Les charges de minerai lavé ont été retirées des colonnes, pesées, séchées puis analysées pour l'or.

**Remarque :**

Concernant les prélèvements devant être analysés, une procédure opératoire a été pratiquée au niveau du minerai tout-venant avant et après la lixiviation cyanurée :

- durant la charge du minerai dans la colonne, cinq prises d'échantillons à différents niveaux similaires de la colonne ont été réalisées. Il en est de même pour les prises d'échantillons de résidus.
- Le mélange de ces cinq prises a été fait, puis on a pratiqué un broyage et une pulvérisation, suivie d'une division d'échantillons à analyser de granulométrie  $-100 \mu\text{m}$ .

Le schéma de la figure 7 montre le dispositif utilisé en laboratoire pour cette procédure.



- (1) Support.
- (2) Colonne en verre de 6 cm de diamètre et de 154 cm de longueur.
- (3) Tuyaux en plastiques flexibles.
- (4) Pompe péristaltique.
- (5) Minerai d'or.
- (6) Becher.
- (7) Solution d'attaque (NaCN).
- (8) Laine de verre.
- (9) Laine de verre.

Figure 7 : Schéma du dispositif utilisé en laboratoire.



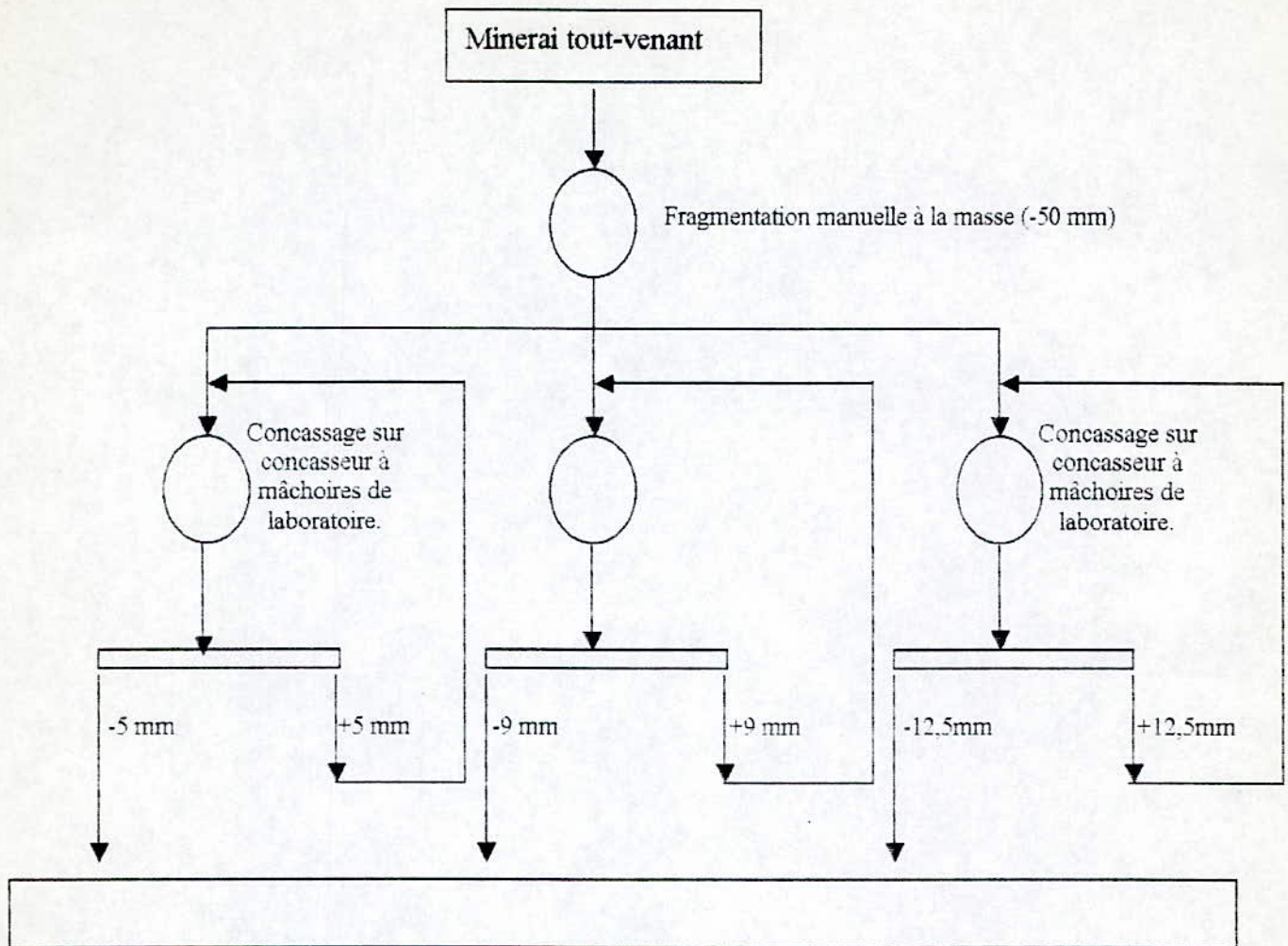


Schéma de préparation mécanique du minerai pour lixiviation en tas (percolation)

### 3.3) Paramètres étudiés :

Le débit, l'alcalinité du milieu, la température et la pression d'oxygène sont des paramètres qui ne sont pas étudiés dans ce travail. Ce travail se restreint à l'étude de l'influence des paramètres intéressant la dissolution (concentration en réactifs, granulométrie, durée).

#### 3.3.1) Influence du temps de cyanuration :

Nous avons entrepris d'étudier l'influence du temps de cyanuration sur les trois classes granulométriques (-12.5, -9, -5 mm) à des intervalles de temps équivalents à une journée. Les résultats obtenus, Tableaux et figures 5, 6 et 7 montrent que la récupération est fonction de la durée de rétention, 47,29

#### 3.3.2) Influence de la granulométrie :

D'après la figure 11, on déduit qu'il y a une linéarité entre la granulométrie et la récupération métal. Le maximum est atteint (tableau 7) pour une granulométrie de 5 mm. Nous pouvons dire que la dissolution de l'or augmente avec le degré de libération des grains d'or.

#### 3.3.3) Influence de la concentration en réactif

La figure 12 montre que la dissolution de l'or augmente avec une augmentation de la concentration en cyanure, le maximum de récupération est atteint dans notre cas pour une concentration en cyanure de 0,7 g/l (411,76 g/t).

Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux suivants :

Durée de rétention (jour)	Granulométrie -12,5mm		Granulométrie -9mm		Granulométrie -5mm	
	Concentration Au (g/t)	Récupération Au (%)	Concentration Au (g/t)	Récupération Au (%)	Concentration Au (g/t)	Récupération Au (%)
1	2,29	5,30	3,44	6,37	3,20	7,35
2	3,33	7,70	6,66	12,33	5,55	12,75
3	4,00	9,25	7,77	14,39	7,80	17,82
4	4,50	10,41	8,59	15,91	8,42	19,34
5	5,00	11,57	9,40	17,41	8,48	20,39
6	6,66	15,41	10,00	18,52	9,20	21,13
7	7,11	16,45	10,55	19,54	9,50	21,82
8	7,83	18,12	11,66	21,59	9,89	22,72
9	8,09	18,72	12,77	23,65	10,09	23,17
10	8,80	20,36	13,88	25,70	10,80	24,81
11	10,55	24,41	14,50	26,86	11,50	26,41
12	10,81	25,01	15,90	29,45	12,50	28,71
13	11,08	25,63	16,49	30,54	12,80	29,40
14	12,00	27,76	12,23	31,91	13,19	30,29
15	12,10	28,00	20,29	37,58	13,40	30,78
Teneur de Au dans le tout venant (g/t)	43,21	100 (%)	53,98	100(%)	43,53	100(%)
Teneur de Au dans le stérile (g/t)	31,11		33,69		30,13	

Tableau 5: Résultats des essais de lixiviation en tas (percolation) pour une concentration de cyanure de 0.3 g/l.

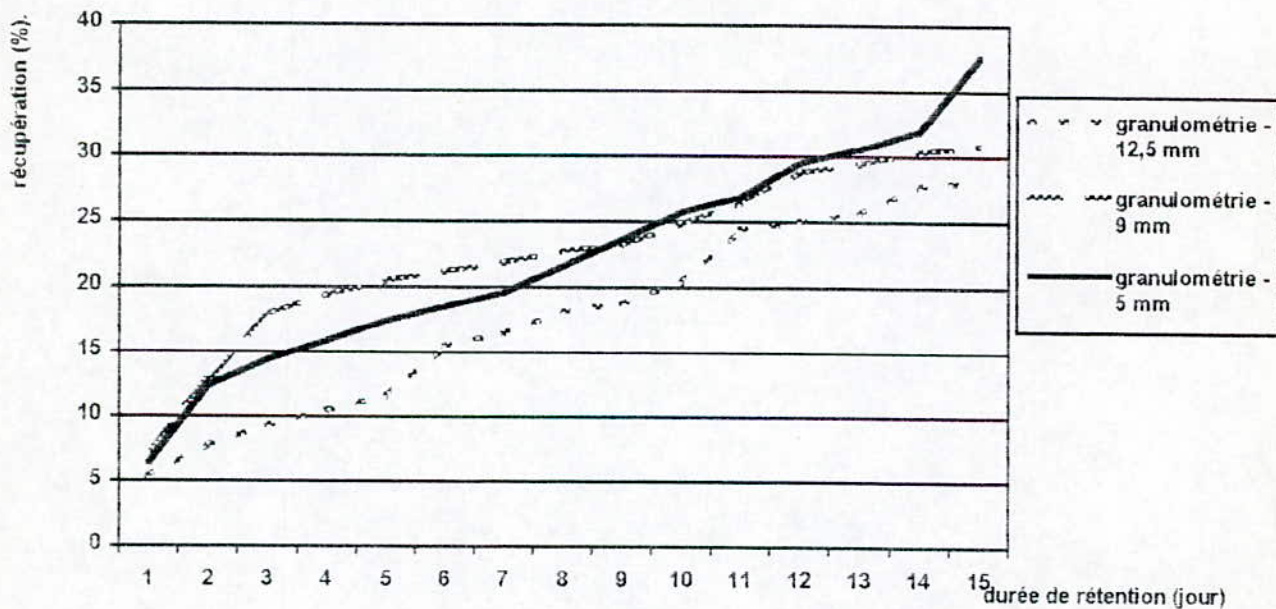
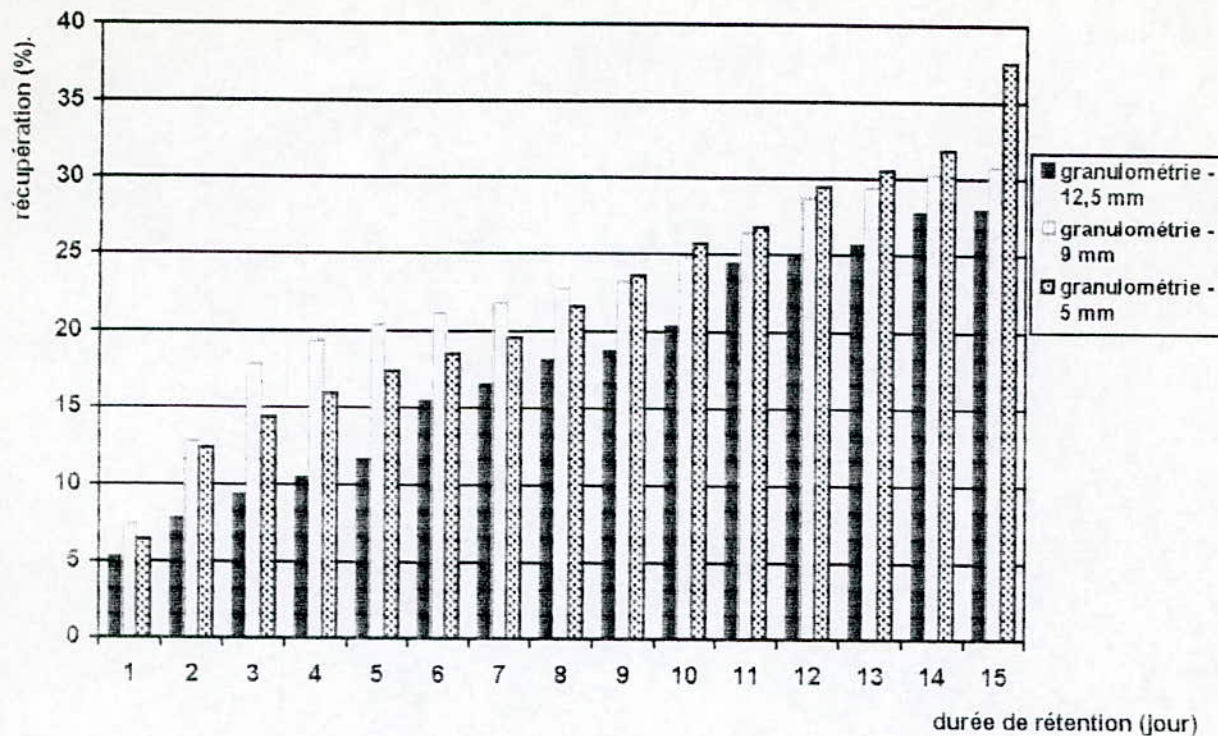


Figure 8 : Influence de la durée de rétention sur la récupération de l'or (pour une concentration de 0.3 g/l de cyanure).

Durée de rétention (jour)	Granulométrie -12,5mm		Granulométrie -9mm		Granulométrie -5mm	
	Concentration Au (g/t)	Récupération Au (%)	Concentration Au (g/t)	Récupération Au (%)	Concentration Au (g/t)	Récupération Au (%)
1	4,30	5,44	4,10	10,31	3,05	8,76
2	6,30	7,97	6,10	15,35	5,20	14,94
3	8,48	10,72	7,03	17,68	6,90	19,03
4	9,50	12,01	8,30	20,88	7,20	20,70
5	10,50	13,28	9,10	22,90	7,85	22,56
6	12,30	15,55	9,59	24,13	8,80	25,29
7	13,10	16,56	10,03	25,24	9,50	27,31
8	15,20	19,22	10,56	26,57	10,03	28,83
9	15,59	19,71	11,09	27,90	10,95	31,47
10	18,30	23,14	11,82	29,74	11,21	32,22
11	20,51	25,93	12,03	30,27	11,83	34,00
12	23,30	29,46	12,83	32,28	12,06	34,66
13	24,10	30,47	13,25	33,34	12,75	36,64
14	25,03	31,65	13,83	34,80	13,01	37,39
15	25,90	32,75	14,10	35,48	13,54	38,92
Teneur de Au dans le tout venant (g/t)	79,08	100 %	39,74	100 %	34,78	100 %
Teneur de Au dans le stérile (g/t)	53,18		25,64		21,24	

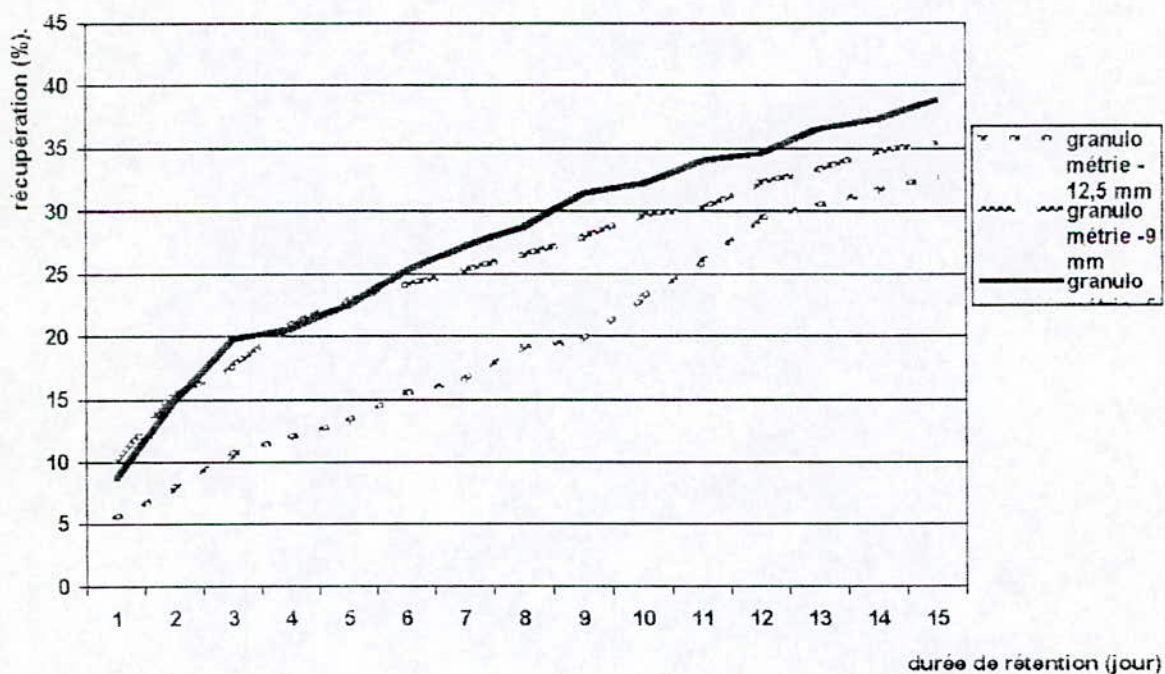
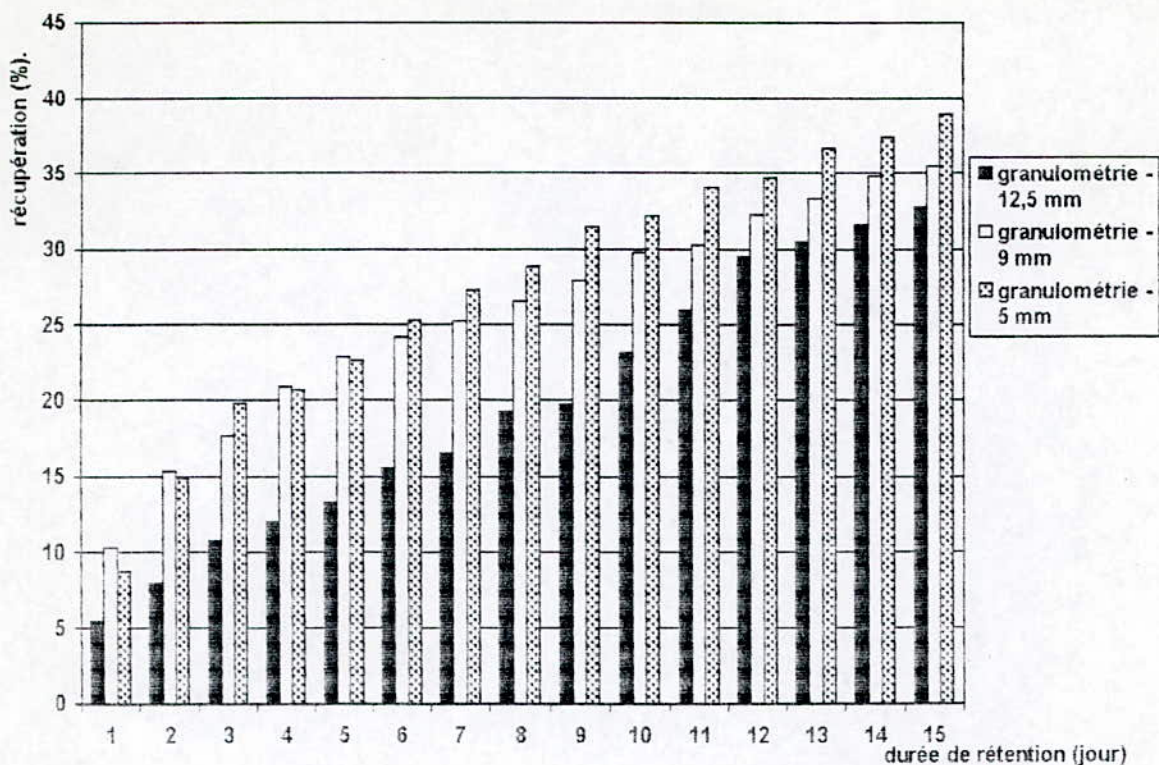


Figure 9 : Influence de la durée de rétention sur la récupération de l'or (pour une concentration de 0.5 g/l de cyanure).

Durée de rétention (jour)	Granulométrie -12,5mm		Granulométrie -9mm		Granulométrie -5mm	
	Concentration Au (g/t)	Récupération Au (%)	Concentration Au (g/t)	Récupération Au (%)	Concentration Au (g/t)	Récupération Au (%)
1	2.10	6.64	2.78	7.65	1.09	5.68
2	3.84	7.53	3.15	13.99	1.78	9.27
3	4.09	11.49	4.80	14.90	2.15	1.20
4	4.58	14.1	5.90	16.69	3.64	18.75
5	4.94	14.63	6.12	18.00	4.18	21.77
6	5.38	17.07	7.14	19.60	5.12	26.66
7	5.94	19.49	8.15	21.65	5.67	29.53
8	6.28	21.95	9.18	22.88	6.09	31.71
9	7.05	25.78	10.78	25.69	6.55	34.21
10	7.87	28.43	11.89	28.68	6.96	36.24
11	8.15	31.19	13.04	29.70	7.19	37.45
12	9.42	34.56	14.45	34.33	7.69	40.05
13	10.12	38.45	16.08	36.88	8.05	41.92
14	10.78	42.52	17.78	39.28	8.87	46.19
15	11.19	34.67	18.27	40.78	9.08	47.29
Teneur de Au dans le tout venant (g/t)	27.44	100	41.81	100	19.20	100
Teneur de Au dans le stérile (g/t)	16.25		23.55		10.12	

Tableau 7 : résultats des essais de lixiviation en tas (percolation) pour une concentration de cyanure de 0.7 g/l.

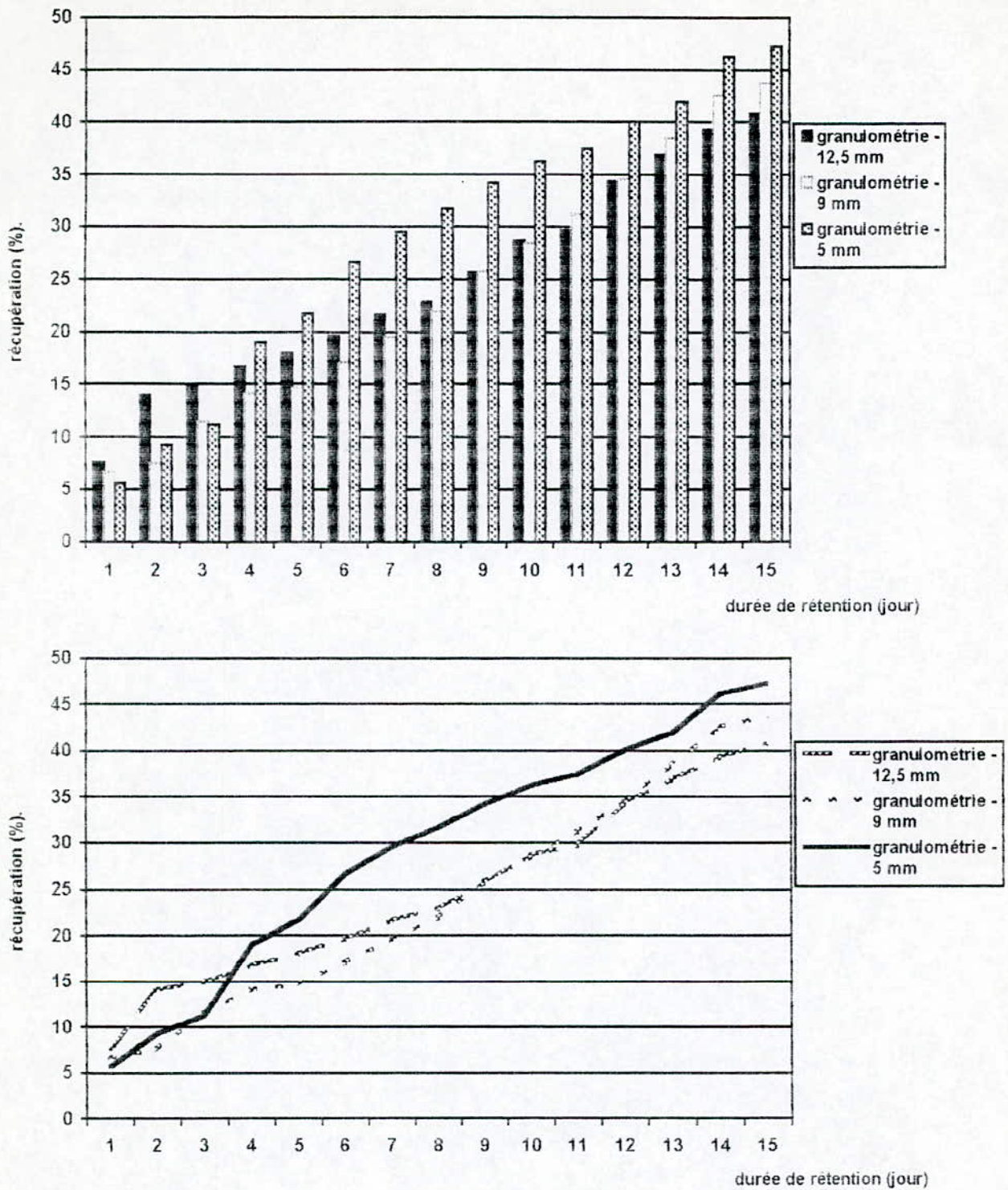


Figure 10 : influence de la durée de rétention sur la récupération de l'or (pour une concentration de 0.7 g/l de cyanure).



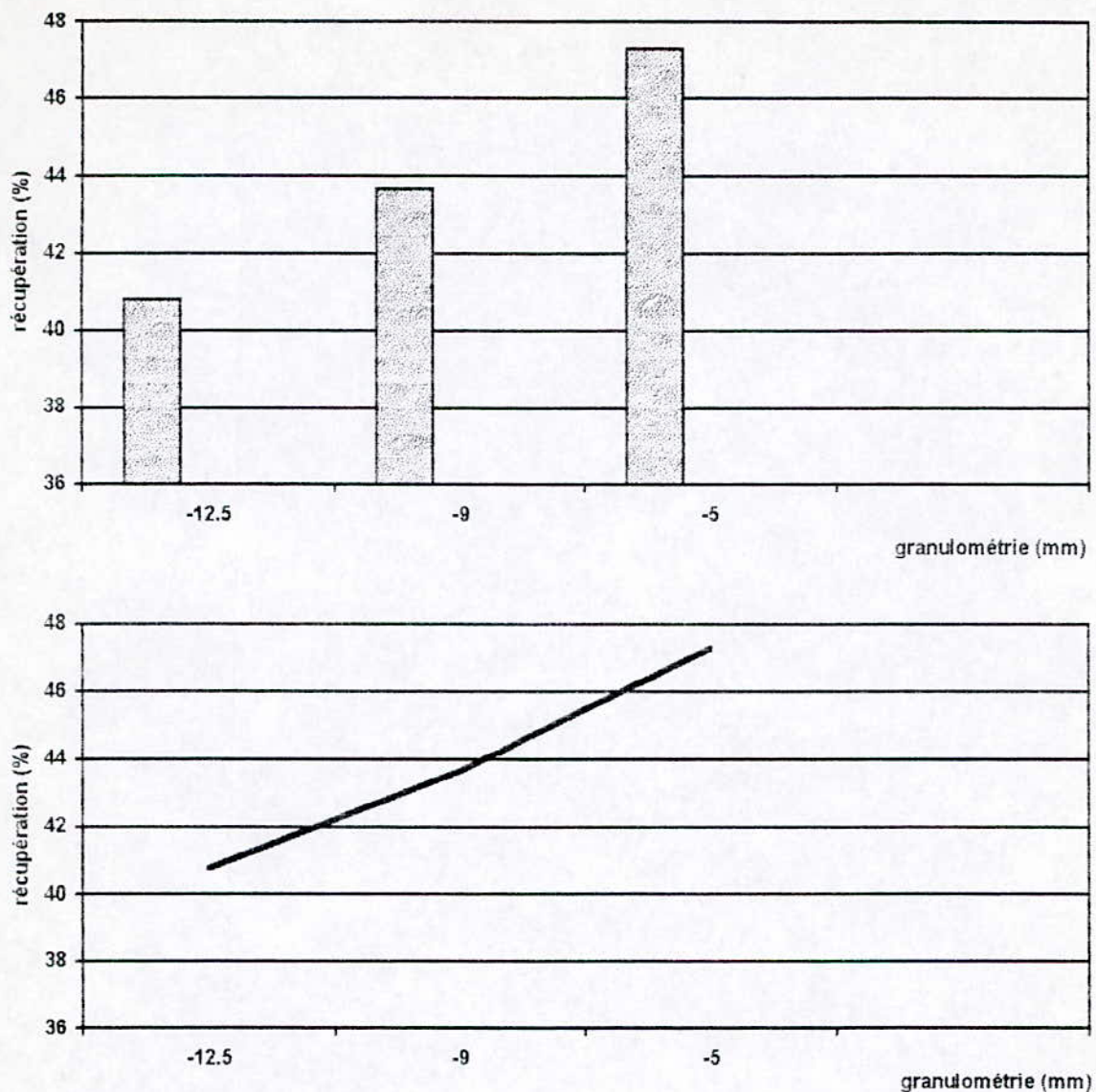


Figure 11 : influence de la granulométrie sur la récupération de l'or.

Conditions fixées:

- concentration de cyanure :  $0,7 \text{ g/l} = 378,39 \text{ g/t}$ .
- durée de rétention : 15 jours.
- $\text{pH} = [10,5-11]$ .

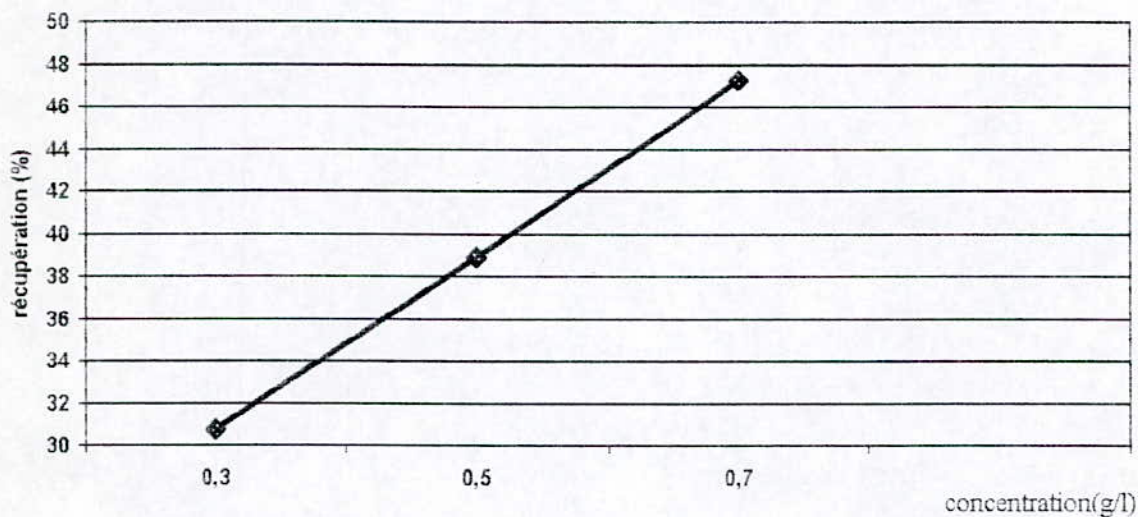
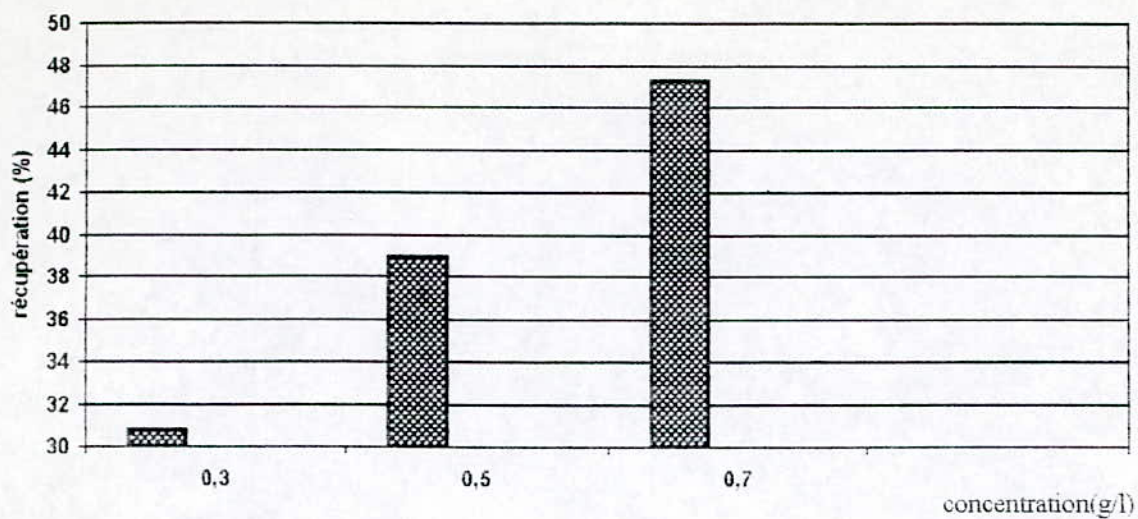


Figure 12 : influence de la concentration sur la récupération de l'or.

Conditions fixées:

- Granulométrie : -5mm
- durée de rétention :15 jours.
- pH = [10,5-11].

#### 4) Cyanuration en colonne (perfusion) :

Une deuxième méthode de la cyanuration en colonne a été expérimentée : il s'agit de la lixiviation cyanurée par perfusion ; la différence entre cette méthode et la précédente (percolation), réside essentiellement à une diminution conséquente du débit. pour la percolation, il est de 4,8 ml/s ; cependant pour la perfusion, le débit est très petit (5 à 6 gouttes par seconde). On a adopté cette méthode pour les raisons suivantes :

- Manque de colonnes et de pompes, nous n'avons pu travailler en parallèle les éluviions.
- Temps limité. Car les essais n'ont débuté qu'en Juin.
- La diffusion du solvant en temps est plus complète. Le cyanure réagit mieux.

Le principe de fonctionnement de la perfusion, représenté dans le schéma ci-dessous (N°7) est similaire à celui de la percolation, à la différence que l'on utilise ici un perfuseur médical au lieu d'une pompe pour alimenter la colonne en solution cyanurée.

Les résultats de ces opérations sont résumés dans le tableau n°5 et ses schémas.

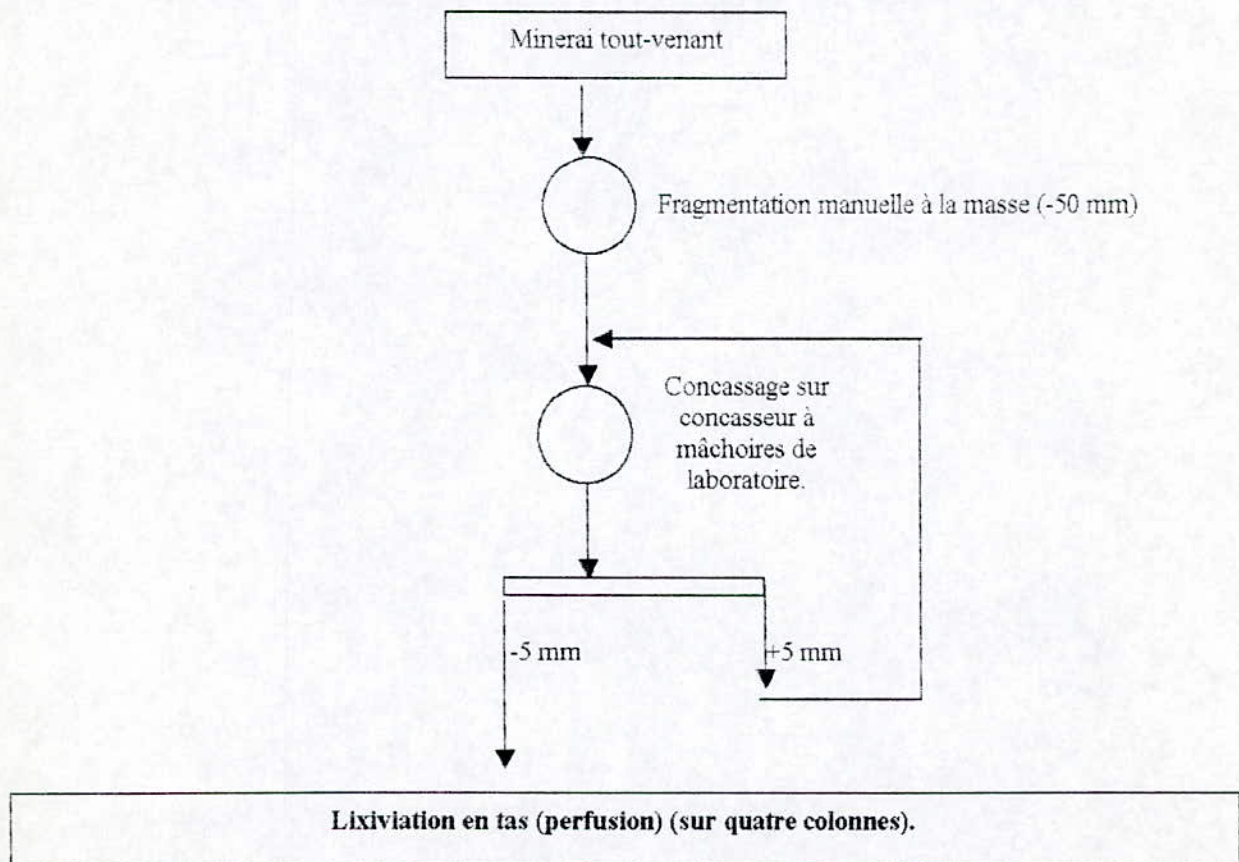
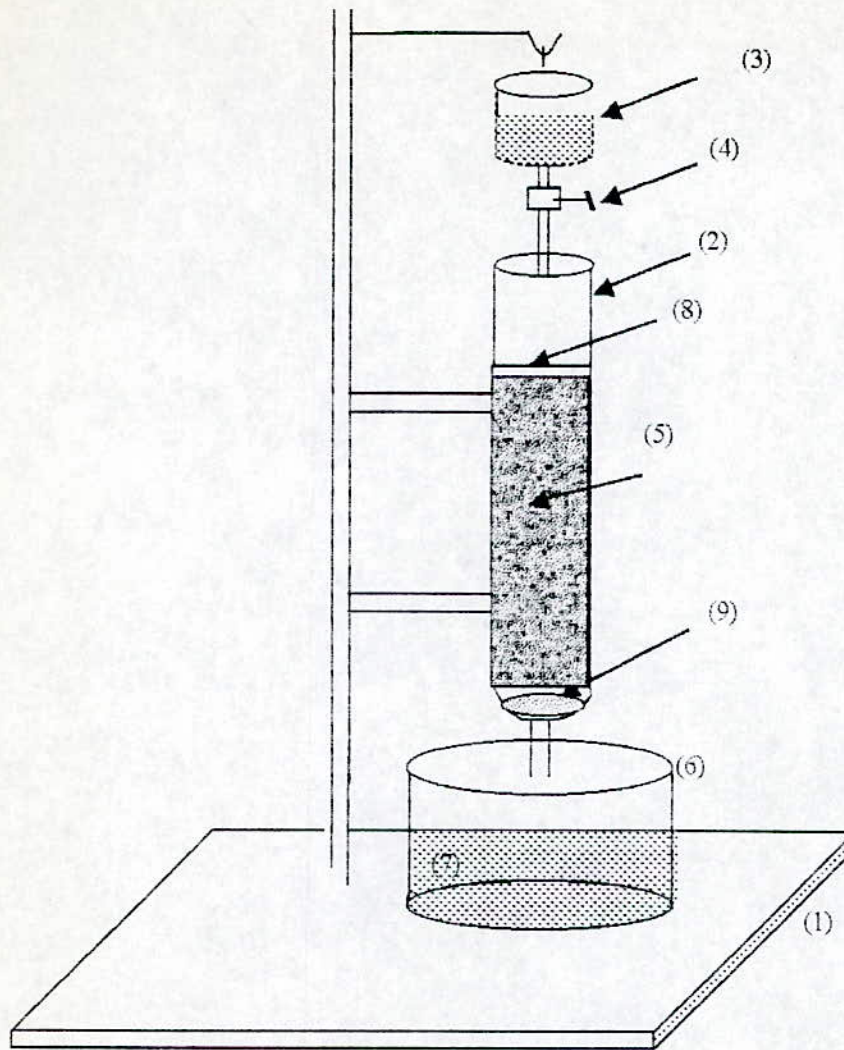


Schéma de préparation mécanique de l'échantillon de dépôt de surface pour lixiviation en tas (perfusion)



- (1) Support.
- (2) Colonne en verre de 35 mm de diamètre et de 400 mm de longueur.
- (3) Perfuseur médicale.
- (4) Bouton pressoir pour le réglage du débit.
- (5) Minerai d'or.
- (6) Becher.
- (7) Solvant (solution d'attaque NaCN).
- (8) Papier filtre.
- (9) Laine de verre.

Figure 13 : Schéma de la manipulation.

**4.1) Interprétation :**

On remarque que le maximum de la récupération est de 15,87 % pour une durée de rétention de 10 jours. Cette récupération nous indique que le laps du temps choisi est très insuffisant pour avoir des résultats acceptables (il faut au moins un mois de rétention ou plus). En ce que concerne l'influence de la concentration sur le temps de la récupération, on peut indiquer d'après le schéma, que la variation de la récupération est presque linéaire (11,8 ;12,40 ;13,64 ;15,87).

**Résultats des essais de cyanuration en colonne(perfusion):**

Durée de rétention(jour)	[NaCN] 0,3g/l		[NaCN] 0,5g/l		[NaCN] 0,7g/l		[NaCN] 1g/l	
	Concentration Au (g/t)	R(%)	Concentration Au (g/t)	R(%)	Concentration Au (g/t)	R(%)	Concentration Au (g/t)	R(%)
1	0,07	1,15	0,14	2,16	0,15	2,98	0,25	3,87
2	0,17	2,75	0,22	3,58	0,23	4,35	0,34	5,19
3	0,19	3,14	0,32	5,14	0,31	5,96	0,45	6,92
4	0,26	4,18	0,38	6,14	0,36	6,97	0,57	8,75
5	0,35	5,78	0,45	7,14	0,42	8,07	0,62	9,58
6	0,38	6,19	0,51	8,17	0,48	9,17	0,72	11,04
7	0,45	7,36	0,59	9,41	0,53	10,28	0,79	12,15
8	0,58	9,48	0,64	10,27	0,66	12,75	0,85	13,14
9	0,66	10,74	0,71	11,33	0,69	13,24	0,92	14,08
10	0,73	11,88	0,78	12,40	0,71	13,64	1,03	15,87
Teneur de Au dans le tout venant (g/t)	6,14		6,25		5,19		6,50	
Teneur de Au dans le stérile (g/t)	5,41		5,47		4,48		5,47	

Tableau 8 : Résultats des essais de lixiviation en tas (perfusion) .

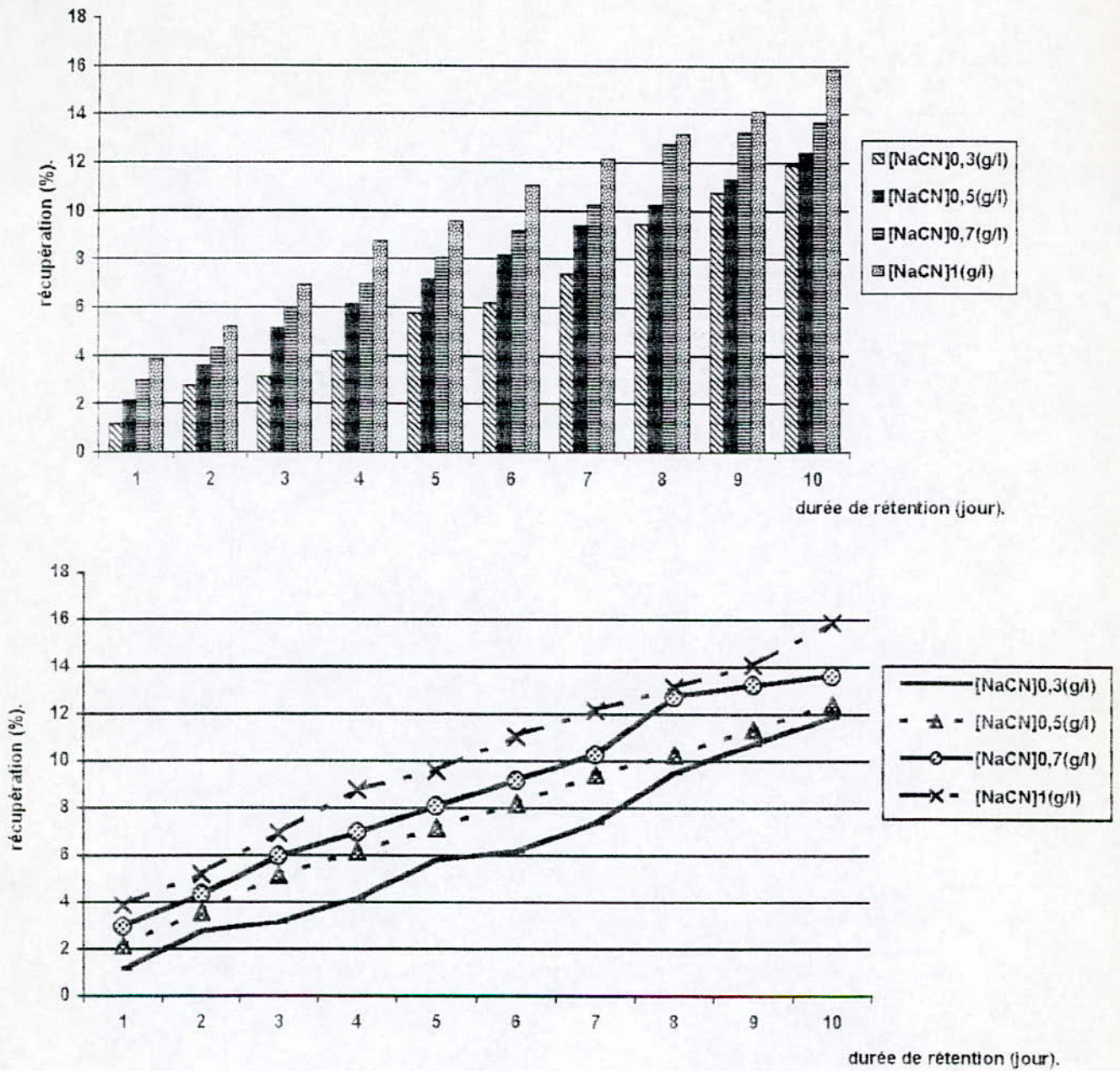


Figure 14 : influence de la durée de rétention sur la récupération de l'or (par perfusion)

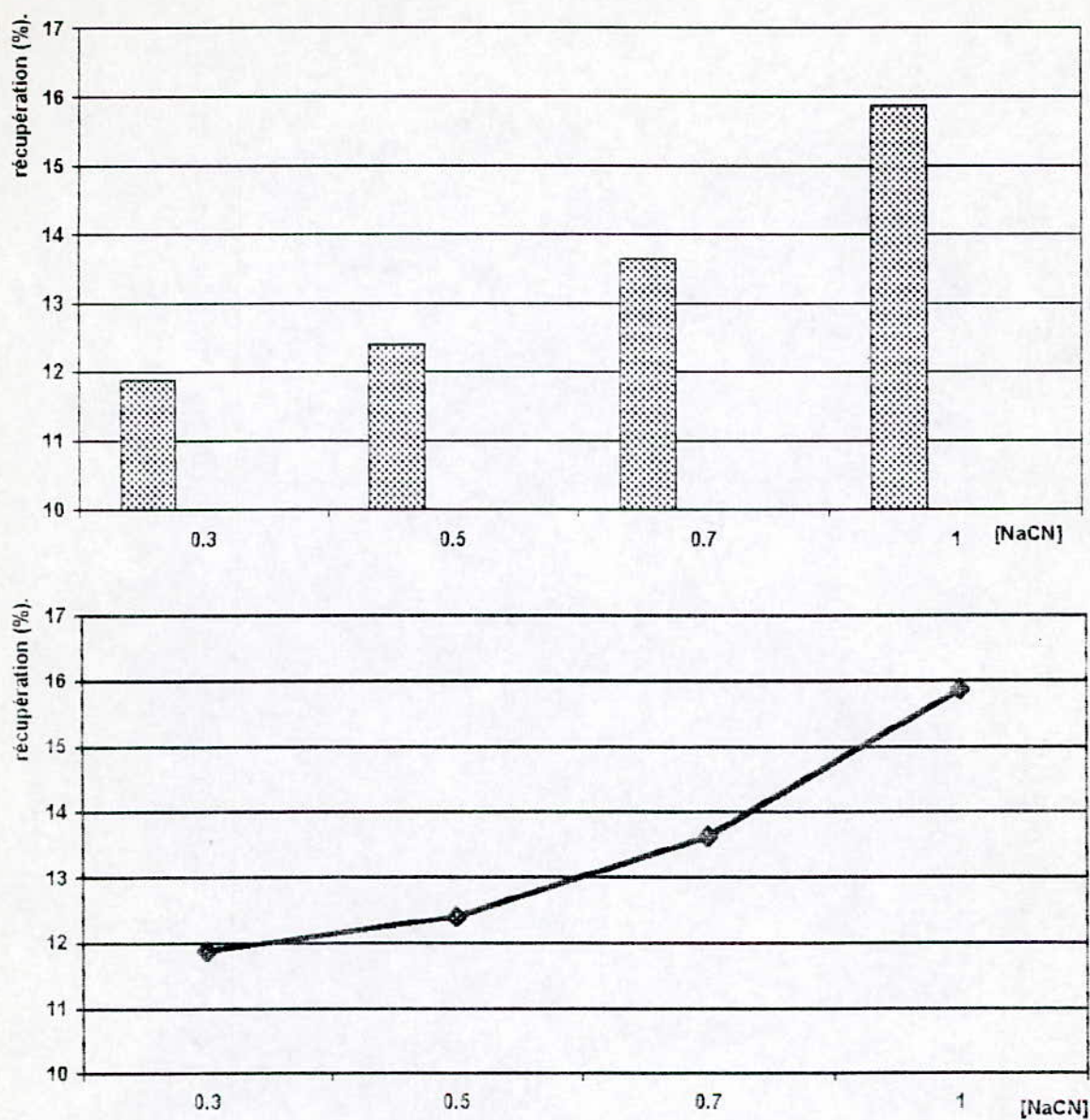


Figure 15 : influence de la concentration de cyanure sur la récupération de l'or.

Conditions fixées :

- Granulométrie : -5mm
- Durée de rétention : 10 jours.
- pH = [10,5-11].



*Conclusion*  
*Générale*

## **Conclusions et recommandations :**

Les essais de simulation d'une lixiviation cyanurée en tas ( sur colonnes ) du minerai d'or du gisement de TIREK (HOGGAR) se sont déroulés durant une période de deux mois et demi, ce qui explique le nombre restreint d'essais technologiques.

les essais ont porté sur la caractérisation, la préparation mécanique et sur différentes techniques de lixiviation, se complétant pour simuler une lixiviation en tas sur des échantillons de minerai provenant des filons et des dépôts de surface (éluvions).

Les minerais provenant du filon, ont fait l'objet d'essais de lixiviation agitée en cuves, complétant ceux de lixiviation cyanurée par percolation en colonnes.

les résultats retenus dans la lixiviation agitée sont les suivants :

Le minerai (filon), broyé à  $-0,074\text{mm}$ , lixivié avec un solvant de concentration  $1\text{g/l}$  ( $\text{NaCN}$ ), à la température et la pression ambiantes durant 30 heures, avec une consommation de chaux de  $500\text{g/l}$ , a donné un taux de récupération de l'or de  $98,89\%$  (tout-venant titrant :  $25,89\text{ g/t}$  ; concentration solution mère :  $25,58\text{ g/t}$  ).

l'oxygénation de la pulpe s'est faite à l'air libre et par agitation mécanique (agitation magnétique). Il n'y a pas eu d'ajout de réactif oxydant, permettant éventuellement d'améliorer le rendement d'extraction de l'or.

Dans une seconde étape, le minerai provenant des filons, a fait l'objet d'essais de percolation cyanurée dans des colonnes en verre, en adaptant une pompe péristaltique pour le recyclage des effluents, constituant ainsi un circuit fermé.

Les résultats retenus, dans le cadre de ces essais, sont les suivants :

Avec un minerai concassé à  $-5\text{mm}$ , titrant  $19,20\text{ g/t}$  d'or.

Lixivié par un solvant, ayant une concentration de  $0,7\text{ g/l}$  de  $\text{NaCN}$ , sous un pH de 10,5-11, avec un débit de  $4,8\text{ml/s}$ , avec une consommation de chaux de  $538,88\text{g/t}$  à la température et pression ambiantes, durant 15 jours, nous avons pu constater un taux de récupération d'or de  $47,29\%$ , c'est-à-dire une solution-mère renfermant  $9,08\text{ g/t}$  d'or.

Durant la lixiviation par percolation, nous avons disposé que de 3 grandes colonnes en verre et de 3 pompes péristaltiques ce qui explique, que nous ayons pris la décision d'utiliser les petites colonnes en verre pour le traitement par perfusion (ou percolation) cyanurée du minerai provenant de dépôt de surface (éluvions).

l'utilisation de perfuseurs médicaux nous a permis de réguler le débit 5 à 6 gouttes par seconde , afin de pratiquer une meilleure diffusion de solvant dans le minerai. les résultats, que nous avons retenus sont les suivants :

Avec un minerai, présentant une granulométrie de  $-5\text{mm}$ , avec 4 concentrations de solvant (NaCN) [0,3 ; 0,5 ; 0,7 ; 1 g/l], à la température et à la pression ambiantes, pour un pH :10,5-11, durant dix jours, nous avons obtenu la meilleure extraction, soit 14,08 (%) sur un minerai titrant 6,50 g/t d'or, pour une concentration de NaCN de 1 g/l, avec une consommation de chaux 403,80g/t.

Il ressort donc que ses résultats semblent perspectifs dans un premier temps, compte-tenu de la durée restreinte de chaque essai.

comme recommandations à faire, il faudrait que :

- ❖ La lixiviation agitée en cuve a été réalisée qu'au contact de l'air. Il faudrait choisir une gamme d'oxydants avec des concentrations différentes, pour aboutir au choix d'un oxydant ( $\text{KMnO}_4, \text{Cr}_2\text{O}_3, \dots$ ) et voir son influence sur le taux d'extraction. Après cela, utiliser cet oxydant dans la lixiviation en colonnes.
- ❖ Nous avons remarqué lors de la lixiviation par percolation en colonne, qu'il y avait un phénomène d'effritement et de tassement du minerai concassé, provoquant en partie un colmatage en bas de colonne. Pour résoudre ce problème, il faudrait prévoir dans la partie inférieure de la colonne deux couches de laine de verre entourant un bourrage de carbure de silicium.
- ❖ L'utilisation des pompes péristaltiques(annexe 3) a posé problème au niveau des débits constants de la solution lixiviante. Il fallait souvent changer les charbons au niveaux de rouleaux pressant les tuyaux et les détériorant. De plus, les pompes utilisées ne sont adaptées qu'à une seule sortie. Il faudrait choisir des pompes multi-sorties, afin d'alimenter plusieurs colonnes simultanément, et dans les mêmes conditions.
- ❖ Si on se réfère aux résultats obtenus, à l'évolution des courbes, nous suggérons que leur tendance croissante signifie qu'il faille poursuivre dans le temps ces essais(dans les mêmes conditions) durant une période allant jusqu'à 2 à 3 mois, lorsque nous remarquons que les courbes tendent à se stabiliser, l'essai est en principe terminé.

# Annexe

## 1) Caractérisation physique et physico-mécanique :

- Calcul de la masse volumique :

La masse volumique d'un corps est la masse de volume de corps, on distingue :

La masse volumique absolue et la masse apparente .

- La masse volumique absolue : c'est la masse de l'unité de volume absolu du corps, sans tenir compte du volume de vide .
- Tandis que pour la masse volumique apparente, on tient compte du volume des vides.

On s'intéresse à la masse volumique apparente ; pour la déterminer, on a utilisé la méthode de l'éprouvette graduée.

Principe :

- Mettre dans une éprouvette graduée un volume  $V_1$  d'eau.
- Poser une masse  $M$  du corps (de l'ordre de 300 g), et l'introduire dans l'éprouvette.
- Lire le nouveau volume  $V_2$ .
- Le volume absolu est  $V = V_2 - V_1$ .
- La masse volumique absolue :

$$\rho = M / V = 400 / 155 = 2,58$$

$$\rho = 2,58 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{pour l'échantillon filon})$$

$$\rho = 300 / 130 = 2,30$$

$$2,30 \text{ g/cm}^3 \quad (\text{pour l'échantillon dépôt de surface})$$

### 1.1) Calcul de la porosité :

Toutes les roches présentent, dans une proportion plus ou moins grande, des fissures ou des petits vides, qui renferment souvent l'eau ; on appelle porosité d'une roche, le volume des vides contenus dans l'unité de volume de matière.

#### Principe :

- ♦ Chasser tout le liquide et peser le matériau à sec.
- ♦ Remplir ces vides avec de l'eau.
- ♦ Une nouvelle pesée donnera le résultat recherché.

#### 1/ Préparation de l'échantillon :

- Quantité prélevée (environ kg).
- Pas de grains trop petits (au moins 10g).

#### 2/ Séchant l'échantillon :

- Porter lentement à 103 °C.
- L'y maintenir (thermostat) jusqu'à masse constante.

#### 3/Peser l'échantillon sec :

- Soit  $M_0$ .

#### 4/ Remplir les pores d'eau :

- Placer l'échantillon dans l'eau froide et porter à ébullition.
- Maintenir l'ébullition pendant deux heures, pour chasser l'air des pores.
- Laisser refroidir dans l'eau, pour que l'eau rentre dans les pores.

#### 5/ Peser à nouveau :

- Auparavant, retirer de l'eau et essuyer chaque grain (chiffon).
- Nouvelle masse  $M_1$ .

6/ En déduire la porosité :

$$p(\%) = \frac{\text{volumes des vides}}{\text{volumes des matières}} \times 100$$

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

$$p(\%) = \frac{M_1 - M_0}{V} =$$

$$= \frac{(663.8 - 662.5) \times 2.58}{662.5} \times 100 = 0.506\%$$

$$p(\%) = 0.506$$

pour l'échantillon de filon.

$$p(\%) = \frac{(723.7 - 720.7) \times 2.3}{720.7} \times 100 = 0.957\%$$

$$p(\%) = 0.957$$

pour l'échantillon de dépôt de surface.

## 1.2) Calcul du taux d'humidité :

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

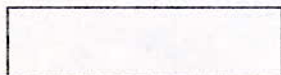
$$T(\%) = \frac{M_1 - M_0}{M_1} \times 100$$

on procède de la manière suivante :

- Nous séchons l'échantillon de masse  $M_1$  à la température  $T_0 = 103 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Nous pesons notre échantillon après deux heures de séchage, nous obtenons une nouvelle masse  $M_0$ , on calcul le taux d'humidité.

$$M_0 = 1017,6\text{g}$$

$$M_1 = 1017.2\text{g}$$



$T(\%)=0.039\%$  pour l'échantillon de filon.

$M_0 = 1001.0\text{g}$

$M_1 = 1000.9\text{g}$

$T(\%)=0.01\%$

pour l'échantillon de dépôt de surface.

### 1.3) Calcul de la surface spécifique :

Elle a été déterminée au niveau du laboratoire de génie civil. A cet effet, nous avons utilisé l'appareil de Blaine qui se compose essentiellement d'une cellule en métal inoxydable, ainsi qu'un manomètre en verre en forme de U, l'appareil est étalonné avec une poudre étalon de surface spécifique et de masse volumique connues.

La masse spécifique est la surface spécifique exprimée en centimètre par gramme de monture.

Ce que nous mesurons, est le temps que met l'air à travers la cartouche de poudre tassée, pour que le niveau d'un liquide non volatil de faible densité, préalablement en dépression jusqu'à un repère supérieur de tube manométrique redescend jusqu'au niveau d'un repère inférieur de ce tube.

La surface spécifique se calcule par la formule suivante :

$$S_s = \frac{0.354 \times K \times \sqrt{t}}{0.5 \times \rho \times \sqrt{\eta}}$$

avec :

$$K = 11.8011$$

$$\eta = 1798 \cdot 10^{-7}$$

$$\rho = 2,58 \text{ g/cm}^3$$

$$t = 340 \text{ s}$$

donc :



nous trouvons 
$$S_s = \frac{0,354 \times 11,8011 \times \sqrt{340}}{0,5 \times 2,58 \times \sqrt{1798 \times 10^{-7}}} = 4453,28 \text{ cm}^2/\text{g}.$$

#### 1.4) Mesure de la dureté:

La dureté est définie par la résistance d'un minéral à la rayure ou à l'abrasion.

Elle dépend de la structure cristalline et des forces de liaison entre les atomes. Dans l'échelle de MOHS chaque minéral raye le précédent et il est rayé par le suivant :

<i>Minéral</i>	Talc	Gypse	Calcite	Fluorite	Apatite	Orthose	Quartz	Topaze	Corindon	Diamant
<i>Dureté</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Pour notre échantillon (le Quartz) sa dureté sur cette échelle –comme l'indique le tableau- est de 7, donc, il raye l'Orthose, et il est rayé par le Topaze.

## 1) Analyse des solutions aurocyanurées par absorption atomique :

La méthode d'absorption atomique est très utilisée dans le domaine industriel pour résoudre les problèmes d'analyses chimiques, elle est rapide et efficace.

### 1.1) Principe de l'analyse par absorption :

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 analysé.

### 1.2) Constitution de l'appareil :

L'appareil est constitué de trois parties essentielles :

- 1) partie émission.
- 2) Partie absorption.
- 3) Partie détection.

#### 1.2.1) Partie émission :

C'est souvent une lampe à cathode creuse, dont la nature varie suivant l'élément à doser ; elle est constituée d'une cathode cylindrique recouverte de l'élément recherché (exemple : or, argent, cuivre,...), d'une tige métallique, appelée anode et d'un gaz de remplissage (gaz rare, néon ou argon (inerte : dernière couche est saturée)).

Fonctionnement de la lampe : le passage du courant (chaque élément a sa propre intensité) provoque le départ de la surface de la cathode des atomes métalliques qui deviennent excités après collision avec les ions de néon ou d'argon, et émettent la radiation caractéristique dans la direction de la flamme par retour au niveau fondamental.

## Bibliographie

- [1] "annales des mines", revue mensuelle des industries extractives, décembre 1969.
- [2] J. LIBAUDE, "le traitement des minerais d'or", paru dans la revue "LA RECHERCHE" de mai 1994.
- [3] (SONAREM) : "Rapport géologique concernant les travaux de recherche exécutés pendant la campagne 1773/1974 dans la région de Tirek et In ouzzel".
- [4] (E.RE.M) : "Rapport sur les résultats des études complémentaires menées sur le gisement aurifère de Tirek avec évaluation des réserves à l'état de 1/8/1987".
- [5] (E.N.O.R) : prospectus "projets Or Tirek Amesmessa 2000".
- [6] (EDEMINES) : "étude de faisabilité pour la mise en exploitation du gisement aurifère de Tirek", 1986.
- [7] (LMBOS-SIDAM) : "Projet Tirek : étude de pré-faisabilité" Tome I, 1985.
- [8] (P.PASCAL) : Nouveau traité de chimie minérale  
Tome III or – Masson 1954.
- [9] HELEY K.J : "Gold ore mineralogy and its relation to metallurgical treatment"  
Minerals sc. Eng. Oct. 1975.
- [10] E.MICHEL : "Metallurgie de l'or".  
Techniques de l'ingénieur M.2280 : 19930.
- [11] A.M GAUDIN : "Flottation".  
MC Graw hill 1957.
- [12] E.DELORME et J. TROUVE: "Enrichissement des minéraux par gravité".  
Revue Ind. Min. Mars 1979.
- [13] J.V DORR, F.L BOSQUI : "Cyanuration and concentration of gold and silvers ores"  
Elsiver Publ. Co LTD. London 1965.
- [14] F. FARID ABSI, "Valorisation des minerais d'or d'Amesmessa "hoggar" (Algerie)",  
mémoire de magister E.N.P 1994
- [15] F. BENAOUICHA: "Lixiviation par percolation du minerai d'Uranium d'Abankor  
(Ahaggar, Algerie)", mémoire d'ingénieur E.N.P 1997.
- [16] N. GUERROUMI : "Aptitude du minerai aurifère du gisement de Boudouaou à la  
cyanuration en tas", mémoire d'ingénieur E.N.P 1989.
- [17] PUBLICATION DE LA SOCIETE DE L'INDUSTRIE MINERALE. Les techniques,  
Industrie minérale, mines et carrières. Mars 1987.
- [18] G. BARSKY, S.J SWASSON et N. HEDLEY. "dissolution of gold and silver in  
cyanide solution", Eng. Trans . Am. Inst. – 1934.

## Pompes péristaltiques MULTIFIX Modèles MINI-Z et SUPRA

Ces pompes péristaltiques à entrefer réglables s'adaptent sur des tuyaux d'épaisseurs variables. Leurs tailles et leurs débits les rendent aptes à bien des travaux spéciaux pour les quels les pompes classiques sont moins commodes ou moins adaptées.

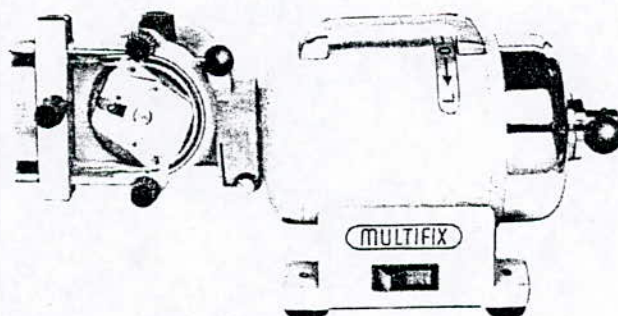
Elles conviennent pour pomper tous les liquides et les gaz compatibles avec la matière de tuyaux souples. Auto-amorçante, elles peuvent aspirer ou refouler, et fonctionner dans les deux sens de rotation. La hauteur d'aspiration peut aller jusqu'à 4 m d'eau, la pression au refoulement jusqu'à 1 bar, sous réserve de l'emploi de tuyaux de résistances convenables.

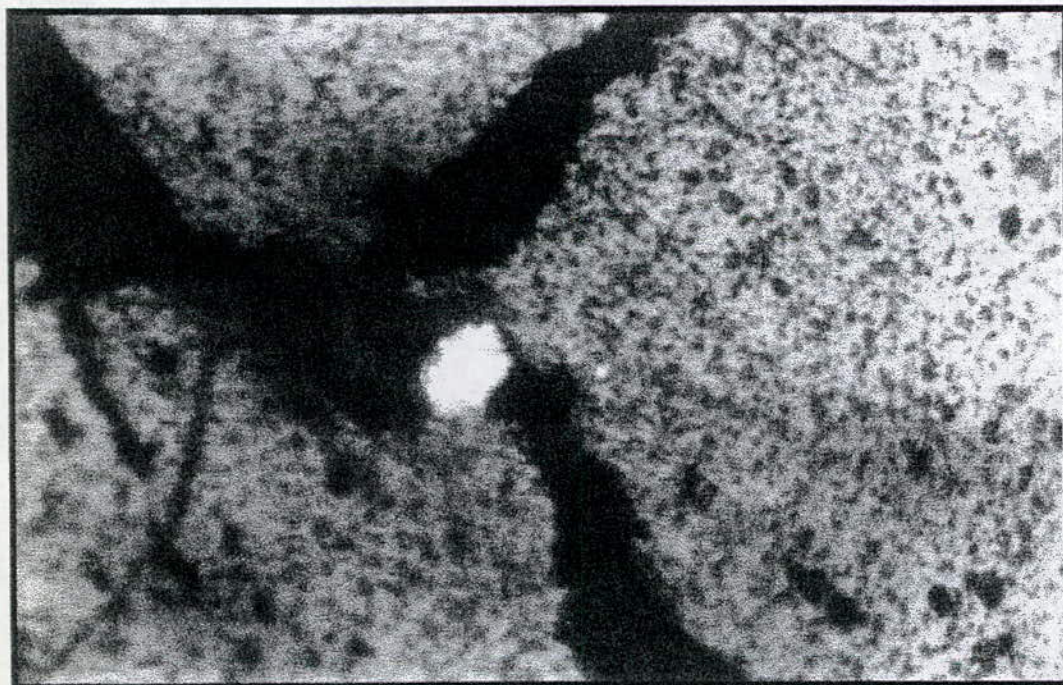
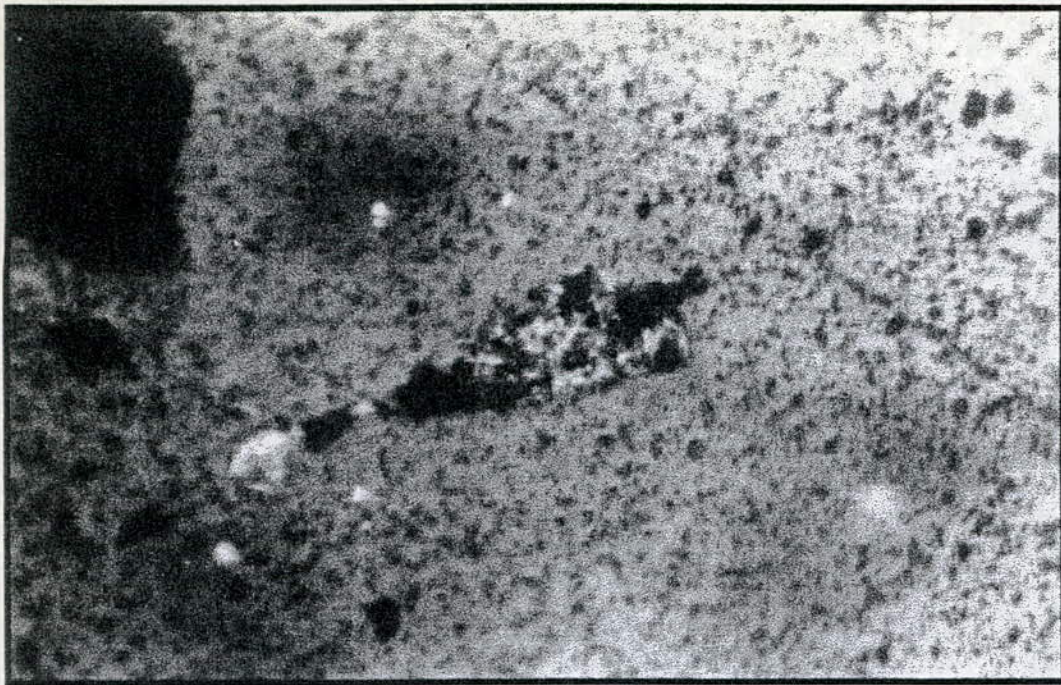
### Pompes MINI-Z de 0,15 à 40 l/h fonctionnant avec les moteurs MULTIFIX normaux

La pompe reçoit un tuyau de diamètre extérieur maximum de 6 mm. L'épaisseur du tuyau peut être variable, car les rouleaux sont réglables en tournant une roue moletée. Le montage se fait sur l'un des moteurs MULTIFIX classiques des types M 80, MC 1000, ou à air comprimé, en interposant un réducteur 1/11 de manière à obtenir une grande souplesse de réglage dans le domaine des vitesses de la pompe, soit **0 à 650 tr/min.**

selon le diamètre intérieur du tuyau, les débits suivants sont réalisés:

∅ Int.	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm
Débit	0,15 à 3,3 l/h	0,42 à 11 l/h	1,2 à 29 l/h	2,5 à 40 l/h





**Figure : L'or dans des sections polies**

## الملخص :

الهدف من هذه الدراسة هو القيام بتجربة فصل الذهب من عينة جلبت من خام تيراك (الهوقار) و ذلك بمهاجمته بمحلول السيانور (المهاجمة السيانورية التراكمية) و لهذا قمنا بعدة عمليات (تحديد خاصياته، تحضيره ميكانيكيا، و أخيرا إخضاعه لتقنيات المهاجمة بالسيانور.

و قد كانت النتائج المتحصل عليها جد مشجعة و ذلك بالنظر إلى قصر مدة التجارب. الكلمات المفتاح : التحليل بالسيانور، معدن، عرق، المهاجمة السيانورية التراكمية، المهاجمة السيانورية داخل حوض.

## Résumé :

L'objet de cette étude apportée sur des essais de simulation d'une lixiviation en tas (sur colonnes) au cyanure de sodium du minerai d'or de TIREK (HOGGAR).

Les essais ont porté sur la caractérisation, la préparation mécanique et sur différentes techniques de lixiviation, se complémentarisant pour simuler une lixiviation en tas sur des échantillons du minerai provenant des filons et des dépôts de surface (éluvions).

Il ressort que les résultats semblent perspectifs dans un premier temps, compte-tenu de la durée restreinte de chaque essai.

Les mots clés : lixiviation , lixiviation cyanurée, minerai, filon, cyanuration en tas, cyanuration en cuve, éluvions.

## Summary :

The aim of this subject is to undertake tests of heap leaching (on column) with cyanid sodium of the ore of gold of TIREK (HOGGAR).

The Tests are focused on the characterization and the mechanical preparation on different techniques of leaching, complémentarised to simulate a heap leaching on samples of the ore coming from veins and deposits of surface (eluvions).

It can be show that results seem to be perspective in a first time, in regards with the latest restreinte of each test.

Key words : leaching, leaching cyanicide, ore, vein, cyanuration in heap, cyanuration in vat, eluvions.