



Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté de Technologie
Département des Mines et Géologie

Memoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Mines
Option : Valorisation des Ressources Minérales

Présenté par

M^{elle} **BENIDIR YASMINE**

M^{elle} **GUENDOUZE SELMA**

Thème

***Caractérisation physico-chimique et capacité
d'adsorption du charbon actif dans l'industrie
aurifère
-Cas de la mine d'Amesmessa-***

Soutenu le 23 /09 /2020 devant le jury composé de :

Président :	A.DJEMA	M.C.B	U.A.M.B
Promotrice :	Z.SOUICI	M.C.B	U.A.M.B
Examineur :	A.AKDIM	M.A.A	U.A.M.B
Co-Promoteur :	M.LOUZ	Ingénieur	E.N.O.R

Année Universitaire : 2019-2020

Remerciements

Ce travail n'aurait pas pu aboutir sans l'aide de nombreuses personnes. La première personne que nous tenons à remercier est notre promotrice Mme SOUCI.Z, maître de conférences à l'université de Bejaia pour l'orientation, la confiance, la patience et le sourire qui ont constitué un apport considérable.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements aux membres de jury pour avoir accepté d'examiner notre travail, à tous les enseignants qui par leurs compétences nous ont orientés et encouragés durant nos années d'études.

Nous avons l'honneur et le plaisir de présenter notre gratitude et nos sincères remerciements à notre Co-encadreur Mr LOUZ.M directeur des opérations à l'ENOR sans lequel, ce travail n'aurait pas pu être mené à bon port, pour ses bonnes explications qui nous ont éclairé le chemin de la recherche et sa collaboration afin d'achever ce modeste travail. Qu'il trouve dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

Nous remercions ainsi tout le personnel de l'ENOR sans exception et en particulier Mr OUZNANI.M, chef service de laboratoire pour sa grande culture scientifique et sa disponibilité.

Nous remercions aussi l'ensemble du personnel du département des mines et géologie, Université de Bejaia.

Enfin, nous remercions tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Merci 

dedicace



Avant tout, je rends grâce à Dieu le tout-puissant qui m'a donné la force et le courage pour terminer ce modeste travail dans les meilleures conditions.

Je dédie ce mémoire à :

- ♣ La mémoire de mes grands-parents qui ont toujours rêvé de me voir réussir, que Dieu les accueillent dans son vaste paradis ;
- ♣ Ma chère mère ainsi que mon cher père pour leur sacrifice et leur soutien, je leur serai éternellement reconnaissante. Que Dieu les protège pour moi ;
- ♣ Mon frère ainsi que mes sœurs ;
- ♣ Mes tantes et mes oncles paternels et maternels ;
- ♣ Ma meilleure amie FERIEL ;
- ♣ Mon binôme YASMINE ainsi que toute sa famille qui a été la mienne durant ce travail ;
- ♣ Tous ceux qui m'ont soutenu à réaliser ce modeste travail en particulier YOUSEF !

Selma !



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me comble. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A mes deux frères ADEL et MASSI qui sont mes deux piliers dans cette vie je suis reconnaissante de votre amour.

A mes chères sœurs OUAHIBA , SABIHA , SOUAD, ASSIA ET MIRA pour leur affection, compréhension et patience.

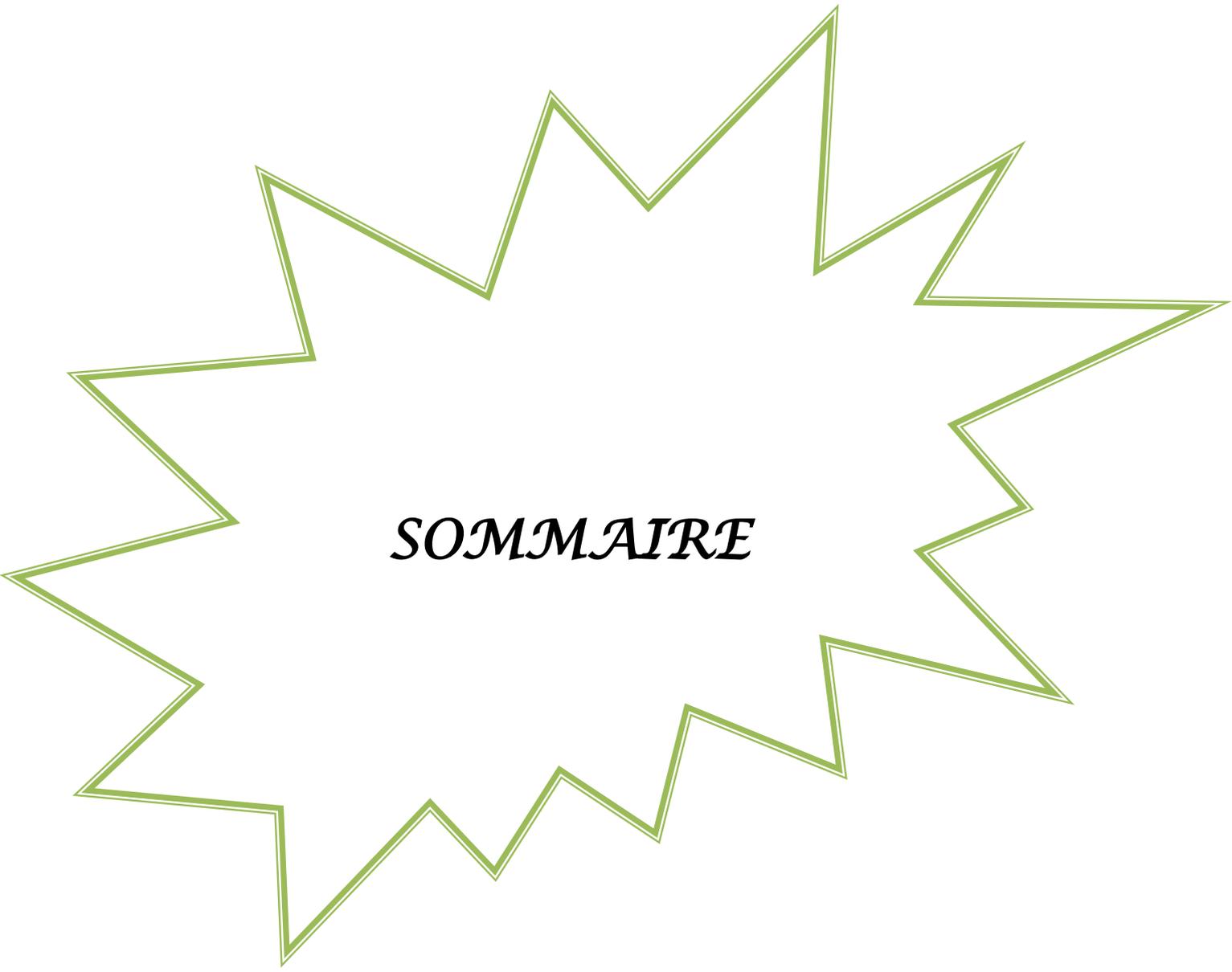
A ma belle sœur SARAH et mes beaux-frères NABIL ,KAREM ,WAHID ,SOFIANE, ELHACHEMI.

Aux anges de la famille mes chérés nièces Zouza ,Imene, Ryma,Dina ,Sarah Jana ,Rahma, Houda ,Darine, Aya ET Nilya ainsi mes neveux Yacine , Malek , younes, samy, amir ,dilane.

Une spéciale dédicace pour mes amis (es): Dounia, Amel , Walid ,Zouhir, chaima,khadidja,yanis.

Mon binôme SELMA ainsi que toute sa famille en particulier Tata Ourida qui a été la pour nous soutenir dans ce travail par son sourire et ses petites attentions.

À tous ceux qui ont aimé, aidé ou seulement connu YASMINE.



SOMMAIRE

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale

Chapitre I : Généralités sur le charbon actif.

INTRODUCTION.....	03
I.1. DEFINITIONS	03
I.1.1. L'adsorption.....	03
I.1.2. Adsorbants	03
I.1.3. Adsorbats	04
I.2. LE CHARBON ACTIF	04
I.2.1. Définition du charbon actif	04
I.2.2. Les propriétés du charbon actif.....	04
I.2.3. Types du charbon actif.....	08
I.3. PROCÉDES DE FABRICATION DU CHARBON ACTIF.....	10
I.3.1. Carbonisation.....	12
I.3.2. Activation	12
I.4. REGENERATION DU CHARBON ACTIF.....	13
I.5. UTILISATIONS DU CHARBON ACTIF	13
I.6. PHÉNOMÈNE D'ADSORPTION	14
I.6.1. Principe	14
I.6.2. Les types d'adsorptions	14
I.6.3. Mécanisme d'adsorption.....	15
I.6.4. Capacité d'adsorption.....	16
I.7. L'ADSORPTION DE L'OR (L'ION DICYANORATE) PAR LE CHARBON ACTIF .	17
I.7.1. Charbons en pulpe (CIP.....	17
I.7.2. Charbons en lixiviats (CIL.....	17
I.7.3. Charbons en colonne (CIC.....	17
I.8. LA DESORPTION DE L'ION DICYANOAUATE.....	19
CONCLUSION	19

SOMMAIRE

Chapitre II : Protocole opératoire et analyses

INTRODUCTION.....	20
II.1. PREPARATION MECANIQUE DU MINERAI	20
II.2. DETERMINATION DE LA TENEUR EN OR PAR SAA.....	25
II.3. ESSAIS DE LA LIXIVIATION DYNAMIQUE DU MINERAI EN BOUTEILLES ROULANTES	25
II.4. DETERMINATION DE CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU CHARBON ACTIF (VIERGE, CHARGE ET DESORBE).....	25
II.4.1. L'analyse granulométrique.....	25
II.4.2. Détermination du taux d'humidité	27
II.4.3. Détermination du taux de cendre	27
II.4.4. Détermination de la résistance à l'abrasion (la dureté ou taux de Hardness) et du taux de friabilité	28
II.4.5. Détermination de la densité apparente	29
II.4.6. Détermination du Ph	29
II.4.7. Détermination de la porosité apparente.....	30
II.4.8. Test d'adsorption par charbon actif vierge et désorbé	30
CONCLUSION	32

Chapitre III : Résultats et discussions

INTRODUCTION.....	33
<i><u>1^{ère} PARTIE : La lixiviation du minerai aurifère</u></i>	
III.1. ESSAIS DE LIXIVIATION EN BOUTEILLES ROULANTES.....	33
<i><u>2^{ème} PARTIE : Caractérisation physico-chimique du charbon actif</u></i>	
III.2. ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES DU CHARBON ACTIF (VIERGE, CHARGE ET DESORBE)	36
III.2.1. L'analyse granulométrique	36
III.2.2. Analyse de la teneur en Or.....	39
III.2.3. Le taux d'humidité.....	40
III.2.4. Le taux de la cendre.....	40
III.2.5. La résistance à l'abrasion (la dureté ou Hardness) et le taux de friabilité.....	41
III.2.6. La densité apparente	42
III.2.7. Le Ph.....	42

SOMMAIRE

III.2.8. La porosité apparente.....	43
<i>3^{ème} PARTIE : Capacité d'adsorption du charbon actif</i>	
III.3. CAPACITE D'ADSORPTION DU CHARBON ACTIF VERGE	46
III.3.1. Capacité d'adsorption du charbon actif vierge en solution aurifère synthétique....	46
III.3.2. Capacité d'adsorption du charbon actif vierge en solution aurifère réelle	49
III.3.3. Capacité d'adsorption du charbon actif vierge en pulpe	51
III.4. CAPACITE D'ADSORPTION DU CHARBON ACTIF DESORBE	54
III.4.1. Capacité d'adsorption du charbon actif désorbé en solution aurifère synthétique .	54
III.5. ETUDE COMPARATIVE DE LA CAPACITE D'ADSORPTION DE L'OR PAR LE CHARBON ACTIF VIERGE ET UTILISE	56
CONCLUSION	57
<i>Conclusion générale</i>	
<i>Références bibliographiques</i>	
<i>Annexes</i>	
<i>Résumé</i>	



*LISTE DES
ABREVIATIONS*

LISTE DES ABREVIATIONS

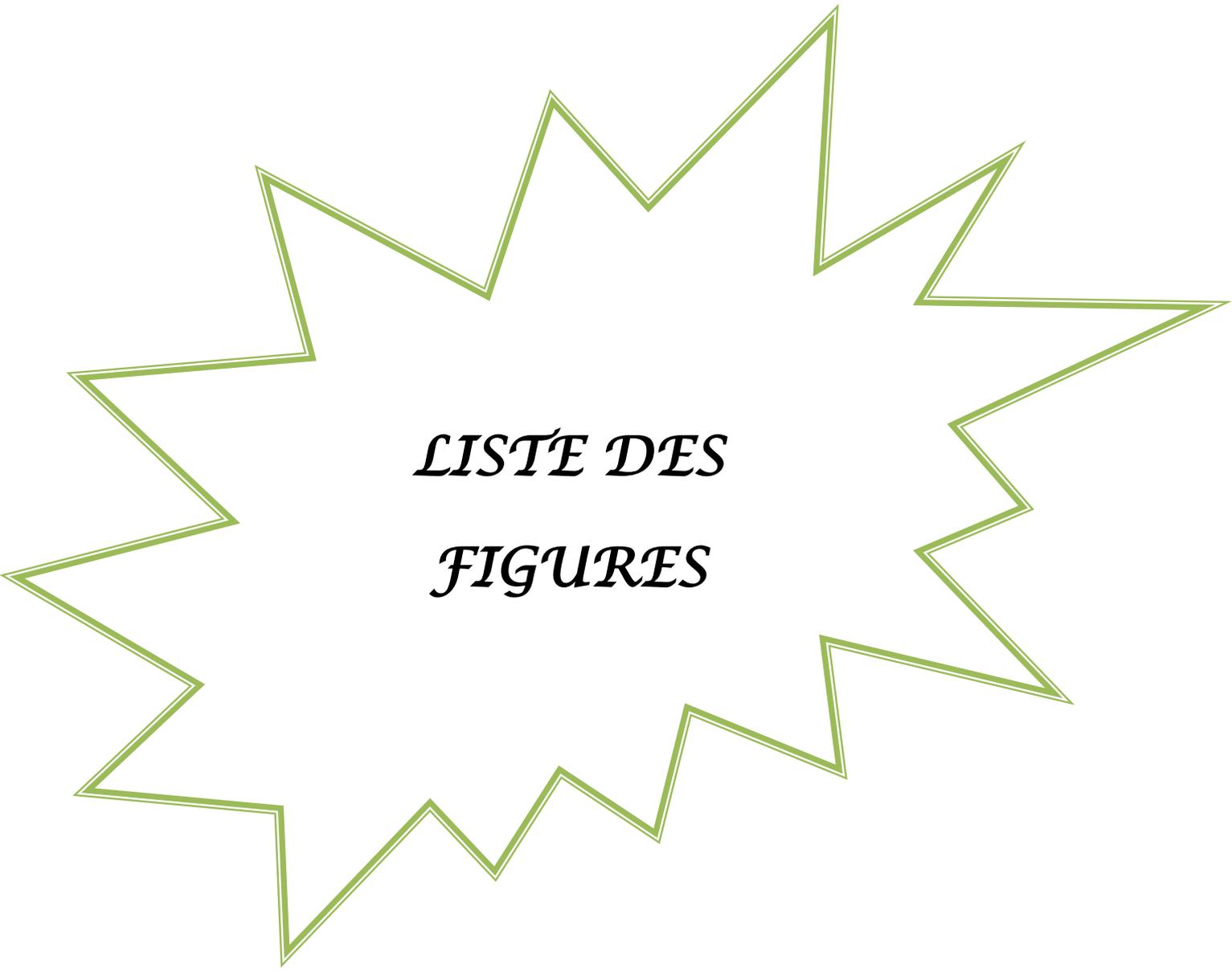
<i>CHAPITRE I</i>	
<i>Abréviation</i>	<i>Synonyme</i>
CEFIC	<i>Conseil Européen des Fédérations de l'Industrie Chimique.</i>
CA	<i>Charbon Actif.</i>
S_{mi}	<i>Surface Microporeuse.</i>
W₀	<i>Volume des Micropores.</i>
L	<i>Largeur Moyenne des Pores.</i>
Se	<i>Surface Externe des Parois Microporeuses et Macroporeuse.</i>
CAP	<i>Charbon Actif en Poudre.</i>
CAG	<i>Charbon Actif en Grain.</i>
CAE	<i>Charbon Actif en Extrude.</i>
FCA	<i>Filtre à Charbon Actif.</i>
ppm	<i>Partie Par Million.</i>
Q	<i>Capacité d'Adsorption.</i>
C₀	<i>Concentration Initiale.</i>
C_t	<i>Concentration à l'instant (t).</i>
V	<i>Volume.</i>
m	<i>Masse.</i>
pH	<i>Potentiel d'Hydrogène.</i>
CIP	<i>Charbon En Pulpe.</i>
CIL	<i>Charbon En Lixiviat.</i>
CIC	<i>Charbon En Colonne.</i>
Au	<i>L'Or.</i>
NaOH	<i>Hydroxyde de Sodium (Soude Caustique).</i>
NaCN	<i>Cyanure de Sodium.</i>

LISTE DES ABREVIATIONS

CHAPITRE II	
<i>Abréviation</i>	<i>Synonyme</i>
FeS	<i>Pyrite.</i>
CuFeS₂	<i>Chalcopyrite.</i>
PbS	<i>Galène.</i>
SAA	<i>Spectroscopie d'Adsorption Atomique.</i>
DRX	<i>Diffraction des Rayons X.</i>
ENOR	<i>Entreprise Nationale d'exploitation des mines d'OR.</i>
R%	<i>Redus Pondéral.</i>
Pi	<i>Masse Du Refus de Tamis(i).</i>
∑Pi	<i>Somme Des Refus.</i>
Rc%	<i>Refus Cumulé.</i>
Tc%	<i>Tamisats Cumulé.</i>
Cu	<i>Coefficient d'Uniformité.</i>
Cc	<i>Coefficient de Courbure.</i>
%H	<i>Taux d'Humidité.</i>
%T	<i>Taux de Cendre.</i>
%TH	<i>Taux de Hardness.</i>
%TF	<i>Taux de Friabilité.</i>
ρ	<i>Densité Apparente.</i>
HCN	<i>Cyanure d'Hydrogène.</i>
T°	<i>Température.</i>
°C	<i>Degré Celsius.</i>
Vp	<i>Volume des Pores.</i>
Vt	<i>Volume Total.</i>
Vch	<i>Volume du Charbon.</i>
CAui	<i>La Teneur en Or Initiale.</i>
CAuf	<i>La Teneur en Or Finale.</i>
CAu	<i>La Teneur en Or.</i>
CAu (ch)	<i>La Teneur en Or dans le Charbon.</i>
Qte	<i>Quantité.</i>

LISTE DES ABREVIATIONS

<i>CHAPITRE III</i>	
<i>Abréviation</i>	<i>Synonyme</i>
AuCN	<i>Complexe Auro-Cyanure.</i>
AFNOR	<i>Association Française de NORmalisation.</i>
Dm	<i>Diamètre Moyen.</i>
ASTM	<i>American Standart Test Method.</i>



*LISTE DES
FIGURES*

LISTE DES FIGURES

<i>CHAPITRE I</i>		
<i>Figure</i>	<i>Titre</i>	<i>Pages</i>
<i>Figure I.1</i>	Schéma explicatif de l'adsorption et de la désorption	<i>04</i>
<i>Figure I.2</i>	Structure du charbon actif vu sous un microscope électronique.	<i>05</i>
<i>Figure I.3</i>	Structure cristallographique du CA et représentation schématique de sa structure poreuse plane.	<i>05</i>
<i>Figure I.4</i>	Représentation schématique de la microstructure du CA.	<i>06</i>
<i>Figure I.5</i>	Représentation schématique de la surface interne et externe d'un charbon actif.	<i>07</i>
<i>Figure I.6</i>	Structure poreuse du charbon actif.	<i>07</i>
<i>Figure I.7</i>	Les Groupements de surface du CA.	<i>08</i>
<i>Figure I.8</i>	Charbon actif en poudre (CAP).	<i>08</i>
<i>Figure I.9</i>	Charbon actif en grain (CAG).	<i>09</i>
<i>Figure I.10</i>	Charbon actif en extrude (CAE).	<i>09</i>
<i>Figure I.11</i>	Représentation du principe de fabrication des CA.	<i>11</i>
<i>Figure I.12</i>	Représentation bidimensionnelle de l'activation du charbon.	<i>12</i>
<i>Figure I.13</i>	Phénomène d'adsorption.	<i>14</i>
<i>Figure I.14</i>	Schéma du mécanisme de transport d'un adsorbat au sein d'un grain.	<i>16</i>
<i>Figure I.15</i>	Flow sheet de traitement du minerai d'or.	<i>18</i>

LISTE DES FIGURES

<i>CHAPITRE II</i>		
<i>Figure</i>	<i>Titre</i>	<i>Pages</i>
<i>Figure II.1</i>	Photo prise sur le lieu d'échantillonnage, minerai aurifère du filon 08.	<i>20</i>
<i>Figure II.2</i>	Roches réduites.	<i>21</i>
<i>Figure II.3</i>	Minerai concassé.	<i>21</i>
<i>Figure II.4</i>	Opération d'homogénéisation par le diviseur à riffles.	<i>22</i>
<i>Figure II.5</i>	Pulvérisateur du laboratoire d'Amesmassa.	<i>22</i>
<i>Figure II.6</i>	Tamiseuse du laboratoire d'Amesmassa.	<i>22</i>
<i>Figure II.7</i>	Mélangeur d'échantillons.	<i>23</i>
<i>Figure II.8</i>	Ouverture du mélangeur d'échantillons.	<i>23</i>
<i>Figure II.9</i>	Quartage du minerai après broyage.	<i>24</i>
<i>Figure II.10</i>	Sélection de deux quarts opposés.	<i>24</i>
<i>Figure II.11</i>	Schéma de la préparation mécanique du minerai.	<i>24</i>
<i>Figure II.12</i>	Echantillons de charbon actif dans l'étuve.	<i>27</i>
<i>Figure II.13</i>	Elimination de la cendre.	<i>28</i>
<i>Figure II.14</i>	pH-mètre du laboratoire d'Amesmassa.	<i>29</i>
<i>Figure II.15</i>	Essai de la porosité apparente.	<i>30</i>
<i>Figure II.16</i>	Préparation de la solution aurifère.	<i>31</i>

LISTE DES FIGURES

<i>CHAPITRE III</i>		
<i>Figure</i>	<i>Titre</i>	<i>Pages</i>
<i>Figure III.1</i>	Comparaison des évolutions du taux de lixiviation des 03 essais en fonction du temps de séjours.	35
<i>Figure III.2</i>	Distribution granulométrique du charbon actif vierge en fonction du diamètre moyen des tamis.	37
<i>Figure III.3</i>	Distribution granulométrique du charbon actif chargé en fonction du diamètre moyen des tamis.	37
<i>Figure III.4</i>	Distribution granulométrique du charbon actif désorbé en fonction du diamètre moyen des tamis.	38
<i>Figure III.5</i>	Variations du taux d'adsorption en fonction du temps de séjours enregistrées dans le cas du charbon vierge dans une solution aurifère synthétique à différentes concentrations.	48
<i>Figure III.6</i>	Variation du taux d'adsorption en fonction du temps de séjours dans le cas d'un charbon vierge dans une solution aurifère réelle à plusieurs concentrations.	51
<i>Figure III.7</i>	Variation du taux d'adsorption en fonction du temps -cas d'un charbon vierge dans une pulpe-.	53
<i>Figure III.8</i>	Comparaison des taux d'adsorption du charbon actif en pulpe et en solution réelle en fonction du temps.	53
<i>Figure III.9</i>	Variation du taux d'adsorption du charbon désorbé en solution synthétique à différentes concentrations en fonction du temps.	56
<i>Figure III.10</i>	Comparaison entre la capacité d'adsorption du charbon vierge et charbon désorbé en fonction des concentrations de solutions synthétiques étudiées.	57



***LISTE DES
TABLEAUX***

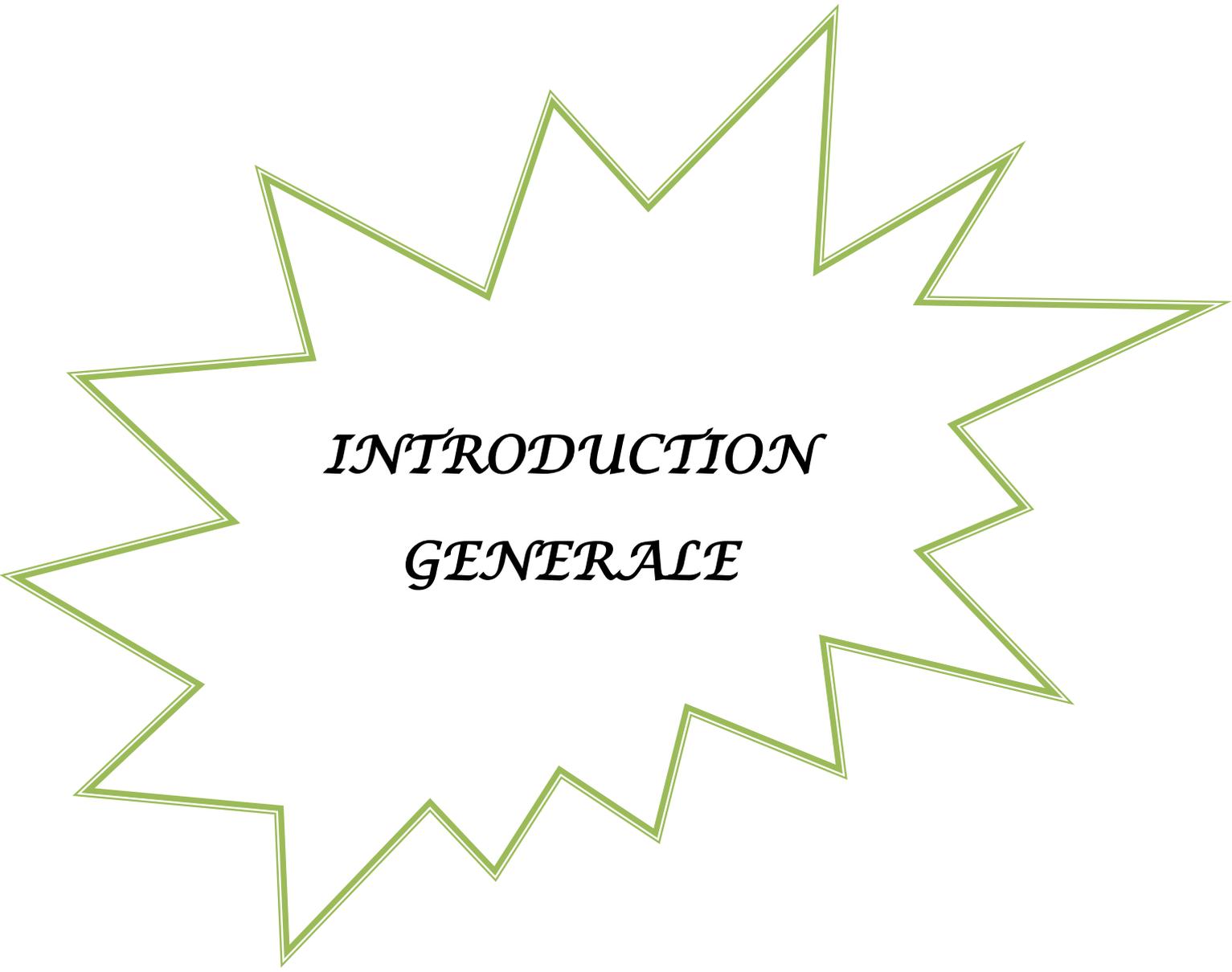
LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

<i>Tableau</i>	<i>Titre</i>	<i>Pages</i>
<i>Tableau I.1</i>	Classification des pores selon Dubinin 1960.	<i>07</i>
<i>Tableau I.2</i>	Principales différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique.	<i>15</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>CHAPITRE III</i>		
<i>Tableau</i>	<i>Titre</i>	<i>Pages</i>
<i>Tableau III.1</i>	Résultats des tests de lixiviation dynamique en bouteilles roulantes.	<i>34</i>
<i>Tableau III.2</i>	Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage des trois types de charbon.	<i>36</i>
<i>Tableau III.3</i>	Résultats de la teneur en or des charbons chargé et désorbé du circuit de l'usine.	<i>39</i>
<i>Tableau III.4</i>	Résultats du taux d'humidité des trois types de charbon.	<i>40</i>
<i>Tableau III.5</i>	Résultats du taux de la cendre du charbon vierge.	<i>41</i>
<i>Tableau III.6</i>	Résultats des taux de Hardness et de Friabilité des trois types de charbon.	<i>41</i>
<i>Tableau III.7</i>	Résultats de la densité apparente des trois types de charbon.	<i>42</i>
<i>Tableau III.8</i>	Résultats des mesures du pH des trois types de charbon.	<i>43</i>
<i>Tableau III.9</i>	Résultats de la porosité apparente des trois types de charbon.	<i>44</i>
<i>Tableau III.10</i>	Résultats des tests d'adsorption du charbon vierge en solutions synthétiques.	<i>46</i>
<i>Tableau III.11</i>	Résultats des tests d'adsorption du charbon vierge en solutions aurifères réelles.	<i>50</i>
<i>Tableau III.12</i>	Résultats du test d'adsorption du charbon vierge en pulpe.	<i>52</i>
<i>Tableau III.13</i>	Résultats des tests d'adsorption du charbon désorbé en solutions synthétiques.	<i>54</i>
<i>Tableau III.14</i>	Comparaison entre la capacité d'adsorption du charbon vierge et charbon désorbé	<i>56</i>



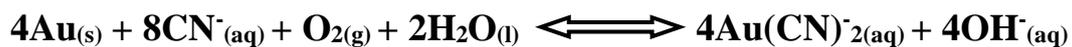
INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'or est un métal précieux couramment utilisé par l'humanité dans une grande variété de domaines, comprenant les industries électriques et électroniques, la médecine, la bijouterie et comme catalyseur dans divers produits chimiques [1].

L'or est généralement traité par le processus de lixiviation au cyanure. Cette méthode est capable d'extraire de l'or à **98%** avec un coût plus faible que d'autres processus [1].

La lixiviation est appliquée en broyant le minerai à 75 µm et le mettre en solution avec le cyanure sous condition de **pH (10-11)** et en présence d'oxygène. L'or réagit avec le cyanure selon la réaction chimique suivante [1] :



Une fois que l'or a été dissous dans le cyanure, deux processus principaux sont suggérés pour la récupération de l'or. L'un est le processus de précipitation du Zinc Merrill-Crowe, et l'autre est l'adsorption de l'or sur du charbon actif. Ce dernier est maintenant considéré comme la méthode la plus rentable pour la récupération de l'or à partir d'une solution de lixiviation au cyanure [2].

Depuis le début de son utilisation, cette méthode est perfectionnée, améliorant les propriétés physico-chimiques du charbon actif et a développée des méthodes très efficaces telles que le carbone en pulpe (*CIP*), carbone en lixiviats (*CIL*) et le carbone en colonne (*CIC*) [2].

Notre travail intitulé « *Caractérisation physico-chimique et capacité d'adsorption du charbon actif utilisé dans l'industrie aurifère -cas de la mine d'Amesmessa-* » a pour objectif l'étude de l'adsorption de l'or par le charbon actif dans la solution aurifère. L'étude se divise en trois étapes :

- **La première étape** concerne le minerai aurifère (échantillonnage et caractérisation) ainsi que les tests de lixiviation effectués dans des bouteilles roulantes. A la fin de cette étape, nous allons avoir des résultats sur la minéralogie de notre échantillon et le taux de l'or ionique extrait (teneur exprimée en g/t) ;
- **La deuxième étape** de ce travail s'intéresse à la caractérisation physico-chimique du charbon actif. Trois types de charbon utilisés à savoir : charbon vierge, chargé et désorbé. La capacité de rétention de chaque type de charbon est aussi estimée ;
- Le phénomène d'adsorption est étudié dans **la troisième étape** de notre travail.

INTRODUCTION GENERALE

Pour ce fait, nous avons jugé nécessaire de présenter d'abord, dans *un premier chapitre*, des généralités sur le charbon actif, ses types, ses propriétés et ses différentes utilisations dans les industries ainsi que pour l'environnement. Nous avons aussi expliqué le phénomène d'adsorption en général et celui de l'or en particulier.

Le second chapitre vise à présenter l'ensemble de matériels et méthodes suivis au cours du stage pratique effectué au sein de la mine d'Amesmesssa.

Pour finir, *un troisième chapitre* qui englobe les résultats accompagnés par leurs discussions passant par les résultats de la lixiviation, résultats des analyses physico-chimiques de chaque type de charbon actif et enfin les résultats des essais d'adsorption sur différentes solutions (solutions aurifères synthétiques de différentes concentrations, solution aurifères réelles issues des essais de lixiviation préalablement préparée et sur des pulpes contenant le minerai d'or en poudre avec ses différents constituants).

Enfin, une synthèse qui englobe tous les résultats obtenus, qu'ils soient bibliographiques, expérimentaux ou théoriques, est donnée sous forme d'une *conclusion générale*.



CHAPITRE I
*Généralités sur le charbon
actif et phénomène
d'adsorption*

INTRODUCTION

Les charbons actifs sont des solides caractérisés par une grande surface spécifique grâce à un réseau très développé de pores appelés micropores. Cette caractéristique essentielle lui confère de grands intérêts dans l'industriel ou bien dans le domaine technologique. Il est utilisé dans la séparation des composés minéraux, organiques ou dans la purification des solutions liquides par extraction de polluants, dans les traitements des eaux, ou bien encore au raffinage des sucres, et surtout pour la récupération des métaux précieux [3].

L'utilisation des charbons actifs pour l'adsorption des complexes cyanurés d'or et d'argent a fait l'objet de plusieurs études. Les propriétés sorptives des charbons actifs, leur sélectivité vis-à-vis des complexes d'or et d'argent ont favorisé leur emploi à une large échelle dans l'industrie de traitement des minerais aurifères [4].

Au cours de ce chapitre, nous allons donner un aperçu théorique sur les propriétés du charbon actif, ses types, et son utilisation dans les différentes industries et spécialement celle de la récupération de l'or. Nous allons ainsi définir le phénomène d'adsorption en citant ses types et ses applications.

I.1. DEFINITIONS**I.1.1. L'adsorption**

C'est un processus physico-chimique de transfert de matière dans lequel une ou plusieurs composantes d'un fluide se fixent sur la surface d'un solide d'une manière plus ou moins réversible par des interactions physiques et/ou chimiques. Selon qu'il s'agit d'un liquide ou d'un gaz en contact avec l'adsorbant on distingue : l'adsorption solide-liquide (cas de notre étude) et l'adsorption solide-gaz [5].

I.1.2. Adsorbants

Ce sont des matériaux poreux dont la taille des pores varie en général entre quelque angström à une centaine d'angström, et une surface spécifique supérieure à **100 m²/g**. Les adsorbants souvent utilisés sont: le gel de silice, l'aluminium activé, les charbons actifs ainsi que les adsorbants à tamis moléculaires comme les zéolithes [6].

I.1.3. Adsorbats

Ce sont des matériaux ayant des molécules de petite taille. Les trois adsorbats couramment utilisés sont: le méthanol, l'eau et l'ammoniac. Leurs caractéristiques les plus importantes sont : la chaleur latente, le volume spécifique, la pression de saturation et la stabilité chimique avec l'adsorbant (figure I.1) [6].

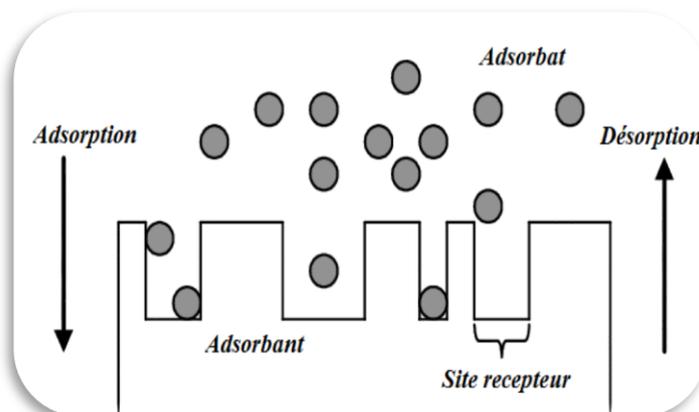


Figure I.1 : Schéma explicatif de l'adsorption et de la désorption [7].

I.2. LE CHARBON ACTIF

I.2.1. Définition du charbon actif

Les charbons actifs sont des produits carbonés poreux, constitués principalement de carbone, d'hydrogène, d'oxygène et de petites quantités de soufre et d'azote. Ils se présentent sous forme d'une poudre noire plus ou moins fine et inodore [8].

Le conseil Européen des fédérations de l'industrie chimique (C.E.F.I.C) les définit comme suit : « *les charbons actifs sont des produits carbonés dotés d'une structure poreuse présentant une très grande surface de contact interne. Ces matériaux issus des procédés industriels peuvent adsorber une large variété de substances qui se fixent sur leurs surfaces internes, ils sont par conséquent appelés adsorbants* » [8].

Les charbons actifs sont des adsorbants exceptionnels de par leur très grande surface spécifique, leur microporosité très développée, leur caractère versatile, leur capacité d'adsorption élevée et leur importante réactivité de surface [9].

I.2.2. Les propriétés du charbon actif

Le charbon actif possède plusieurs propriétés, nous allons citer les plus essentielles telles que [9]:

I.2.2.1. Propriétés physiques

↗ La structure du charbon actif

La structure poreuse du charbon est proche de celle du graphite, ordonnée sous la forme d'un empilement de couches successives planes d'atomes de carbone disposés en hexagones réguliers [10].

Dans chaque couche, la distance entre deux atomes de carbone est de $1,415 \text{ \AA}$. Trois des quatre électrons du carbone sont engagés pour former des liaisons covalentes avec les atomes voisins, le quatrième électron est délocalisé et forme une liaison de type aromatique. Les couches élémentaires, dont la cohésion est assurée par des forces de **Van der Waals** sont espacées de $3,354 \text{ \AA}$ [9].

La figure (Figure I.2) illustre la structure du charbon actif vu sous un microscope électronique [11] :

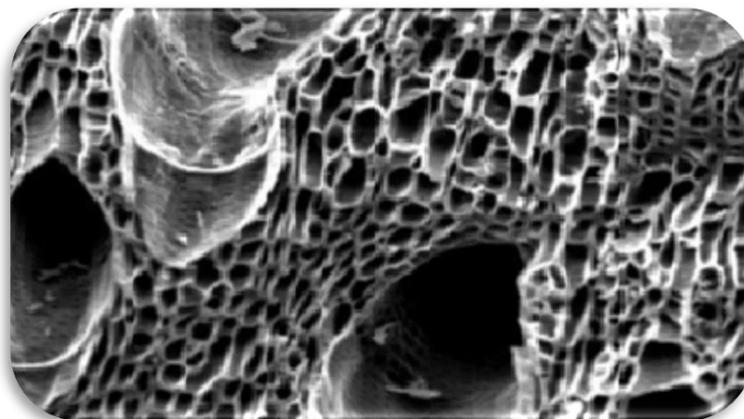


Figure I.2 : Structure du charbon actif vu sous un microscope électronique [11].

Le charbon actif est constitué d'atomes de carbone organisés en feuillets selon une structure graphite comme il est montré dans la figure (figure I.3) [12].



Figure I.3 : Structure cristallographique du CA et représentation schématisée de sa structure poreuse plane [12].

Ces feuillets sont regroupés en une structure granulaire ou monolithique, traversée de pores allant de quelques angströms (espaces inter-foliaires) à quelques dizaines de nanomètres (*figure I.3 et figure I.4*). Cette structure poreuse permet aux particules de CA de développer une surface de contact importante avec le milieu extérieur [12].

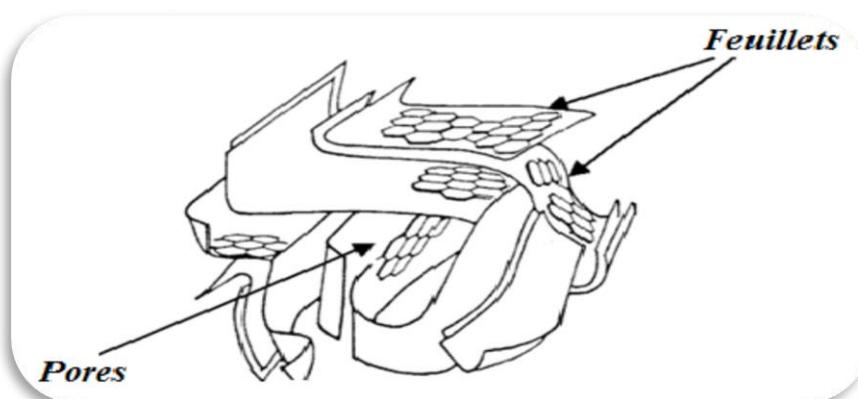


Figure I.4 : Représentation schématique de la microstructure du CA [12].

↪ La surface spécifique du charbon actif

Par définition, la surface spécifique d'un adsorbant est une surface par unité de masse.

Elle est généralement exprimée en (m^2/g). Son estimation est conventionnellement fondée sur des mesures de la capacité d'adsorption de l'adsorbant en question correspondant à un adsorbat donné, la molécule adsorbée doit avoir une surface connue et acceptable. Il suffit à cet effet, de déterminer la valeur de la capacité de la monocouche à partir de l'isotherme d'adsorption [13].

Il est nécessaire de distinguer la surface externe et la surface interne d'un adsorbant (*figure I.5*).

La première est la surface microporeuse S_{mi} représentée par les parois des micropores; elle peut atteindre plusieurs mètres carrés par gramme et elle est reliée au volume des micropores W_0 et à la largeur moyenne des pores L par une simple relation géométrique [13] :

$$S_{mi} (m^2/g) = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot W_0 (cm^3 \cdot g^{-1})}{L (nm)} \quad (\text{Equation I.1})$$

La deuxième est la surface non-microporeuse ou la surface externe S_e qui comprend les parois des mésopores et des macropores, ainsi que la surface des feuillets aromatiques. Pour les charbons actifs, cette surface varie entre 10 et 200 m^2/g environ [13].

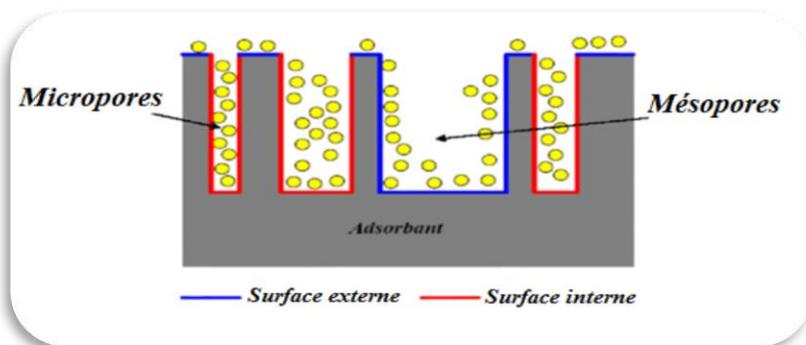


Figure I.5 : Représentation schématique de la surface interne et externe d'un charbon actif [13].

⇒ La porosité du charbon actif

Elle représente la fraction du vide existant dans le charbon actif. Le développement de la porosité est dû à la pénétration de l'agent oxydant dans la structure interne du charbon et l'élimination des atomes de carbone par une réaction qui aboutit à l'ouverture et à l'élargissement des pores inaccessibles. A basse température, l'élimination du carbone des parois de pores provoque leurs agrandissements, la cinétique d'oxydation est faible et l'activation conduit à une distribution de la taille de pore dans tout le volume du matériau [14]. Les pores sont généralement classés suivant leurs tailles en trois catégories comme l'indique (le tableau I.1) et (la figure I.6) ci-dessous [5].

Tableau I.1 : Classification des pores selon Dubinin 1960 [5].

Type de pores	Rayon (nm)	Surface spécifique (m ² /g)	Volume massique (ml/g)
Micropores	< 2	600 – 1500	0.2 – 0.6
Mésopores	2 – 50	20 – 70	0.02 – 0.1
Macropores	> 50	0.5 – 2	0.2 – 0.8

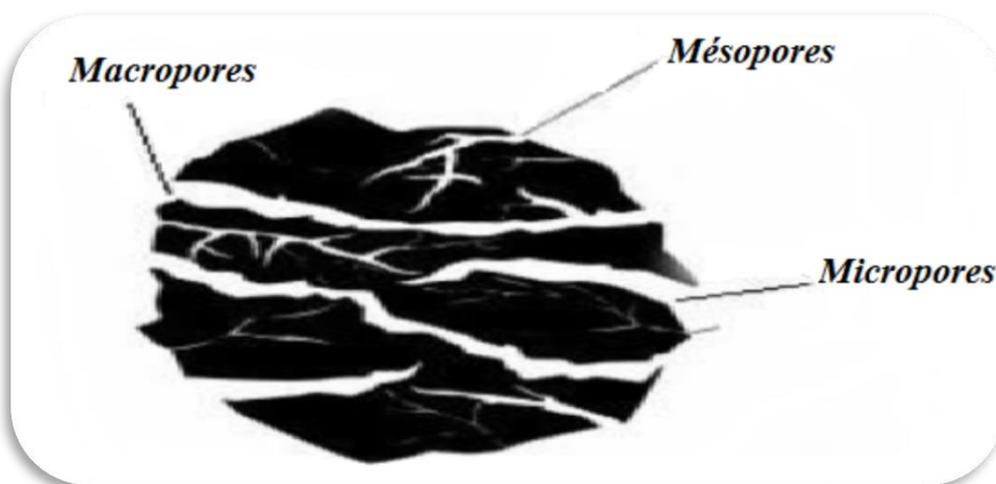


Figure I.6 : Structure poreuse du charbon actif [5].

I.2.2.2. Propriétés chimiques

Les groupements carboxyliques, anhydrides carboxyliques, phénoliques, carbonyles et lactones sont les plus couramment rencontrés. Ces groupements de surface sont à l'origine du caractère hydrophile du charbon actif et de son potentiel électrocinétique. Ils confèrent au charbon actif des propriétés acido-basiques (*Figures I.7*) [15].

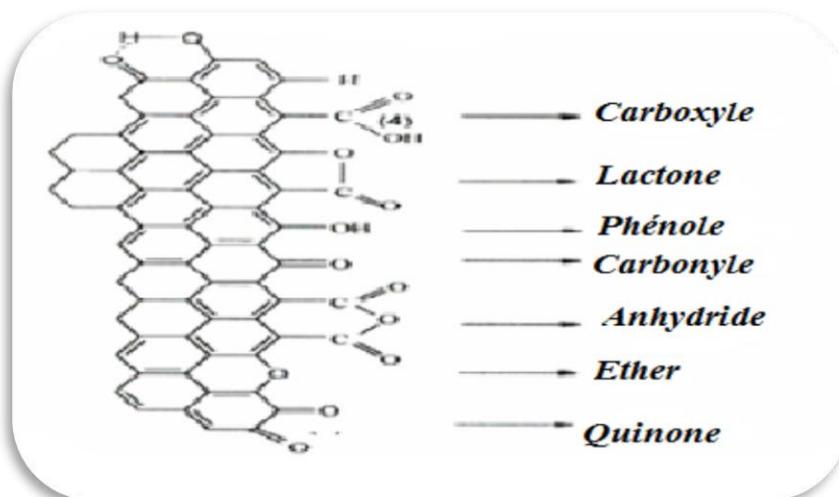


Figure I.7 : Les Groupements de surface du CA [16].

Il faut aussi noter que selon le type et le mode d'activation ainsi que les conditions de refroidissement (en atmosphère inerte ou en présence d'air), le charbon actif acquiert un caractère acide ou basique [16].

I.2.3. Types du charbon actif

Pour une application large, les CA sont généralement classés en fonction de leur apparence physique en :

I.2.3.1. Charbon actif en poudre

Pulvérisé avec une taille de moins de *0,18mm*. Ce charbon est principalement employé dans des applications en phase liquide et pour le traitement des flux gazeux (*Figure I.8*) [17].



Figure I.8 : Charbon actif en poudre (CAP) [18].

I.2.3.2. Charbon actif en grain

La forme granulaire du charbon est caractérisée par une taille des particules supérieure à **1mm**, un faible diamètre des pores, une grande surface interne et une externe relativement faible. Il en résulte que les phénomènes de diffusion à l'intérieur des pores prennent une grande importance dans le processus d'adsorption (*Figure I.9*) [18].



Figure I.9 : Charbon actif en grain (CAG) [18].

I.2.3.3. Le charbon actif extrudé

Le charbon actif extrudé est de forme cylindrique avec des diamètres allant de **0,8 mm** à **5 mm**. Il est principalement utilisé pour des applications en phase gazeuse à cause de sa faible perte de charge, de sa grande résistance mécanique et de sa faible teneur en poussières (*Figure I.10*) [18].



Figure I.10 : Charbon actif en extrude (CAE) [18].

I.3. PROCÉDES DE FABRICATION DU CHARBON ACTIF

Les propriétés d'un charbon actif dépendent du matériau d'origine, de la nature de l'agent d'activation et des conditions du procédé d'activation. Les principaux matériaux utilisés pour la fabrication de charbons actifs sont [12] :

- ↻ Charbon bitumineux ;
- ↻ Résidus de pétrochimie ;
- ↻ Os ;
- ↻ Sucre ;
- ↻ Coquilles de noix de coco (c'est la matière première du charbon actif utilisé dans notre étude) ;
- ↻ Noyaux de fruits ;
- ↻ Lignite ;
- ↻ Bois ;
- ↻ Tourbe ;
- ↻ Boues de traitement des eaux [12].

La fabrication d'un charbon actif se fait généralement en deux temps. Carbonisation et activation [12], la (figure 1.11) schématise la fabrication du charbon actif passant par la préparation mécanique de la matière première jusqu'à la mise en forme finale du charbon.

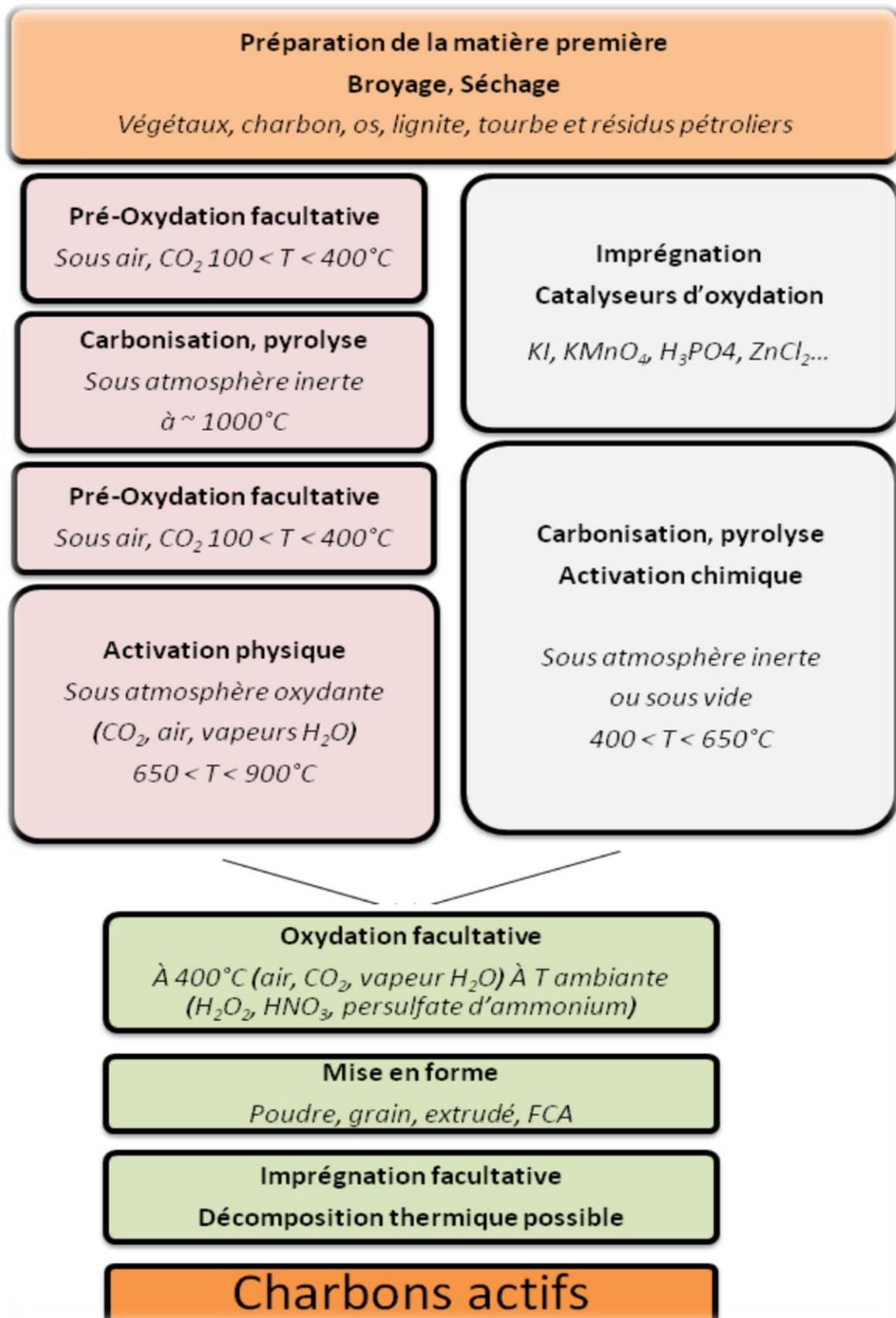


Figure I.11 : Représentation du principe de fabrication des CA [12].

I.3.1. Carbonisation

La pyrolyse ou carbonisation est la décomposition thermique d'un matériau organique sous vide ou sous atmosphère inerte (on utilise l'azote généralement) à des températures allant de **400 à 1000°C**; les hétéroatomes (oxygène et hydrogène) sont éliminés sous l'effet de la chaleur et le matériau devient plus riche en carbone. Les atomes de carbone se retrouvent dans les feuillets aromatiques possédant une certaine structure planaire. Ces feuillets s'arrangent ensuite de manière irrégulière laissant ainsi des interstices entre eux. Ces interstices donnent naissance à une porosité primaire du produit carbonisé. Les différents paramètres déterminants la qualité, les propriétés et le rendement du carbonisât sont :

- ↻ La vitesse du chauffage du four ;
- ↻ La température finale de pyrolyse ;
- ↻ Le temps de résidence dans le four ;
- ↻ La nature du matériau de départ.

Le produit de la carbonisation ne possède en général qu'une porosité peu développée et ne peut être employé comme adsorbant sans un traitement supplémentaire d'activation entraînant une augmentation sensible de sa surface spécifique [19].

I.3.2. Activation

L'activation consiste à développer la structure poreuse en éliminant les goudrons qui obstruent les pores, et à créer des fonctions de surface (généralement oxydées) qui sont à l'origine des interactions entre le solide et les molécules adsorbées. Elle peut être physique ou chimique comme le montre (la figure I.12) [4].

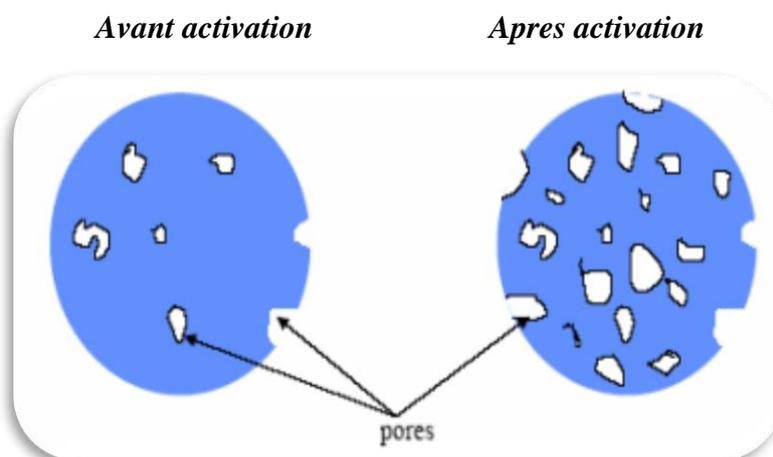


Figure I.12 : Représentation bidimensionnelle de l'activation du charbon [14].

↻ L'activation physique

Permet de développer les pores existants et d'en créer d'autres. Elle est réalisée entre **800°C et 1000°C** en présence d'un gaz faiblement oxydant (air), de vapeur d'eau, de CO₂, ou encore d'un mélange de ces gaz [20].

↻ L'activation chimique

Est plutôt utilisée avec le bois. Elle consiste à imprégner le matériau de départ avec une solution concentrée d'agent très oxydant et/ou déshydratant (acide phosphorique, chlorure de zinc...). Le matériau subit ensuite une pyrolyse entre **400°C et 800°C** à l'abri de l'air, puis est lavé et séché. Le charbon actif est ainsi obtenu en une seule étape. C'est le degré d'imprégnation du matériau en matière oxydante qui définit la structure poreuse finale.

Suite à l'activation, le charbon actif acquiert une structure poreuse poly dispersée : les pores ont différentes formes et dimensions. La répartition poreuse dépend de la nature de la matière première, mais aussi des conditions de l'activation. Les propriétés physico-chimiques d'un charbon peuvent donc varier pour un même précurseur [20].

I.4. REGENERATION DU CHARBON ACTIF

Lorsqu'il est utilisé en tant qu'adsorbant, le **CA** se sature progressivement et il finit par ne plus pouvoir fixer les molécules à sa surface. Afin de valoriser au mieux ce matériau et ne pas en faire un déchet ultime, il apparaît donc important de pouvoir le régénérer de façon à ce qu'il puisse retrouver ses propriétés initiales d'adsorbant. Il existe un certain nombre de techniques de régénération du **CA** : thermique, à la vapeur d'eau, chimique (extraction par solvant, par fluide supercritique ou décomposition des adsorbats par des agents oxydants ou réducteurs), électrochimique ou encore biologique [20].

I.5. UTILISATIONS DU CHARBON ACTIF

L'utilisation du charbon actif est répartie en différents domaines comme :

- ↻ Traitement des eaux potables, les eaux usées, les eaux résiduaires industrielles, ainsi que les eaux de piscine, etc... ;
- ↻ Purification de produits industriels ;
- ↻ Le charbon actif élimine les couleurs et les impuretés de produits bruts, il est employé par exemple pour la décoloration du sucre de canne ou de betterave [11].

Les études faites sur l'utilisation du charbon actif comme support bactérien montrent que :

- Les charbons actifs possèdent une texture idéale pour le développement bactérien ;
- Le charbon actif n'a pas un rôle bactérien sélectif, en effet plusieurs sortes de bactéries sont observées, généralement des bactéries ciliées ;
- Le charbon macroporeux favorise le développement bactérien beaucoup plus que le charbon microporeux en raison de la dimension des bactéries [11].

Il est aussi largement utilisé dans l'exploitation minière pour la récupération d'or. L'utilisation du charbon actif facilite grandement l'extraction d'or quand sa teneur est faible (quelques ppm) [21].

I.6. PHENOMENE D'ADSORPTION

I.6.1. Principe

L'adsorption est le processus où des molécules d'une espèce appelée adsorbat (gaz ou liquide) viennent se fixer sur la surface d'un solide, appelé adsorbant. Les sites où se fixent les molécules d'adsorbat sont appelés sites actifs (*figure I.13*). L'adsorption peut être physique ou chimique selon la nature des interactions qui se produisent entre l'adsorbat et la surface de l'adsorbant [22].

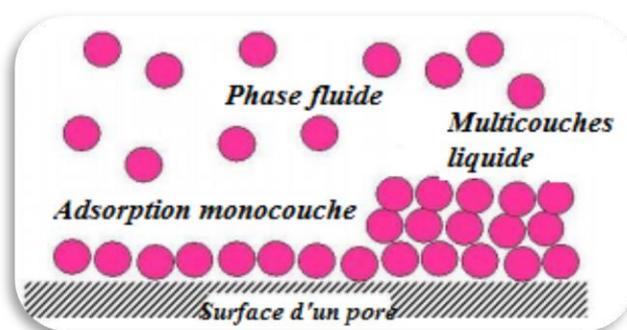


Figure I.13 : Phénomène d'adsorption [23].

I.6.2. Les types d'adsorptions

Selon les types et la nature des interactions adsorbat-adsorbant ou les forces qui maintiennent les adsorbats sur la surface solide, on distingue deux types d'adsorption : *la Physisorption* et *la chimisorption* [24].

La distinction entre les deux types d'adsorption n'est pas toujours facile. En effet, les énergies mises en jeu dans les physisorptions fortes rejoignent celles qui interviennent dans

les chimisorptions faibles [10]. Les majeures caractéristiques des deux types d'adsorption sont résumées dans le tableau suivant (tableau I.2) :

Tableau I.2 : Principales différences entre l'adsorption physique et l'adsorption chimique [10].

PARAMETRES	PHYSISORPTION	CHIMISORPTION
Type de liaison (adsorbant-adsorbat)	Vander Waals (Electrostatique)	Covalente ou ionique
Chaleur d'adsorption (KJ/mol)	50	100 à 500
Nombres de couches adsorbées	Une ou plusieurs couches superposées	Souvent une monocouche
Spécificité	Processus non spécifique	Dépend de la nature de l'adsorbant et l'adsorbat
Température ambiante	Le rendement est plus appréciable pour une température plus basse que celle du point d'ébullition de l'adsorbant	L'adsorption à lieu même à une plus haute température
Domaine de température	Relativement faible	Plus élevée
Réversibilité	Facile	Difficile
Energie de liaison	Faible	Forte

I.6.3. Mécanisme d'adsorption

Au cours de l'adsorption d'une espèce sur un solide, le transfert de masse des molécules se fait de la phase fluide vers le centre de l'adsorbant (figure I.14). Ce processus s'opère au sein d'un grain d'adsorbant en plusieurs étapes [10] :

↻ 1^{ère} étape (Diffusion externe)

Transfert de matière de la solution vers la couche limite située autour des particules de l'adsorbant. Transfert de la couche limite vers la surface adsorbant [10] ;

↻ 2^{ème} étape (diffusion interne « dans les pores »)

Transfert de la surface vers les sites adsorbants (diffusion intra particulaire dans le solide et dans les micropores et les macropores) [10] ;

↻ 3^{ème} étape (diffusion de surface)

C'est la fixation de l'adsorbat sur les sites actifs de l'adsorbant, une fois adsorbée, la molécule est considérée comme immobile [10].

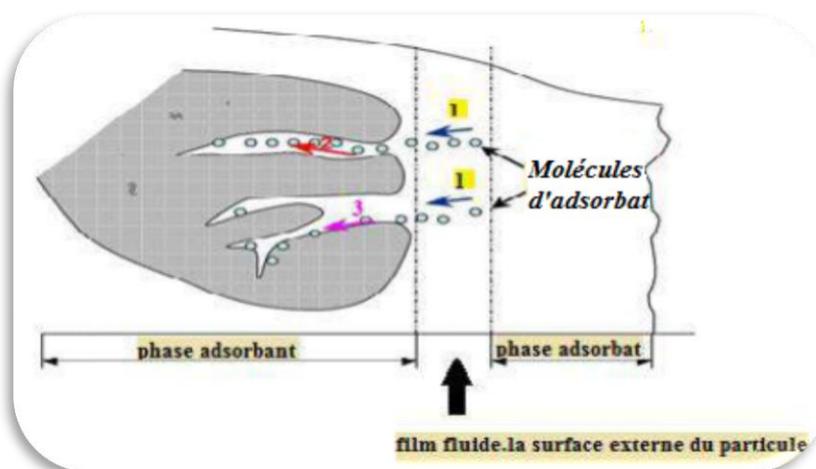


Figure I.14 : Schéma du mécanisme de transport d'un adsorbat au sein d'un grain [10].

I.6.4. Capacité d'adsorption

La capacité d'adsorption d'un adsorbant est définie comme étant la quantité de substrat (masse ou volume) adsorbée par unité de poids d'adsorbant pour une température donnée. Elle nécessite la prise en compte de nombreux paramètres aussi bien pour l'adsorbat (taille des molécules, solubilité dans l'eau, etc....) que pour l'adsorbant (surface spécifique, structure et type de particules, le constituant etc....). Elle peut être généralement exprimée par la relation suivante [10] :

$$Q = (C_0 - C_t) \cdot V \cdot m \quad (\text{Equation I.2})$$

Sachant que :

Q : Capacité d'adsorption du support (**mg/g**) ;

C₀ : Concentration initiale du substrat (**mg/L**) à $t = 0$;

C_t : Concentration du substrat (**mg/L**) à l' instant t du processus d'adsorption ;

V : Volume de la solution (**L**) ;

m : Masse du support (**g**).

La capacité d'adsorption d'un solide dépend d'un certain nombre de paramètres, on peut citer : En résumé, la capacité d'adsorption augmente lorsque [10] :

- ✓ La concentration du soluté adsorbable augmente ;
- ✓ La surface spécifique de l'adsorbant augmente ;
- ✓ Le poids moléculaire du soluté augmente ;
- ✓ Le pH diminue, pour autant que cette diminution de pH s'accompagne d'une diminution de la solubilité des solutés [10].

I.7. L'ADSORPTION DE L'OR (L'ION DICYANORATE) PAR LE CHARBON ACTIF

Les charbons activés sont utilisés pour récupérer l'or des solutions de cyanure, qui sont percolées à travers les minerais contenant de l'or comme il est représenté par le flow sheet de (*la figure I.15*) [4]. Trois principales technologies existent pour récupérer de l'or à partir d'une solution de lixiviat contenant du cyanure [25] :

I.7.1. Charbons en pulpe (CIP)

Un procédé qui permet d'extraire l'or directement de la pulpe cyanurée par adsorption du métal précieux sur des particules de charbon actif. Ce procédé simple est facilement adapté aux petites, moyennes et grandes opérations, à des prix de revient relativement faibles.

L'adsorption de l'or sur le charbon à contre-courant dans une batterie de cuves agitées, et les particules de charbon actif chargées en or sont ensuite récupérées de la pulpe par simple criblage ou tamisage [25].

I.7.2. Charbons en lixiviats (CIL)

Ce processus est très similaire au processus *CIP*. Les principales différences reposent dans la préparation de la boue et dans la méthode d'extraction de l'or à partir du lixiviat. Dans un processus *CIL*, le carbone est mélangé à la solution des lixiviats, et non à la pulpe, il suffit d'ajouter la charge de charbon actif directement dans les cuves de lixiviation à la place des cuves d'adsorption en fin de circuit de lixiviation. Ceci est beaucoup moins abrasif, ce qui signifie que le carbone dure beaucoup plus longtemps que dans un processus *CIP*.

Le principal avantage du procédé *CIL* par rapport au *CIP* est un plus faible coût d'installation et d'opération puisque le nombre total de cuves est diminué. Le procédé *CIP* offre cependant l'avantage d'une meilleure efficacité dans la récupération de l'or puisque tout l'or est déjà solubilisé quand il est en contact avec le charbon actif [26].

I.7.3. Charbons en colonne (CIC)

Au cours de ce processus, la solution de lixiviation par cyanuration passe par des colonnes remplies de minerai. Le processus est très efficace pour l'extraction de l'or du minerai à faible teneur. Le charbon actif adsorbe les ions de l'or (Au^+), à la dernière colonne la teneur de l'or sera faible dans la solution traversée. Le principe de fonctionnement du contre-courant dans les colonnes de charbon (*CIC*) est le même que celui des cuves d'adsorption *CIP*. De même façon que dans le *CIP*, le charbon chargé est récupéré et destiné à station de raffinage [26].

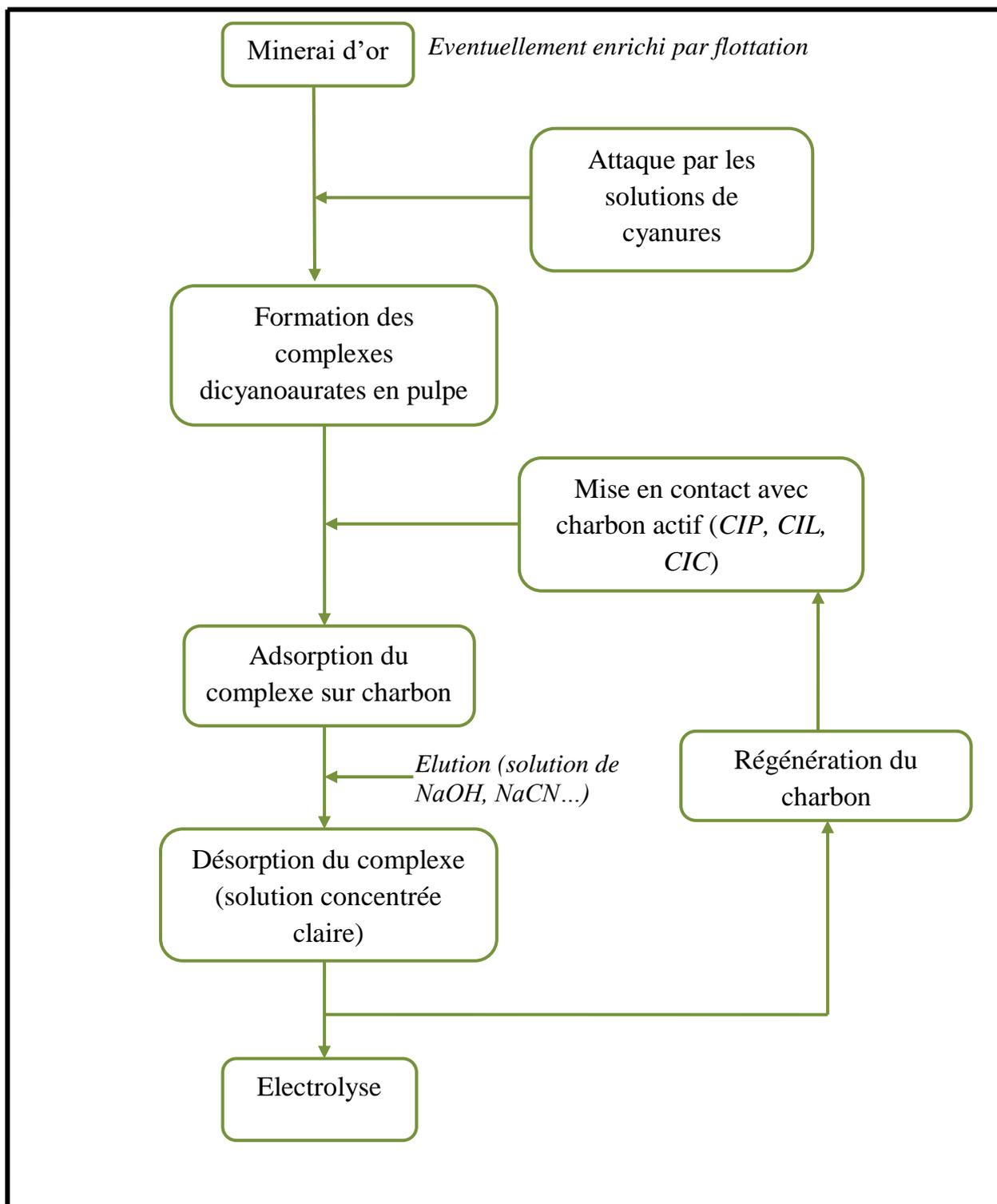


Figure I.15 : Flow sheet de traitement du minerai d'or [4].

I.8. LA DESORPTION DE L'ION DICYANOAUATE

A partir de la surface des charbons actifs, plusieurs procédés de désorptions sont utilisés [4] :

⇒ Le procédé ZADRA de désorption

Il consiste à faire passer une solution de *1%* en volume de *NaOH* et *0,2 %* en volume de *NaCN* à pression atmosphérique et à des températures comprise entre *85 à 95°C* sur le charbon. Le temps de désorption est environ de *72 heures* [27].

⇒ Le procédé anglo-américain

Dans ce procédé, le charbon est mis en contact avec une solution contenant *5%* de *NaOH* et *1%* de *NaCN* en volume pendant *1 à 2 heures*, suivi d'un lavage à l'eau déminéralisée à des températures de *110 à 140°C* sous pression de *50 à 100 kPa*, le temps de désorption dans ce cas est de *12 heures*. La solution doit être refroidie avant l'opération d'électrolyse, ce qui présente un inconvénient par perte de temps et une consommation supplémentaire d'énergie [28].

⇒ Procédé dérivé de celui de ZADRA

Ce procédé est basé sur l'utilisation d'une substance organique, généralement l'alcool éthylique jusqu'à *20%* en volume à des températures de *80 à 9 °C*. L'alcool éthylique réduit le temps de désorption de *5 à 6 heures* au lieu de *72 heures*. Ce procédé présente un inconvénient lié au risque d'incendie à cause de l'alcool et une perte de ce réactif par évaporation [29].

CONCLUSION

Le charbon actif est un matériau carboné poreux possédant une capacité d'adsorption élevée grâce à sa porosité et sa grande surface spécifique allant de *300 à 2500 m²g⁻¹*.

Les propriétés texturales des charbons activés dépendent du matériau de départ, et de la méthode de préparation. La production de charbon actif peut être par activation physique ou chimique qui est la plus rentable et la plus simple et qui requiert une température et un temps d'activation plus courts et essentiellement une structure plus poreuse.

Il est l'un des adsorbants les plus utilisés dans la récupération des ions aurifères, pour cette raison nous allons étudier le phénomène d'adsorption plus en détail.



CHAPITRE II

Protocole opératoire et

analyses

INTRODUCTION

Le présent chapitre englobe les différentes étapes suivies pendant notre travail. Commenant par l'échantillonnage jusqu'aux tests de caractérisation et d'adsorption en exposant à chaque fois les réactifs et matériels utilisés. Les tests ont été effectués sur le charbon actif vierge et ceux du circuit (chargé et désorbé) pour étudier la capacité d'adsorption dans les solutions aurifères de chaque type de charbon.

Plusieurs tests ont été effectués sur le charbon afin de déterminer le taux de rétention en ajustant les paramètres influant sur l'adsorption comme : *la température, le pH, le temps et la concentration initiale de la solution ou de la pulpe*, en but d'étudier en détail le processus.

II.1. PREPARATION MECANIQUE DU MINERAI

La première étape de notre stage était la visite du lieu de l'échantillonnage (*filon N°08*) situé au centre de la mine d'Amesmessia en compagnie des géologues de la mine. Il est connu qu'un bon échantillonnage est exigé avant tout travail destiné au laboratoire, la matière doit être réduite tout en conservant ses propriétés. La (*figure II.1*) illustre un minerai aurifère frais prélevé du filon N°08 en adoptant la technique d'échantillonnage aléatoire. D'après les études précédentes [25,26], le minerai est constitué de Quartz blanc riche en sulfures, Pyrite (*FeS*), Chalcopyrite (*CuFeS₂*), et Galène (*PbS*) ; Voir [Annexe « B »].



Figure II.1 : Photo prise sur le lieu d'échantillonnage, minerai aurifère du filon 08 [Photo prise].

Au retour au laboratoire, nous avons commencé le traitement physique par la préparation mécanique qui consiste à transformer l'échantillon en poudre. Ce dernier est caractérisé par une granulométrie très fine ($<0,75\mu\text{m}$) pour faciliter sa caractérisation. Pour cela, nous avons suivi les étapes suivantes :

- a) **Débitage des roches** : le but de cette étape est de réduire la taille des roches manuellement à l'aide d'un marteau pour faciliter son passage au concasseur à mâchoire (*figures II.2*).



Figure II.2 : Roches réduites [Photo prise].

- b) **Concassage** : on effectue un concassage primaire à l'aide d'un concasseur à mâchoire du laboratoire qui permet la réduction de la taille des roches et la libération des minéraux existants (*figure II.3*).



Figure II.3 : Minerai concassé [Photo prise].

- c) **Division et échantillonnage** : on introduit le matériau concassé dans un diviseur à riffle (échantillonneur) pour obtenir deux échantillons jumeaux représentatifs et homogènes, dont on élimine un au hasard considéré comme témoin et le deuxième qui sera encore divisé en deux pour effectuer les essais. La procédure est montrée dans la (*figures II.4*).



Figure II.4 : Opération d'homogénéisation par le diviseur à riffle [Photo prise].

- d) **Broyage et tamisage** : à l'aide d'un pulvérisateur (*figure II.5*) et une tamiseuse électrique de laboratoire (*figure II.6*), nous avons effectué un broyage primaire, secondaire et tertiaire avec un tamisage entre chaque stade de broyage, jusqu'à ce que la granulométrie atteigne **75 μ m**. Cette granulométrie est la plus adéquate pour obtenir un taux de libération optimale qui permet d'avoir de meilleurs résultats [30].



Figure II.5 : Pulvérisateur du laboratoire d'Amesmassa [Photo prise].



Figure II.6 : Tamiseuse du laboratoire d'Amesmassa [Photo prise].

- e) **Homogénéisation** : afin d'avoir plusieurs sous-échantillons représentatifs, une bonne homogénéisation est exigée. Pour cela, nous avons introduit notre échantillon principal dans un mélangeur d'une forme d'un « Y » (*figure II.7*) que l'on fait tourner manuellement pour bien mélanger le minerai enfermé dedans et le récupéré à la fin de l'opération (*figure II.8*).



Figure II.7 : Mélangeur d'échantillons [Photo prise].



Figure II.8 : Ouverture du mélangeur d'échantillons [Photo prise].

Après avoir récupéré notre minerai principal, nous avons effectué une deuxième homogénéisation par quartage.

L'échantillon étalé est partagé en 4 quarts sensiblement égaux (*figure II.9*). On élimine 2 fractions opposées et on réunit les 2 autres fractions (*figure II.10*). Si la quantité est encore trop importante, le quartage se poursuit selon le même processus jusqu'à l'obtention de la quantité désirée (*figure II.11*).



Figure II.9: Quartage du minerai après le broyage [Photo prise].



Figure II.10: Sélection de deux quarts opposés [Photo prise].

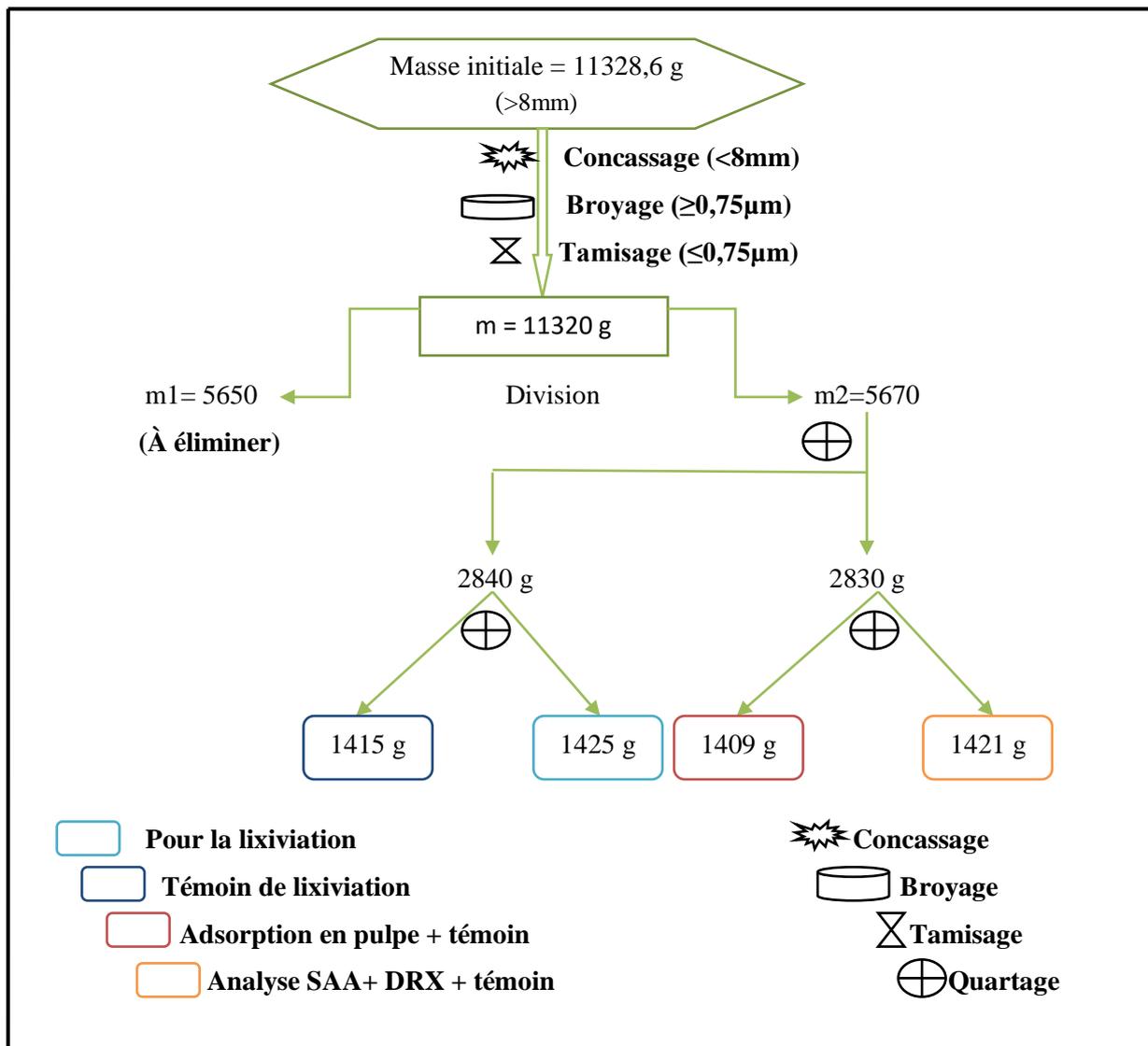


Figure II.11 : Schéma de la préparation mécanique du minerai.

II.2. DETERMINATION DE LA TENEUR EN OR PAR SAA

Notre minerai est caractérisé par spectrométrie d'absorption atomique (*SAA*). Une analyse chimique qui étudie les absorptions ou les émissions de lumière par l'atome libre [31]. L'application de la *SAA* a pour but la détermination de la teneur en Or (*Au*) initiale, finale et pendant les prélèvements. L'identification et la quantification de l'or contenu dans notre échantillon se font grâce aux spectres atomiques. Le matériel utilisé et les tests effectués sont reportés en [Annexe « A »].

II.3. ESSAIS DE LA LIXIVIATION DYNAMIQUE DU MINERAI EN BOUTEILLES ROULANTES

Un essai de cyanuration en bouteille est la première étape de la norme industrielle dans l'évaluation de récupération de l'or possible par lixiviation [32]. Le minerai préparé est agité doucement dans une solution de lixiviation. Les niveaux d'oxygène, l'alcalinité, la consommation de cyanure et la teneur en or sont surveillés et contrôlés rigoureusement tout au long de l'essai (voir le protocole opératoire dans [Annexe « A »]).

Le but de cette étape est la préparation de la solution aurifère pour les essais d'adsorption sur charbon actif.

II.4. DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU CHARBON ACTIF

Le charbon actif adapté pour la récupération du minerai d'or au sein de l'*ENOR* et pour tous nos essais au niveau du laboratoire est de type : *NORIT, Référence « GCN612G BVL EX »*.

Le choix de ce type de charbon par l'*ENOR* est dû à sa forte capacité d'adsorption des ions $\text{Au}(\text{CN})_2^-$. Les paramètres détaillés ci-dessous permettent de caractériser et de déterminer les conditions d'utilisation du charbon actif :

II.4.1 L'analyse granulométrique

L'analyse granulométrique consiste à séparer et classer à l'aide des tamis les grains selon leurs diamètres [33]. La taille des grains du charbon actif conditionne la vitesse d'adsorption (plus le grain est petit plus le transfert vers le centre est rapide) [21]. Pour cette analyse, nous avons utilisé un vibro-tamis (tamiseuse électrique) en plus d'une série de tamis de différents diamètres (4mm, 2mm, 1.18mm, 0.71mm, 0.25mm et un fond de tamis).

Plusieurs paramètres ont été calculés en suivant la méthode de calcul ci-dessous :

➤ **Méthode de calcul**

1) Refus pondéral (%)

$$R\% = \frac{P_i}{\Sigma P_i} \quad (\text{Equation II.1})$$

2) Refus cumulés et Tamisats cumulés (%)

$$R_{c1}(\%)=R_1(\%); \quad R_{c2}(\%)=R_1(\%) + R_2(\%); \quad R_{c3}(\%)=R_{c2}(\%) + R_3(\%);$$

$$\text{On sait que : } R_c(\%) + T_c(\%)=100\% \implies 100\% - R_c(\%)=T_c(\%).$$

3) Calcul des coefficients granulométriques

➤ **Le coefficient de HAZEN (Coefficient d'uniformité)**

Le coefficient de *HAZEN* permet de savoir si la granulométrie est étalée ou serrée (Uniforme) [34]. Ce coefficient est défini par la relation suivante :

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad [34] \quad (\text{Equation II.2})$$

D₆₀ : diamètre effectif des particules qui correspond à 60% du passant ;

D₁₀ : diamètre effectif des particules qui correspond à 10% du passant.

C_U : Le coefficient de *HAZEN* ; D'après *CAQUOT* et *KERISEL* [34] :

- **C_U < 2** : La granulométrie est serrée (uniforme) ;
- **C_U > 2** : La granulométrie est étalée [34].

➤ **Le coefficient de courbure**

Afin de déterminer si la granulométrie est bien graduée (une fraction est mal graduée si elle a des grains prédomine) [34]. Le coefficient de courbure est donné par l'équation suivante :

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad [34] \quad (\text{Equation II.3})$$

D₃₀ : diamètre effectif des particules qui correspond à 30% du passant.

C_c : le coefficient de courbure :

- **1 < C_c < 3** : La granulométrie est bien graduée (continuité bien répartie) ;
- **C_c < 1 et C_c > 3** : La granulométrie est mal graduée (continuité mal répartie) [34].

II.4.2. Détermination du taux d'humidité

L'humidité est la quantité d'eau présente dans l'échantillon [35]. Elle est mesurée en fonction de la perte de poids après avoir chauffé le charbon actif à **250°C** et l'avoir laissé sécher jusqu'à ce qu'il retrouve son poids de départ (généralement au bout de 2 heures). On pèse la masse du charbon avant et après le séchage pour pouvoir calculer le taux d'humidité.



Figure II.12 : Echantillons de charbon actif dans l'étuve [Photo prise].

⇒ Méthode de calcul du taux d'humidité

$$\%H = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (\text{Equation II.4})$$

%H : Le taux d'humidité en (%) ;

m₁ : La masse initiale du charbon actif humide en (g) ;

m₂ : La masse du charbon actif après séchage en (g).

II.4.3. Détermination du taux de cendre

L'analyse de la cendre est un bon indicateur de qualité du charbon actif puisque la cendre représente les résidus inorganiques restant après la combustion (les matières inertes présentes dans l'échantillon) [35]. Elle est mesurée à partir de la différence des masses du charbon avant et après passage d'un tamis de **1,18mm** en but d'éliminer la cendre (figure II.13)



Figure II.13 : Elimination de la cendre [Photo prise].

⇒ **Méthode de calcul du taux de cendre**

$$\%T = 100 - \frac{m_1 - m_2}{m_1} \quad (\text{Equation II.5})$$

$\%T$: Le taux de cendre en (%) ;

m_1 : La masse initiale du charbon actif vierge en (g) ;

m_2 : La masse du charbon actif vierge après tamisage (le refus) en (g).

II.4.4. Détermination de la résistance à l'abrasion (la dureté ou taux de Hardness) et du taux de friabilité

L'une des propriétés mécaniques fondamentales du charbon actif, c'est sa résistance mécanique. Elle peut se définir comme la résistance à l'abrasion ou à l'attrition lors de son utilisation [35]. On calcule la dureté du charbon actif avant et après être mélangé avec de l'eau distillée et agité mécaniquement pendant **12 heures**. La méthode de calcul est la suivante :

⇒ **Méthode de calcul du taux de Hardness et du Taux de friabilité**

$$\%TF = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (\text{Equation II.6})$$

$$\%TH = 100 - \%TF \quad (\text{Equation II.7})$$

$\%TH$: Le taux de Hardness en (%) ;

$\%TF$: le taux de friabilité en (%) ;

m_1 : La masse initiale du charbon actif vierge avant l'agitation en (g) ;

m_2 : La masse du charbon actif vierge après agitation et tamisage (le refus de **300µm**) en (g).

II.4.5. Détermination de la densité apparente

La densité indique le niveau d'activation du charbon actif. Elle conditionne l'efficacité des traitements et c'est également un élément déterminant de son prix [21]. Plus le charbon est activé, plus il est léger. La densité apparente du charbon est calculée à partir de sa masse et son volume comme suit :

⇒ Méthode de calcul de la densité apparente

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)} \quad (\text{Equation II.8})$$

ρ : la densité apparente en (g/cm³) ;

m : la masse du charbon actif en (g) ;

V : le volume apparent du charbon actif en (cm³).

II.4.6. Détermination du pH

Le **pH** est l'un des paramètres majeurs qui influent directement sur le taux d'extraction dans l'industrie aurifère car le milieu alcalin empêche la formation du gaz toxique **HCN** d'un côté et d'un autre coté la formation d'un film organique empêchant le contact **or-cyanure** [21]. Pour ces raisons que le **pH** doit être ajusté au début de chaque test et encore vérifié pendant les tests, ceci se fait à l'aide d'un **pH-mètre** (figure II.14).

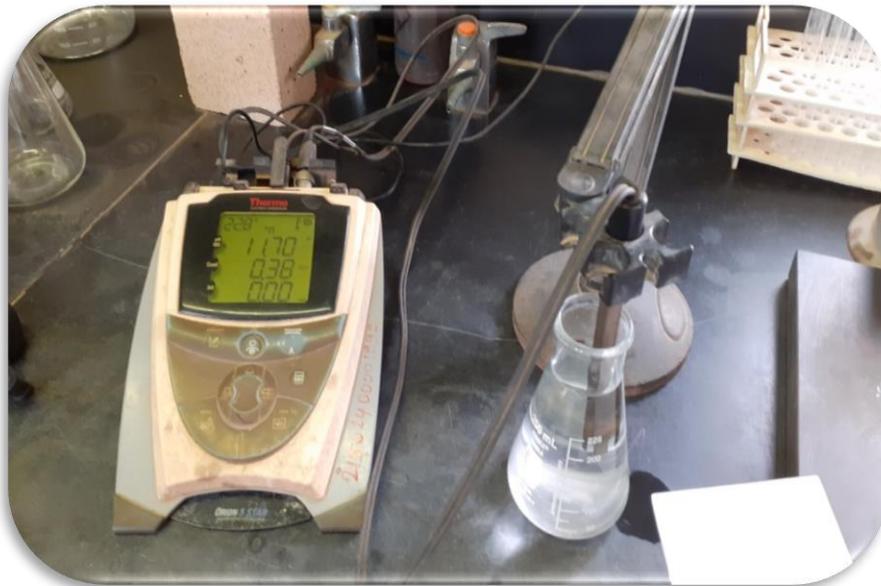


Figure II.14 : pH-mètre du laboratoire d'Amesmassa [Photo prise].

II.4.7. Détermination de la porosité apparente

La performance du charbon actif est évaluée par sa porosité. Plus la porosité est grande, meilleur est le niveau d'activation et donc meilleure sera la capacité d'adsorption [21].

Expérimentalement, il est facile de calculer la porosité de chaque type de charbon que ça soit vierge, chargé ou désorbé. Le charbon est versé dans l'éprouvette graduée après être séché dans une étuve à $T=250^{\circ}\text{C}$ pendant **2h** avec un volume précis de l'eau distillée. Après adsorption, c'est à partir de la différence de volume qu'on peut calculer la porosité apparente (figure II.15) suivant la relation suivante :

$$\text{La porosité} = \frac{V_p}{V_t} (\%) \quad (\text{Equation II.9})$$

$$V_p = V_{ch} \text{ après adsorption} - V_{ch} \text{ avant adsorption} \quad (\text{Equation II.10})$$

$$V_t = V_{ch} + V_{eau} \quad (\text{Equation II.11})$$

V_p : Le volume des pores en (ml) ;

V_t : Le volume total en (ml) ;

V_{ch} : Le volume du charbon actif en (ml).



Figure II.15 : Essai de la porosité apparente [Photo prise].

II.4.8. Test d'adsorption par charbon actif vierge et désorbé

L'objectif de ces essais est de déterminer le temps de séjours, le rendement de rétention maximal et les paramètres optimaux de l'adsorption sur charbon actif.

A. Essai d'adsorption en pulpe :

L'essai commence par la préparation de la solution (**500g** du minerai + **1L** d'eau distillée) avec **300ppm** de cyanure. Le **pH** de la solution est ajusté par **NaOH** avant et après agitation. Pour assurer les conditions de lixiviation du minerai, une agitation est effectuée pendant **12h** dans des bouteilles déposées sur un dispositif de rotation. A la fin de la

lixiviation, on verse **2g** de charbon et on remet la solution en agitation, puis on effectue des prélèvements après différents temps de séjours dans des tubes à essais bien ordonnés selon une fiche de travail. Des mesures de **pH** et de la teneur en **Au** de chaque échantillon est analysé.

Après que la teneur en **Au** dans la solution se stabilise, on arrête l'opération et on récupère le charbon qui sera séché et analysé.

B. Essai d'adsorption en solution réelle et synthétique :

Au début de nos essais, nous avons préparé des solutions aurifères de volume (**V=500ml**) avec différentes concentrations « **5, 10, 20, 50** et **100g/l** » (figure II.16). La lixiviation se fait par ajout de **0,15g** de cyanure et l'adsorption par **2g** de charbon et l'alcalinité du milieu est ajustée par le **NaOH**. Le mélange des différentes solutions est mis dans des bouteilles sur un dispositif de rotation en continu pour agitation. Des prélèvements durant des intervalles de temps bien déterminés seront effectués dans des tubes à essais bien ordonnés selon une fiche de travail. Trois paramètres sont toujours mesurés pendant chaque prélèvement : le **pH**, la température et la teneur en **Au** de la solution. Après l'écoulement du temps d'adsorption, on récupère le charbon qui sera séché et analysé et à la fin de l'opération, on trace les tableaux et les courbes représentant les taux d'adsorption.



Figure II.16 : Préparation de la solution aurifère [Photo prise].

⇒ Méthodes de calculs

Le calcul de la quantité d'Or adsorbée se fait comme suit :

$$Q_{te} \text{ d'Or adsorbée} = \frac{(CAu_i - CAu) * V}{1000} \quad (\text{Equation II.12})$$

Avec :

CAu_i : la teneur en Or initial de la solution en (g/t) ;

CAu : la teneur en Or de la solution en (g/t) ;

V : volume de la solution en (ml).

$$V = \text{le volume à l'instant (t)} - \text{le volume du prélèvement} \quad (\text{Equation II.13})$$

Alors que le calcul du taux d'adsorption analysée :

$$\text{Taux d'adsorption analysée} = \frac{Q_{te \text{ d'Or adsorbée}} * 100 * 1000}{CAu_i \text{ analysée} * V_i} \quad (\text{Equation II.14})$$

Avec :

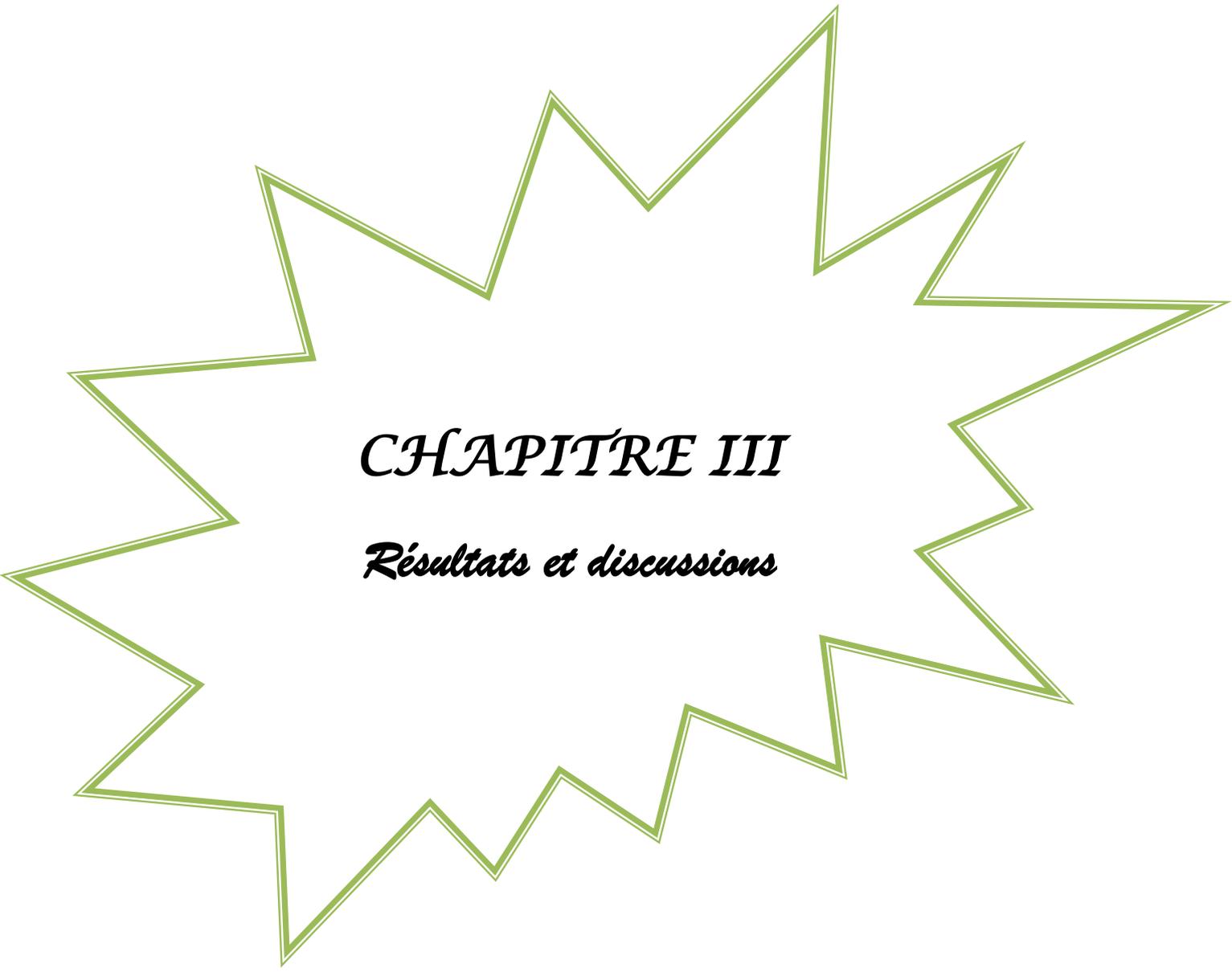
V_i : le volume initial de la solution (ml).

CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre les méthodes et les étapes suivies au cours de notre projet au sein de la mine d'Or d'Amesmassa, ainsi que les matériels utilisés. Pour cela, nous avons commencé par l'échantillonnage au niveau du *filon N°08*, en présence des géologues responsables de la mine afin d'extraire le minerai aurifère, objet du test du charbon actif. Ce dernier a été préparé mécaniquement en but d'avoir un échantillon représentatif et homogène, qui passera à la caractérisation au sein du laboratoire.

Nous avons aussi présenté les étapes suivies pour la caractérisation physico-chimique du charbon actif vierge, chargé et désorbé employés dans le cycle de traitement du minerai d'Or commençant par l'usine jusqu'à la raffinerie de la mine.

Le mode opératoire, les lois physiques et les méthodes de calculs sont aussi mises en évidence pour générer les résultats expérimentaux attendus, qui seront discutés clairement dans le **chapitre III**.



CHAPITRE III

Résultats et discussions

INTRODUCTION

La cyanuration du minerai d'or est une étape préliminaire et cruciale permettant la libération de l'or sous forme de $(Au(CN)_2^-)$ dans la solution. Des essais de lixiviation sur le minerai aurifère ont été réalisés dans la **1^{ère} partie** de ce chapitre afin d'assurer les conditions optimales d'une bonne adsorption.

La deuxième partie du chapitre est consacrée à la caractérisation des trois types de charbon actif utilisés au cours de ce travail (charbon vierge, chargé et désorbé). Au cours de cette étape de travail, les charbons sont préparés à l'étape de l'adsorption du complexe auro-cyanure et enfin à l'étape de désorption.

L'intérêt principal de notre travail est l'étude de l'adsorption des ions aurifères par deux types de charbon actif (vierge et désorbé). Une série d'essais est effectuée afin d'étudier les paramètres gouvernants la cinétique de rétention. Pour cela, nous avons examiné l'influence de quelques paramètres sur la rétention du minerai d'or par le charbon actif. Les résultats des essais sont exposés et interprétés dans la **3^{ème} partie** de ce chapitre.

1^{ère} PARTIE : LA LIXIVIATION DU MINERAI AURIFERE

Cette partie du chapitre est consacrée à la lixiviation en bouteilles roulantes de notre minerai aurifère, le but de cette étape est la libération de l'or par l'ajout de cyanure dans la solution, autrement dit, la dissolution du minerai d'or.

Les étapes de la préparation du minerai ainsi que les tests des bouteilles roulantes sont mentionnés dans [Annexe « A »]. A la fin de l'opération, on obtient un gâteau sec et une solution aurifère prête à être utilisée pour les essais d'adsorption sur charbon actif.

III.1. ESSAIS DE LA LIXIVIATION EN BOUTEILLES ROULANTES

Un essai de cyanuration en bouteille roulante est la première étape de la norme industrielle dans l'évaluation de la récupération de l'or possible par lixiviation, le minerai préparé est agité doucement dans un lixiviant de cyanure ou une solution de lixiviation. Les résultats des essais fournissent des informations sur les taux de la récupération attendus [30].

Le long des tests, nous avons travaillé dans les conditions suivantes :

- ✓ **pH** du milieu toujours maintenu entre **9** et **11**(milieu alcalin) ;
- ✓ **Densité** = **50%** en poids de matière solide ;
- ✓ **Granulométrie** de l'échantillon < **75 μ m** ;
- ✓ La concentration du **cyanure** est **300 ppm**.

Les résultats sont présentés dans (le tableau III.1) :

Tableau III.1 : Résultats des tests de lixiviation dynamique en bouteilles roulantes.

N° du test	Temps de lixiviation	Volume du prélèvement	Teneur en Au	Quantité d'or lixivié	Taux de lixiviation
	(min)	(ml)	(g/t)	(mg)	(%)
Test N° 01	0	1000	–	0,00	0,00
	10	985	2,36	2,32	18,23
	20	970	4,56	4,42	34,69
	30	955	6,97	6,66	52,21
	50	940	10,25	9,64	75,57
	70	925	11,56	10,69	83,87
	90	910	13,05	11,88	93,14
	120	895	13,96	12,49	97,99
	720	880	14,23	12,52	98,21
Test N° 02	0	1000	–	0,00	0,00
	10	985	4,45	4,38	27,19
	20	970	8,67	8,41	52,18
	30	955	11,37	10,86	67,37
	50	940	15,37	14,45	89,64
	70	925	16,00	14,80	91,82
	90	910	16,40	14,92	92,58
	120	895	17,27	15,46	95,89
	720	870	17,37	15,11	93,76
Test N° 03	0	1000	–	0,00	0,00
	10	996	4,40	4,34	24,35
	20	992	8,22	8,15	45,31
	30	988	13,11	12,95	71,98
	50	984	16,31	16,05	89,19
	70	976	18,16	17,72	98,49
	90	968	18,57	17,98	99,89
	120	960	18,71	17,96	99,81
	720	912	19,30	17,60	97,81

➤ Remarque

Une fois que la lixiviation soit terminée, le solide est récupéré pour faire l'analyse de la SAA, en but de déterminer la teneur résiduelle de l'échantillon.

Pour estimer le taux de récupération de l'or en fonction du temps de séjour (de lixiviation) nous avons opté pour la récupération Analyisée de l'or.

Il faut d'abord mesurer la concentration de l'or dans la solution récupérée, ensuite calculer le taux de récupération de l'or extrait en utilisant la formule suivante :

$$\text{Taux de récupération} = \frac{Q_{te \text{ d'Or lixivié}} * 100 * 1000}{CAu_i * m} \quad (\text{Equation III.1})$$

$$Q_{te \text{ d'Or lixiviée}} = \frac{CAu * V}{1000} \quad (\text{Equation III.2})$$

Avec :

CAu : la teneur en Or en (g/t) ;

V : volume de la solution en (ml) ;

m : la masse du minerai en (g).

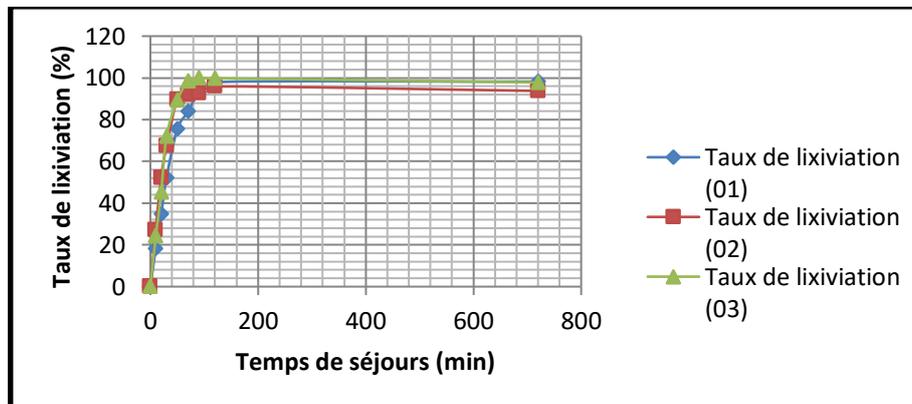


Figure III.1 : Comparaison des évolutions du taux de lixiviation des 03 essais en fonction du temps de séjours.

➤ Remarque

On remarque que le taux de lixiviation se stabilise après **02 heures**, donc le temps de séjour est **02 heures** avec un taux maximal de récupération de **98%**. La vitesse de lixiviation est rapide et le rendement est meilleur dans ces conditions.

➤ Interprétation

La (figure III.1) résume les résultats des tests de lixiviation réalisés qui analysent l'évolution des taux de la récupération de l'or en fonction du temps de séjour.

On remarque en premier lieu, que les trois courbes sont sensiblement similaires et très proches à la récupération complète (**100%**), cela explique que tous les paramètres conditionnés sont vérifiés. La différence de la quantité initiale et finale d'or reste dans le résidu (le gâteau de la filtration) et pourra être récupérée par un second traitement.

En deuxième lieu, on remarque clairement que l'évolution du taux de cyanuration de tous les tests est caractérisée par deux phases :

- ✓ **De (t=0min à t=80min)** : une augmentation remarquable atteignant les valeurs maximales, cela indique que l'équilibre est atteint après un temps **t=80min**, c'est le temps de séjours de cyanuration (récupération de l'or et consommation du cyanure) ;
- ✓ **De (t=80min à t=720min)** : une stabilisation régulière des taux de lixiviation car la majeure quantité de l'or est récupérée durant la première phase.

2^{ème} PARTIE : CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DU CHARBON ACTIF

Dans cette partie du chapitre, nous allons présenter les résultats de la caractérisation des trois types de charbon utilisés à savoir :

- ✓ Charbon vierge ;
- ✓ Charbon chargé de particules d'or ;
- ✓ charbon désorbé ou régénéré.

La connaissance des propriétés physico-chimiques et structurales d'un charbon actif est nécessaire pour contribuer à la compréhension des phénomènes d'adsorptions et de désorptions. Dans le cas de l'industrie aurifère, c'est une étape cruciale puisqu'elle détermine le taux d'extraction de l'or. Pour cela, nous avons étudié les paramètres intrinsèques des trois types de charbon tels que : **la détermination de taux d'humidité, taux de cendre, pH, la densité apparente de l'adsorbant et la porosité apparente.**

Dans le cadre de ce travail nous avons effectué ces analyses selon les normes *AFNOR XP CEN/TS (14775* pour les cendres) et *(14774-3* pour l'humidité). Pour s'assurer de la reproductibilité des résultats, les expériences ont été répétées à plusieurs reprises.

III.2. ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES DU CHARBON ACTIF (VIERGE, CHARGE ET DESORBE)

III.2.1. L'analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique par tamisage sont résumés dans le tableau ci-dessous, et présentés dans les courbes de la (*figure III.2*), (*figure III.3*) et (*figure III.4*).

Tableau III.2 : Résultats de l'analyse granulométrique par tamisage des trois types de charbon.

Diamètres moyens (mm)	Charbon vierge		Charbon chargé		Charbon désorbé	
	Rendement cumulatif du refus <i>Rc (%)</i>	Rendement cumulatif du tamisât <i>Tc (%)</i>	Rendement cumulatif du refus <i>Rc (%)</i>	Rendement cumulatif du tamisât <i>Tc (%)</i>	Rendement cumulatif du refus <i>Rc (%)</i>	Rendement cumulatif du tamisât <i>Tc (%)</i>
3,00	0,00	100	0,00	100	0,00	100
1,59	90,15	9,85	70,77	29,23	70,25	29,75
0,945	97,97	2,03	99,26	0,74	99,59	0,41
0,480	98,71	1,29	99,61	0,39	99,98	0,02
0,125	99,45	0,55	99,67	0,33	100	0,00
<0,125	100	0,00	100	0,00	100	0,00

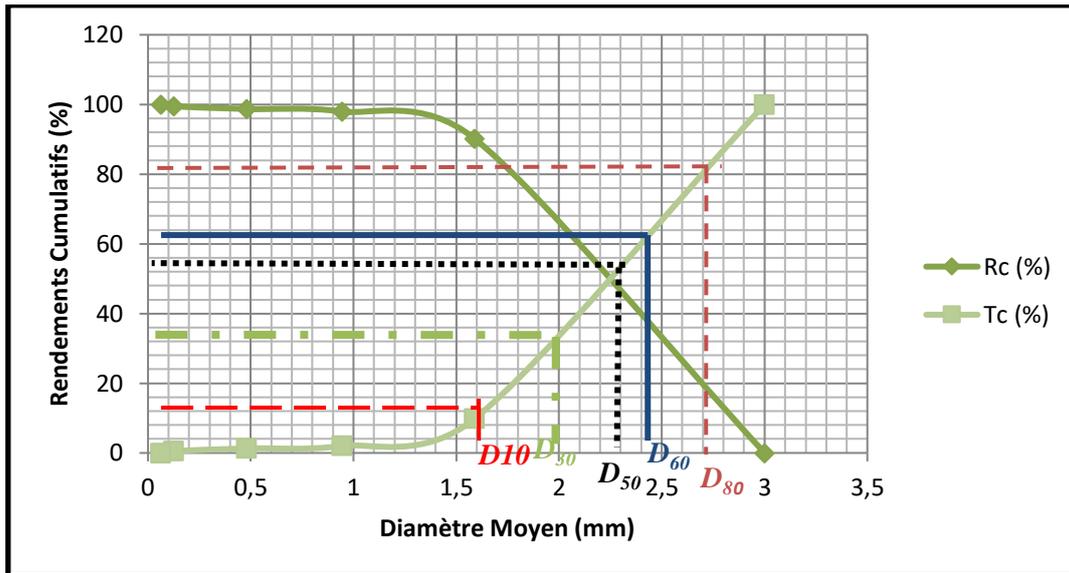


Figure III.2 : Distribution granulométrique du charbon actif vierge en fonction du diamètre moyen des tamis.

➤ Calculs des coefficients granulométriques du charbon vierge

- Coefficient de HAZEN (coefficient d'uniformité)

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{2,40}{1,60} = 1,50$$

- Coefficient de courbure

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{(1,95)^2}{1,60 \times 2,40} = \frac{3,80}{3,84} = 1,00$$

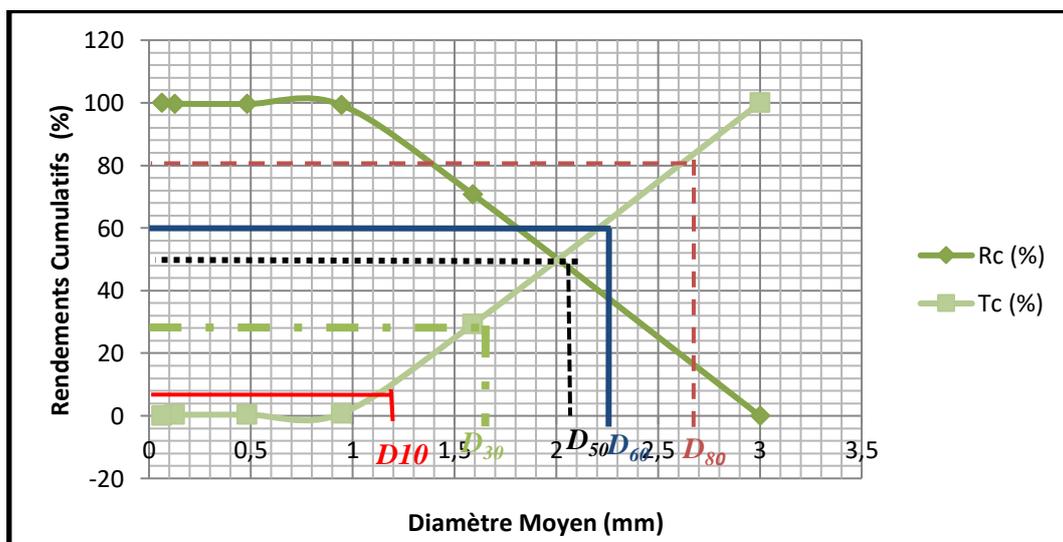


Figure III.3 : Distribution granulométrique du charbon actif chargé en fonction du diamètre moyen des tamis.

➤ Calculs des coefficients granulométriques du charbon chargé

- Coefficient de HAZEN (coefficient d'uniformité)

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{2,20}{1,15} = 1,91$$

- Coefficient de courbure

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{(1,60)^2}{1,15 \times 2,20} = \frac{2,56}{2,53} = 1,01$$

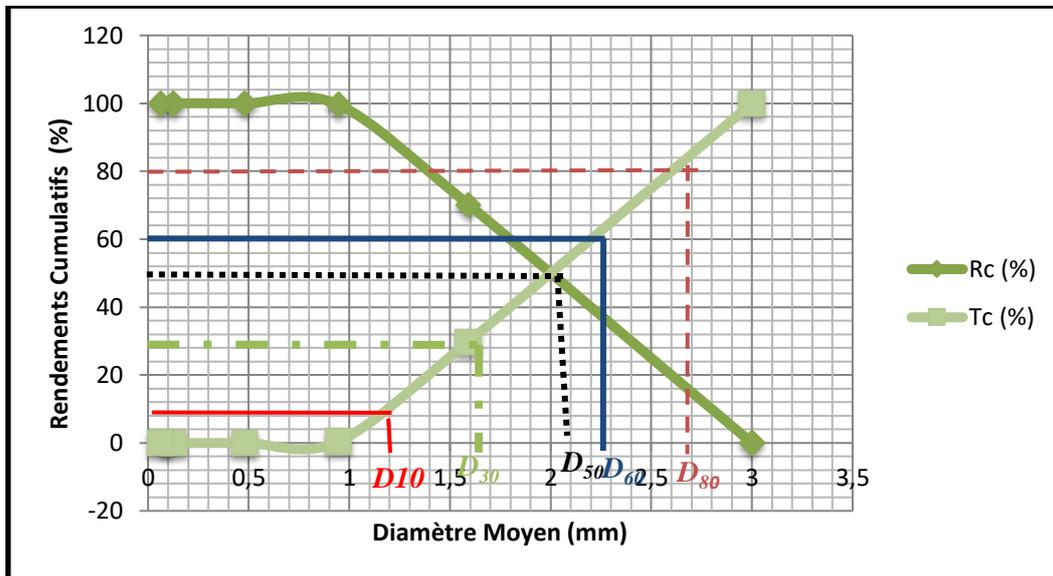


Figure III.4 : Distribution granulométrique du charbon actif désorbé en fonction du diamètre moyen des tamis.

➤ Calculs des coefficients granulométriques du charbon désorbé

- Coefficient de HAZEN (coefficient d'uniformité)

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{2,20}{1,15} = 1,91$$

- Coefficient de courbure

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{(1,60)^2}{1,15 \times 2,20} = \frac{2,56}{2,53} = 1,01$$

➤ Remarque

D'après les figures, nous remarquons que les deux courbes d'évolutions des rendements se croisent dans un point **D₅₀** (pour les trois types de charbon). Le point d'intersection correspond au diamètre de la maille du tamis qui permet le passage de **50%** du matériau de départ.

D'après les résultats des calculs de coefficients granulométriques, on constate que :

✓ Pour le charbon vierge :

- $Cu=1,5 < 2$, la granulométrie du charbon vierge est **serrée (uniforme)**.
- $Cc=1$, la granulométrie de notre charbon vierge est **bien graduée (continuité bien répartie)**.

✓ Pour le charbon chargé :

- $Cu=1,91 < 2$, la granulométrie du charbon chargé est **serrée (uniforme)**.
- $1 < Cc=1,01 < 3$; la granulométrie de notre charbon chargé est **bien graduée (continuité bien répartie)**.

✓ Pour le charbon désorbé :

- $Cu=1,91 < 2$; la granulométrie du charbon désorbé est **serrée (uniforme)**.
- $1 < Cc=1,01 < 3$; la granulométrie de notre charbon désorbé est **bien graduée (continuité bien répartie)**.

III.2.2. Analyse de la teneur en Or

Pour calculer la teneur en or dans les deux types de charbon (chargé et désorbé) et surtout pour savoir le taux de désorption, nous avons effectué deux essais sur les charbons utilisés à l'usine. Les résultats sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau III.3 : Résultats de la teneur en or des charbons chargé et désorbé du circuit de l'usine.

<i>Teneur en Or</i>	<i>Charbon chargé</i>	<i>Charbon désorbé</i>
	<i>(g/t)</i>	
Essai N°01	1830	80
Essai N°02	1520	90
<i>Moyenne</i>	<i>1675 g/t</i>	<i>85 g/t</i>

⇒ Remarque

D'après les résultats, nous remarquons que le taux de désorption est avoisinant à **95%**, ce qui est un bon résultat indiquant le bon déroulement de l'opération de désorption. La quantité de l'or résiduel estimée à environ **85g/t** est une valeur acceptable vu que tous les procédés de désorption existant actuellement ne peuvent adsorber plus.

III.2.3. Le taux d'humidité

Les taux d'humidité correspondent à l'eau libre d'hydratation qui s'évapore à partir de 100°C . Un bon charbon industriel est caractérisé par un taux d'humidité inférieur à 5% (ASTM D2867). Les résultats du taux d'humidité des trois types de charbon sont illustrés dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.4 : Résultats du taux d'humidité des trois types de charbon.

N° du test	Charbon vierge		Charbon chargé		Charbon désorbé	
	m1 – m2	Taux d'humidité	m1 – m2	Taux d'humidité	m1 – m2	Taux d'humidité
	(g)	(%)	(g)	(%)	(g)	(%)
01	0,30	3,00	0,30	2,00	0,10	0,67
02	0,48	2,40	0,10	1,00	0,10	1,00
03	1,17	2,34	0,10	1,25	0,40	1,33
04	0,30	2,00	0,40	1,82	0,30	1,20
05	0,57	1,90	0,40	1,33	0,60	1,20
Moyenne	0,56 g	2,33 %	0,26 g	1,43%	0,30 g	1,08 %

➤ Remarque

Pour le charbon vierge, nous avons remarqué que la moyenne du taux d'humidité est de 2,33% (<5%). Nos résultats sont en bon accord avec d'autres résultats [36,37].

➤ Interprétation

le charbon vierge est plus humide que le charbon chargé et désorbé, ceci peut être expliqué par le fait que le charbon vierge possède plus de sites libres qui lui permettent d'attirer plus de molécules d'eau, par contre, les pores du charbon chargé ont été saturés de carbonates, métaux et autres.

Des taux plus faibles sont enregistrés pour les deux charbons actifs (chargé et désorbé). Ceci est compréhensible dans la mesure où les deux derniers sont déjà utilisés dans la chaîne de production où il ya plusieurs facteurs qui font baisser ce taux.

III.2.4. Le taux de la cendre

Le taux de cendre est mesuré uniquement pour le charbon vierge puisque pour les autres types de charbon, la cendre a été éliminée au cours du lavage effectué au niveau de l'usine. Selon ASTM D2866, le taux de cendres ne doit pas dépasser 5%. Les résultats sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau III.5 : Résultats du taux de la cendre du charbon vierge.

N° du test	Charbon vierge	
	m1 – m2	Taux de cendre
	(g)	(%)
01	0,31	3,19
02	0,85	4,33
03	1,20	2,44
04	0,44	2,99
05	0,60	2,03
Moyenne	0,68 g	2,99 %

⇒ Interprétation

La valeur moyenne du taux de cendre enregistrée (tableau III.5) **2,99%** est un présage de la bonne qualité du charbon actif. Il ressort qu'un taux de cendre élevé diminue la surface spécifique. En effet, la nature inorganique des cendres, rend le processus d'activation difficile car elles bouchent les pores de la structure carbonée [37,38].

III.2.5. La résistance à l'abrasion (la dureté ou Hardness) et le taux de friabilité

La dureté mesure la résistance du charbon à l'attrition. C'est un indicateur important pour étudier la résistance du charbon aux manipulations, lavages et cycles de désorption éventuelles de ce dernier. Le taux de dureté doit être proche de **98%** d'après ASTM D3802. Les résultats des mesures effectuées sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau III.6 : Résultats des taux de Hardness et de Friabilité des trois types de charbon.

N° du test	Charbon vierge			Charbon chargé			Charbon désorbé		
	m1 – m2	Taux de friabilité	Taux de dureté	m1 – m2	Taux de friabilité	Taux de dureté	m1 – m2	Taux de friabilité	Taux de dureté
	(g)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)
01	1,00	2,00	98,00	0,60	1,20	98,80	1,85	3,70	96,30
02	0,50	2,50	97,50	0,70	1,40	98,60	1,45	2,90	97,10
03	0,40	1,66	98,34	0,40	1,02	98,98	0,90	3,60	96,40
04	0,90	2,31	97,79	0,20	1,00	99,00	0,60	1,54	98,46
05	1,20	2,40	97,60	0,30	1,20	98,80	0,70	3,50	96,50
Moyenne	1,00 g	2,17%	97,83%	0,44 g	1,16 %	98,84%	1,10 g	3,05 %	96,95%

⇒ **Interprétation**

Les taux de friabilité et de dureté sont dans les normes indiquant la bonne qualité des trois types de charbon pour une utilisation industrielle. La variation remarquée entre les trois types de charbon est due probablement à la cendre existante.

III.2.6. La densité apparente

Elle rend compte de la masse de matériau contenue dans un volume donné, comprenant le volume d'air interstitiel. Une valeur de +/- 475 kg.m⁻³ (ASTM D2854) est exigée pour un charbon actif vierge. Une densité apparente élevée est l'indicateur d'un volume d'activité supérieure, donc d'une qualité optimale du charbon. Les résultats sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau III.7 : Résultats de la densité apparente des trois types de charbon.

N° du test	Charbon vierge			Charbon chargé			Charbon désorbé		
	Masse charbon sec (Kg)*10 ⁻³	Volume charbon sec (m ³)*10 ⁻⁶	La densité apparente (Kg/m ³)	Masse charbon sec (Kg)*10 ⁻³	Volume charbon sec (m ³)*10 ⁻⁶	La densité apparente (Kg/m ³)	Masse charbon sec (Kg)*10 ⁻³	Volume charbon sec (m ³)*10 ⁻⁶	La densité apparente (Kg/m ³)
01	10,00	23,00	430	7,00	11,00	640	6,00	10,00	600
02	25,00	55,00	450	13,00	20,00	650	19,00	28,00	680
03	30,00	66,00	450	10,00	15,00	670	14,00	21,00	670
04	5,00	12,00	420	25,00	32,00	780	30,00	44,00	680
05	12,00	27,00	440	30,00	45,00	670	26,00	36,00	720
<i>Moyenn e</i>	16,40 kg	36,60 m ³	450 kg/m ³	17,00 kg	24,60 m ³	680 kg/m ³	19,00 kg	27,80 m ³	670 kg/m ³

⇒ **Interprétation**

La densité du charbon vierge concorde bien avec les normes internationales. La plus grande densité est obtenue dans le cas du charbon chargé, vu la présence des molécules d'or et d'autres métaux.

III.2.7. Le pH

Le *pH* est un paramètre essentiel à prendre en compte dans les processus d'adsorption puisqu'il agit sur l'état d'ionisation de la surface de l'adsorbant et la forme chimique de l'adsorbat.

La mesure directe du potentiel hydrogène des trois types de charbon est la suivante :

Tableau III.8 : Résultats des mesures du pH des trois types de charbon.

N° du test	Charbon vierge		Charbon chargé		Charbon désorbé	
	Masse charbon sec	pH	Masse charbon sec	pH	Masse charbon sec	pH
	(g)		(g)		(g)	
01	3,00	10,17	2,00	9,77	8,00	10,46
02	5,00	10,21	3,00	9,72	4,00	10,46
03	7,00	10,23	8,00	9,55	11,00	10,44
04	4,00	10,22	4,00	9,66	15,00	10,44
05	9,00	10,10	13,00	9,54	10,00	10,45
Moyenne	5,60 g	10,19	6,00 g	9,65	9,60 g	10,45

⇒ Interprétation

D'après le tableau, les *pH* des trois types sont estimés aux alentours de **10**. Ce *pH* est efficace pour une grande adsorption des ions aurifère.

Le *pH* alcalin du charbon actif utilisé dans le circuit de traitement de l'*ENOR* revient à la nature de la matière première du charbon (coquille de noix de coco) qui est d'une nature organique basique.

On remarque que le *pH* du charbon chargé est légèrement inférieur que les *pH* des charbons vierge et désorbé, cela est due à l'adsorption du charbon actif des matières acides existantes dans le minerai aurifère, et aussi à la présence du *CN* dans ce charbon.

III.2.8. La porosité apparente

La porosité est l'ensemble des vides (pores) d'un matériau solide, ces vides sont remplis par des fluides (liquide ou gaz). C'est une grandeur physique comprise entre **0 et 1** (ou, en pourcentage, entre **0 et 100 %**), qui conditionne les capacités d'écoulement et de rétention d'un substrat. Une distribution poreuse correcte est importante pour faciliter l'adsorption et le transfert d'adsorbat à travers le charbon actif.

Le (tableau III.9) résume les résultats des essais de la porosité apparente pour les trois types de charbon actif :

Tableau III.9 : Résultats de la porosité apparente des trois types de charbon.

N° du test	Charbon vierge				Charbon chargé				Charbon désorbé			
	Volume charbon sec	Volume charbon après adsorption	Volume eau + charbon	Porosité apparente	Volume charbon sec	Volume charbon après adsorption	Volume eau + charbon	Porosité apparente	Volume charbon sec	Volume charbon après adsorption	Volume eau + charbon	Porosité apparente
01	4,00	17,00	23,00	56,52	17,00	30,00	56,00	23,21	15,00	33,00	39,00	46,15
02	16,00	43,50	46,00	59,78	12,00	20,00	35,00	22,86	20,00	47,00	60,00	45,00
03	20,00	57,00	60,00	61,67	20,00	33,00	46,00	28,26	10,00	32,00	37,00	59,46
04	30,00	74,00	77,00	57,14	25,00	44,00	59,00	32,20	8,00	21,00	23,00	56,52
05	10,00	33,00	38,00	60,53	15,00	20,00	38,00	13,16	6,00	16,00	17,00	58,82
Moyenne	16,00 ml	44,90 ml	48,80 ml	59,22 %	17,80 ml	29,40 ml	46,80 ml	23,94 %	11,80 ml	29,80	35,20 ml	53,19 %

↻ Interprétation

D'après les résultats du (*tableau III.9*), on remarque que la porosité du charbon vierge est la plus élevée (**59,22%**) suivie du charbon désorbé (régénéré) qui représente **53,19%** et la plus faible porosité est enregistrée pour le charbon chargé. Le plus intéressant à remarquer est que le charbon désorbé présente une porosité élevée comparable à celle du charbon vierge, ce résultat nous laisse dire que la régénération de ce genre de charbon est efficace.

3^{ème} PARTIE : CAPACITE D'ADSORPTION DU CHARBON ACTIF

III.3. CAPACITE D'ADSORPTION DU CHARBON ACTIF VIERGE

III.3.1. Capacité d'adsorption du charbon actif vierge en solution aurifère synthétique

La première série d'essais est effectuée sur une solution aurifère synthétique. Une solution aurifère synthétique est une solution préparée au laboratoire à partir d'une solution mère riche en *Au*. Nous avons changé la concentration de la solution de *5g/t*, *10g/t*, *20g/t*, *50g/t* et *100g/t*. Les concentrations sont préparées à partir d'une solution mère de *1g/t*. les résultats sont mentionnés dans le (tableau III.10).

Les paramètres fixes de ces essais sont :

- ✓ pH alcalin (10-11) ;
- ✓ Température ne dépasse pas 30 °C ;
- ✓ Masse de cyanure = 0.3g (300ppm) ;
- ✓ Masse du charbon ajouté = 2g ;
- ✓ Temps d'adsorption = 360min (6h).

Les résultats sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau III.10 : Résultats des tests d'adsorption du charbon vierge en solutions synthétiques.

Concentration de la solution	Temps d'adsorption	Volume du prélèvement	Teneur en Au	Quantité d'or adsorbée	Taux d'adsorption
(g/t)	(min)	(ml)	(g/t)	(mg)	(%)
05 g/t	0	500	4,89	0,00	0,00
	10	497	2,99	0,90	38,62
	20	494	1,82	1,50	62,03
	30	491	0,99	1,90	78,32
	50	488	0,54	2,10	86,82
	70	485	0,24	2,30	92,24
	90	482	0,08	2,30	94,82
	120	479	0,03	2,30	95,21
	180	476	0,01	2,30	95,01
	240	473	0,01	2,30	94,41
	360	470	0,01	2,30	93,81

<i>10 g/t</i>	0	500	9,64	0,00	0,00
	10	497	6,05	1,78	38,44
	20	494	3,60	2,98	64,28
	30	491	2,58	3,47	74,28
	50	488	1,25	4,09	88,20
	70	485	0,78	4,30	92,57
	90	482	0,51	4,40	94,80
	120	479	0,46	4,40	94,73
	180	476	0,26	4,46	96,18
	240	473	0,17	4,48	96,50
	360	470	0,08	4,49	96,79
<i>20 g/t</i>	0	500	18,91	0,00	0,00
	10	497	11,74	3,56	37,69
	20	493	7,94	5,41	57,20
	30	489	5,60	6,51	68,84
	50	485	3,23	7,60	80,43
	70	481	2,13	8,07	85,36
	90	477	1,61	8,25	87,28
	120	473	1,22	8,37	88,50
	180	469	1,00	8,40	88,84
	240	465	0,92	8,37	88,48
	360	461	0,89	8,31	87,86
<i>50 g/t</i>	0	525	48,95	0,00	0,00
	10	521	30,32	9,71	43,93
	20	517	22,33	13,76	62,29
	30	513	17,69	16,04	72,58
	50	509	12,00	18,81	85,12
	70	505	9,35	20,00	90,51
	90	501	7,47	20,78	94,06
	120	497	5,75	21,47	97,18
	180	493	4,50	21,91	99,18
	240	489	4,39	21,79	98,62
	360	485	4,19	21,71	98,25

100 g/t	0	550	87,00	0,00	0,00
	10	547	53,75	18,19	39,75
	20	543	43,04	23,87	52,18
	30	539	36,94	26,98	58,98
	50	535	27,92	31,61	69,09
	70	531	22,50	34,25	74,86
	90	527	19,96	35,33	77,22
	120	523	16,64	36,80	80,43
	180	519	14,07	37,58	82,73
	240	515	13,72	37,74	82,49
	360	511	13,60	37,51	81,98

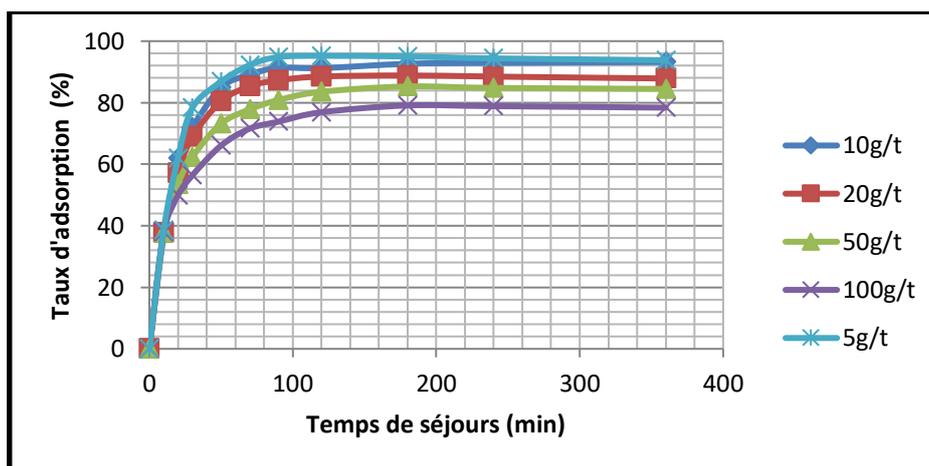


Figure III.5 : Variations du taux d'adsorption en fonction du temps de séjours enregistrées dans le cas du charbon vierge dans une solution aurifère synthétique à différentes concentrations.

⇒ Interprétation

Dans les cas présentés dans la figure ci-dessus, la vitesse d'adsorption est rapide en début du processus et devient de plus en plus lente au cours du temps pour atteindre l'équilibre. Au bout de **80 min**, la quantité d'or adsorbée n'évolue plus, caractéristique de l'état d'équilibre entre l'or et le charbon actif.

On peut dire que la cinétique d'adsorption se déroule en deux étapes :

La première étape est rapide et correspond au transfert de la masse externe, tandis que la deuxième étape est lente et correspond à la phase de diffusion des ions d'or dans les pores du charbon.

Il est à noter que la meilleure adsorption est enregistrée à une concentration de **50g/t** et qui est estimée à **92,18%**. Tous les taux enregistrés dans les autres concentrations sont des taux d'adsorption élevés (**de 82,73% à 96,79%**) comparables à la concentration **50g/t**.

Nous avons remarqué aussi que le taux de rétention varie légèrement de la concentration faible à la concentration forte, c'est logique parce que le charbon est saturé au fur et à mesure que la concentration augmente.

III.3.2. Capacité d'adsorption du charbon actif vierge en solution aurifère réelle

Une deuxième série d'essais pour l'adsorption du charbon actif vierge est suggérée. Pour cela, nous avons mis du minerai aurifère dans des bouteilles roulantes en respectant les conditions de lixiviations dont les résultats ont été notés et interprétés dans la 1^{ère} partie de ce chapitre.

Nous avons effectué trois essais avec une solution aurifère réelle qui correspond au filtrat de la lixiviation, autrement dit, la solution issue des essais de lixiviations effectués. La différence entre les trois essais est la teneur en or initiale du minerai qui a un effet direct sur la teneur initiale des solutions résultantes. Les paramètres invariables de ces trois essais sont :

- ✓ **pH** alcalin (10-11) ;
- ✓ **Température** ne dépasse pas 30 °C ;
- ✓ Masse de **cyanure** = 0,3g (300ppm) ;
- ✓ Masse du **charbon ajouté** = 2g ;
- ✓ **Temps** d'adsorption = 360min (6h).

Tous les résultats des tests sont regroupés dans le (Tableau III.11) :

Tableau III.11 : Résultats des tests d'adsorption du charbon vierge en solutions aurifères réelles.

N° de l'essai	Temps d'adsorption	Volume du prélèvement	Teneur en Au	Quantité d'or adsorbée	Taux d'adsorption
	(min)	(ml)	(g/t)	(mg)	(%)
<i>Essai N°01</i>	0	500	24,86	0,00	0,00
	10	496	16,12	4,30	34,60
	20	492	11,06	6,79	54,62
	30	488	7,48	8,48	68,23
	50	484	3,43	10,37	83,44
	70	480	3,03	10,48	84,30
	90	476	2,20	10,79	86,78
	120	472	1,51	11,02	88,67
	180	468	1,08	11,13	89,53
	240	464	0,56	11,28	90,71
	360	460	0,26	11,32	91,04
<i>Essai N°02</i>	0	500	20,30	0,00	0,00
	10	497	12,29	3,98	39,22
	20	494	8,15	6,00	59,13
	30	491	5,56	7,24	71,30
	50	488	3,33	8,28	81,59
	70	485	2,08	8,84	87,06
	90	482	1,27	9,17	90,37
	120	479	0,95	9,27	91,32
	180	476	0,52	9,42	92,76
	240	473	0,33	9,45	93,06
	360	470	0,19	9,45	93,12
<i>Essai N°03</i>	0	500	21,26	0,00	0,00
	10	497	14,03	3,59	33,80
	20	493	10,00	5,55	52,22
	30	489	7,41	6,77	63,71
	50	485	4,97	7,90	74,32
	70	481	3,63	8,48	79,77
	90	477	2,76	8,82	83,02
	120	473	2,14	9,04	85,08
	180	469	1,72	9,16	86,21
	240	465	1,51	9,18	86,39
	360	461	1,44	9,14	85,96

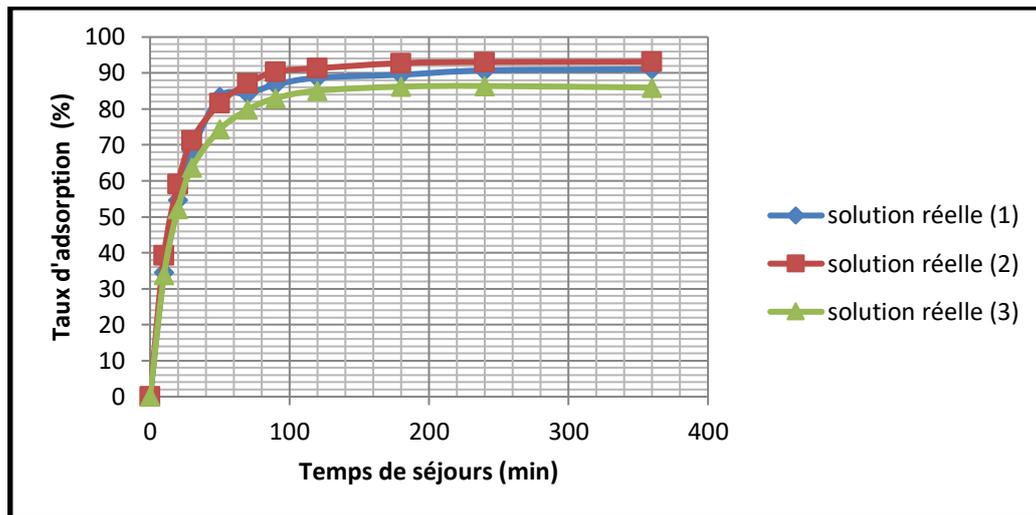


Figure III.6 : Variation du taux d'adsorption en fonction du temps de séjours dans le cas d'un charbon vierge dans une solution aurifère réelle à plusieurs concentrations.

↪ Interprétation

En vue de ces résultats, nous pouvons constater que les cinétiques présentent deux étapes distinctes. La première étape est rapide et correspond au transfert de masse externe tandis que la seconde est lente et est liée au phénomène de diffusion (transfert de masse interne). Au cours de la première étape, il y a une augmentation rapide jusqu'à environ **80 min**.

Les taux d'adsorption enregistrés varient entre **86,39% à 93,12 %** qui sont considérés comme des taux élevés dans l'industrie aurifère. Il est à noter que le taux d'adsorption ne dépend pas de la concentration de l'or initiale, ce qui signifie que le taux est une caractéristique intrinsèque du charbon.

III.3.3. Capacité d'adsorption du charbon actif vierge en pulpe

Afin d'étudier la capacité d'adsorption du charbon actif en pulpe, nous avons effectué un essai d'adsorption du charbon actif vierge en pulpe contenant **50%** de matière solide de granulométrie inférieure à **0,75 μ m**. La pulpe se compose de plusieurs minéraux autres que l'or.

Pour assurer ce test, nous avons préparé une pulpe en mélangeant **500g** de minerai aurifère d'une teneur initiale en or connue avec **500ml** d'eau distillée. Nous avons ajouté le cyanure et porter la pulpe dans la bouteille roulante à l'agitation afin d'assurer les conditions de cyanuration.

Après que le temps de cyanuration est épuisé, on ajoute le charbon actif vierge pour passer à l'étape d'adsorption. Les résultats sont rapportés dans le (tableau III.12). Les conditions opératoires de cet essai sont :

- ✓ **pH** alcalin (10-11) ;
- ✓ **Température** ne dépasse pas 30 °C ;
- ✓ **Masse du minerai** = 500g ;
- ✓ **Volume de la solution** = 1000ml ;
- ✓ **Temps de cyanuration** = 2h ;
- ✓ **Masse de cyanure** = 0,3g (300ppm) ;
- ✓ **Masse du charbon ajouté** = 2g ;
- ✓ **Temps d'adsorption** = 360min (6h).

Tableau III.12 : Résultats du test d'adsorption du charbon vierge en pulpe.

<i>N° de l'essai</i>	<i>Temps d'adsorption</i>	<i>Volume du prélèvement</i>	<i>Teneur en Au</i>	<i>Quantité d'or adsorbée</i>	<i>Taux d'adsorption</i>
	<i>(min)</i>	<i>(ml)</i>	<i>(g/t)</i>	<i>(mg)</i>	<i>(%)</i>
<i>Essai 01</i>	0	1000	18,47	0,00	0,00
	10	990	12,95	5,50	29,84
	20	980	10,61	7,70	42,06
	30	970	10,45	7,80	42,47
	50	960	8,15	9,90	54,09
	70	950	6,97	10,90	59,65
	90	940	5,84	11,90	64,82
	120	930	4,74	12,80	69,71
	150	920	4,12	13,20	72,08
	180	910	3,58	13,50	73,98
	240	900	2,95	14,00	76,26
	300	890	2,36	14,30	78,28
	360	880	1,95	14,50	79,37

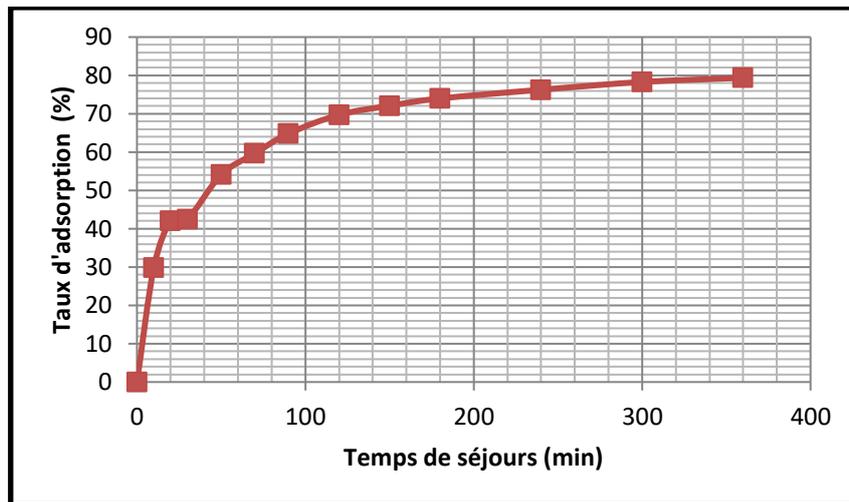


Figure III.7 : Variation du taux d'adsorption en fonction du temps -cas d'un charbon vierge dans une pulpe-

⇒ **Interprétation**

Il ressort de ces résultats que dans une pulpe de 50%, l'équilibre est atteint après 2h, ce qui signifie que la cinétique d'adsorption est plus lente par rapport aux autres solutions (synthétique et réelle). Ceci est due à la composition de la pulpe, qui en plus des ions aurifères elle contient aussi d'autres minéraux en particulier la silice qui est un élément néfaste pour l'adsorption.

⇒ **Comparaison entre les essais d'adsorption du charbon vierge en pulpe et l'adsorption du charbon vierge en solution aurifère réelle**

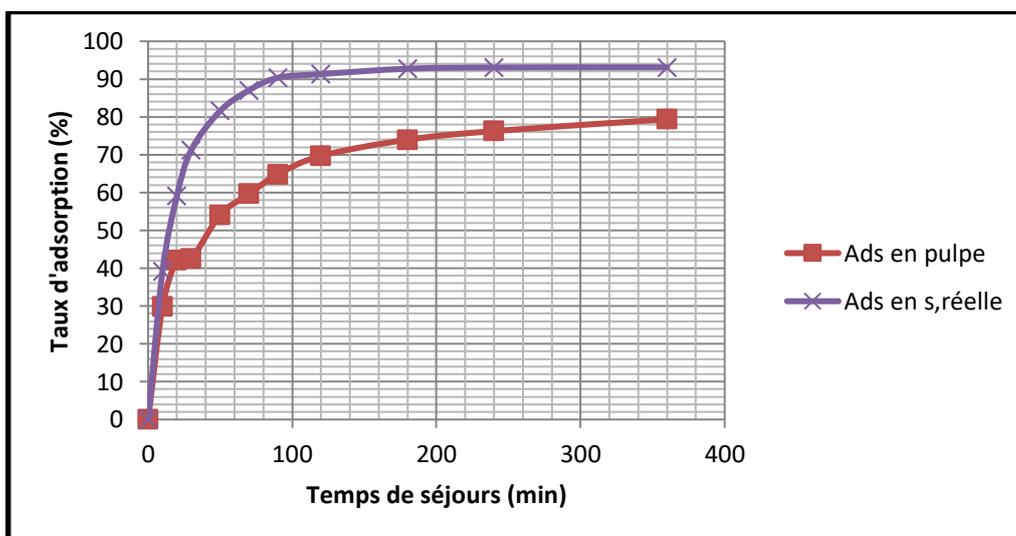


Figure III.8 : Comparaison des taux d'adsorption du charbon actif en pulpe et en solution réelle en fonction du temps.

↗ Interprétation

La meilleure rétention est obtenue en solution réelle, ceci est compréhensible dans la mesure où la silice entre en compétition avec le charbon actif en raison de sa grande capacité adsorptive. Il est à noter que le **pH** du milieu a une grande influence sur le rendement, il doit être entre 10 et 10,5.

III.4. CAPACITE D'ADSORPTION DU CHARBON ACTIF DESORBE

III.4.1. Capacité d'adsorption du charbon actif désorbé en solution aurifère synthétique

Afin de comparer entre la capacité d'adsorption du charbon vierge et celle du charbon désorbé, une autre série d'essais d'adsorption sur des solutions synthétiques en bouteilles roulantes est effectué. Nous avons changé la concentration de la solution de **5g/t, 20g/t, 50g/t et 100g/t**, et fixait les autres paramètres. Les résultats sont regroupés dans le (*tableau III.13*).

Tableau III.13 : Résultats des tests d'adsorption du charbon désorbé en solutions synthétiques.

<i>Concentration de la solution</i>	<i>Temps d'adsorption</i>	<i>Volume du prélèvement</i>	<i>Teneur en Au</i>	<i>Quantité d'or adsorbée</i>	<i>Taux d'adsorption</i>
<i>(g/t)</i>	<i>(min)</i>	<i>(ml)</i>	<i>(g/t)</i>	<i>(mg)</i>	<i>(%)</i>
05 g/t	0	500	4,60	0,00	0,00
	10	497	3,60	0,50	23,86
	20	493	2,85	0,86	41,42
	30	489	2,50	1,03	49,30
	50	485	2,14	1,19	57,27
	70	481	1,80	1,35	64,65
	90	477	1,69	1,39	66,63
	120	473	1,65	1,40	66,98
	180	469	1,55	1,43	68,67
	240	465	1,42	1,48	70,98
	360	461	1,33	1,51	72,37

<i>20 g/t</i>	0	500	19,29	0,00	0,00
	10	496	16,96	1,17	12,13
	20	492	15,75	1,74	18,13
	30	488	14,80	2,19	22,81
	50	484	14,09	2,52	26,20
	70	480	13,89	2,59	26,98
	90	476	13,36	2,82	29,38
	120	472	12,47	3,22	33,50
	180	468	11,95	3,44	35,75
	240	464	10,66	4,00	41,68
	360	460	10,18	4,19	43,62
<i>50 g/t</i>	0	500	52,60	0,00	0,00
	10	496	42,88	4,82	19,01
	20	492	26,61	12,79	50,41
	30	488	20,05	15,88	62,63
	50	484	12,93	19,20	75,70
	70	480	10,29	20,31	80,07
	90	476	8,43	21,02	82,89
	120	472	7,17	21,44	84,54
	180	468	5,16	22,20	87,53
	240	464	3,72	22,68	89,42
	360	460	2,11	23,53	91,57
<i>100 g/t</i>	0	500	101,80	0,00	0,00
	10	496	94,90	3,42	8,23
	20	492	92,10	4,77	11,47
	30	488	86,00	7,71	18,53
	50	484	84,00	8,62	20,71
	70	480	76,60	12,10	29,08
	90	476	69,80	15,23	36,61
	120	472	68,10	15,91	38,24
	180	468	57,80	20,59	49,50
	240	464	50,80	23,66	56,88
	360	460	42,49	27,28	65,58

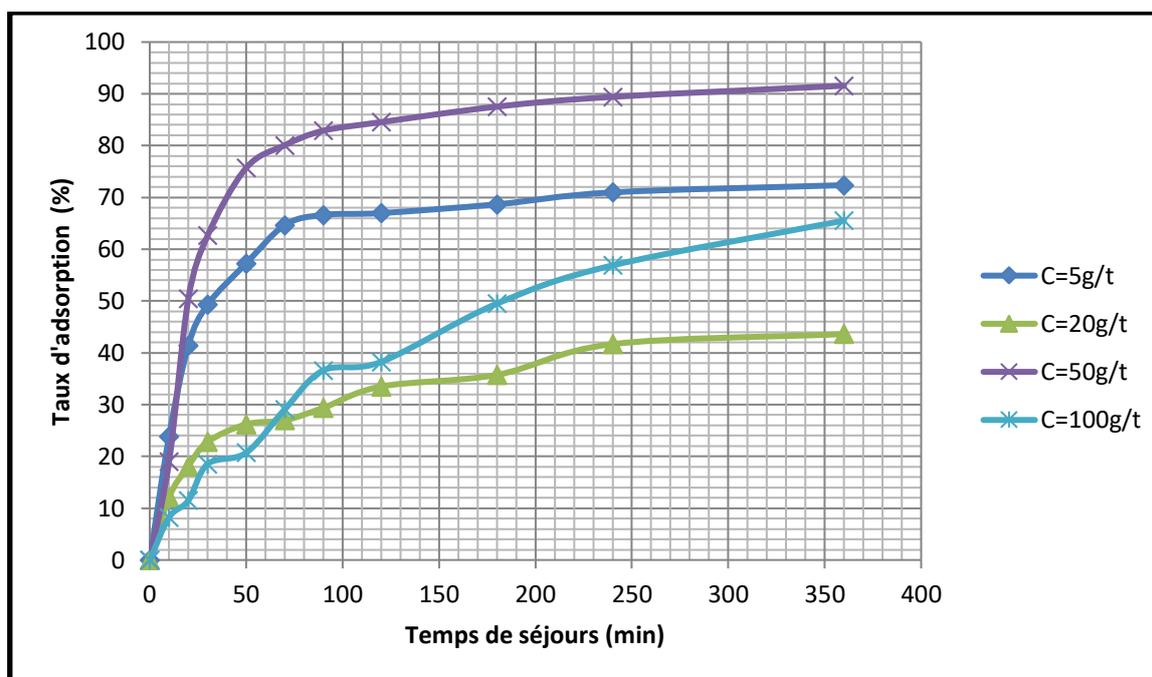


Figure III.9 : Variation du taux d'adsorption du charbon désorbé en solution synthétique à différentes concentrations en fonction du temps.

⇒ Interprétation

Pour le charbon désorbé, la figure ci-dessus montre que la vitesse d'adsorption est nettement plus lente dépassant les **05h** parfois, sauf pour les deux tests (**50g/t et 5g/t**) là où le comportement du charbon désorbé est le même que le charbon vierge, du point de vue du temps de séjour et taux d'adsorption, cela s'explique par l'augmentation de la température après la première heure quand elle a dépassé les **38°C**, ce qui a favorisé positivement l'adsorption d'un côté, et d'un autre côté, le charbon actif vierge possède une surface spécifique relativement élevée et une structure poreuse importante qui facilite l'adsorption. En revanche, dans le cas du charbon adsorbé, le nombre des pores est réduit après régénération.

III.5. ETUDE COMPARATIVE DE LA CAPACITE D'ADSORPTION DE L'OR PAR LE CHARBON ACTIF VIERGE ET UTILISE

Tableau III.14 : Comparaison entre la capacité d'adsorption du charbon vierge et charbon désorbé

Teneur (g/t)	Charbon vierge	Charbon désorbé
	Taux d'adsorption maximale (%)	
5	93,81	72,37
20	87,86	43,62
50	98,25	91,57
100	81,98	65,58

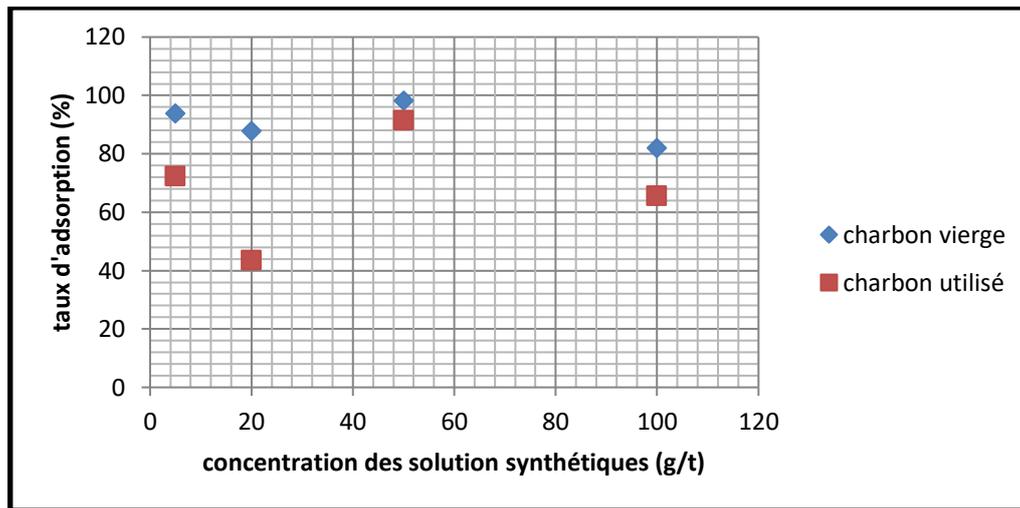


Figure III.10 : Comparaison entre la capacité d'adsorption du charbon vierge et charbon désorbé en fonction des concentrations de solutions synthétiques étudiées.

⇒ Interprétation

Le charbon vierge est nettement mieux que charbon utilisé, cela dit que le charbon utilisé nécessite une réactivation thermique et chimique pour augmenter ses capacités adsorptives.

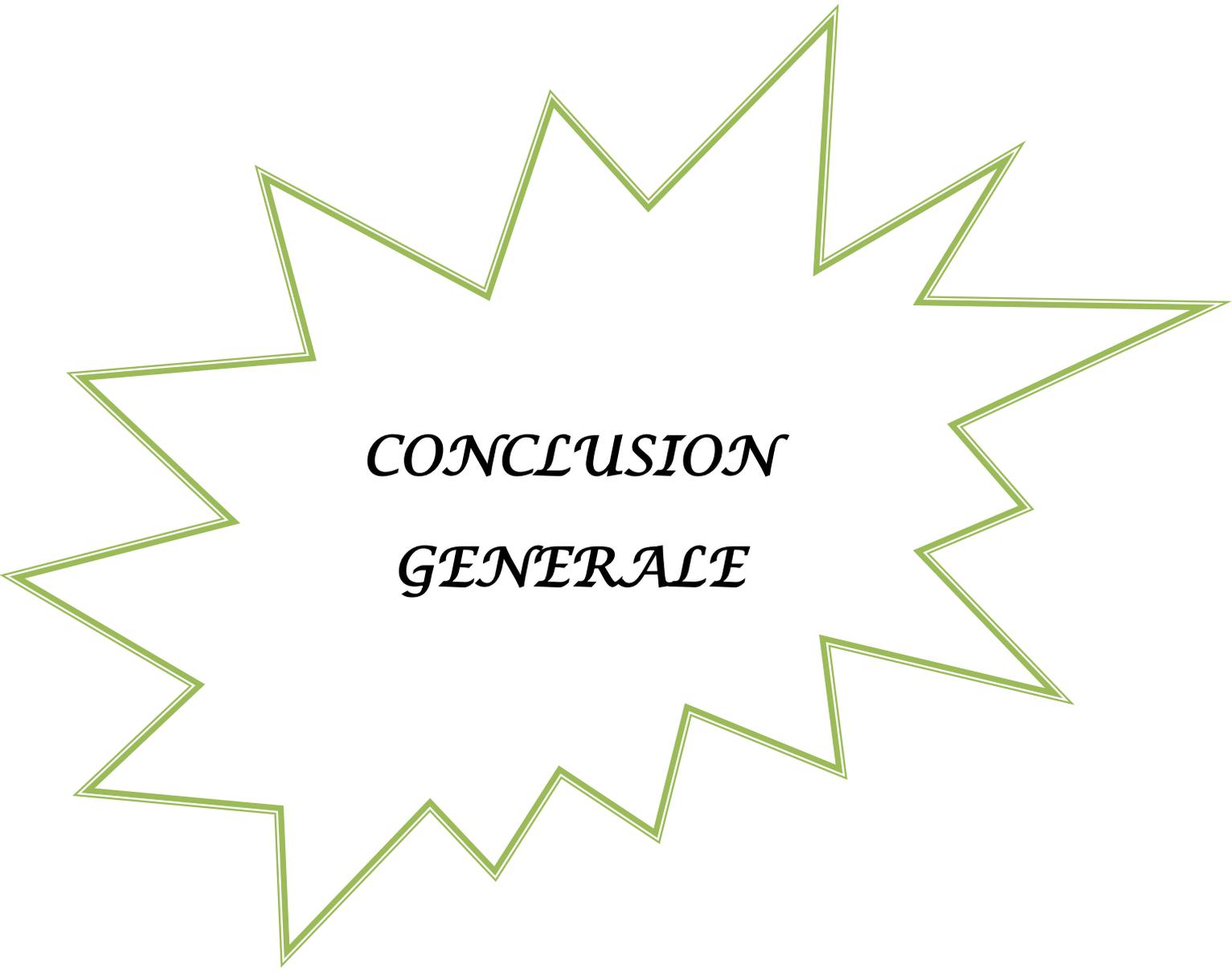
CONCLUSION

Notre étude a été divisée en trois parties pour un seul objectif qui est « *la comparaison des taux d'adsorption de différents charbons actifs dans de diverses solutions* », pour cela, nous avons commencé par les tests de lixiviation, suivi de la caractérisation, jusqu'à atteindre notre but de l'adsorption. Ces tests à leur tour ont eu pour but la préparation des solutions (adsorbats), ainsi que les charbons actifs (adsorbants) afin d'assurer les meilleures conditions d'adsorption, les principaux points tiraient des résultats de ces tests sont :

- ✓ La lixiviation est un procédé obligatoire pour la récupération de l'or car elle permet la dissolution de l'or et la formation du complexe ($AuCn^-$) ;
- ✓ Les conditions nécessaires pour avoir un bon charbon actif d'une adsorption élevées sont (une granulométrie **uniforme et bien graduée**, taux d'humidité inférieur à **5%**, absence de la cendre, taux de dureté proche à **98%**, une densité $\approx 475 \text{kg/m}^3$, et une porosité entre **50 et 70%**).

Les essais réalisés au cours de la *3^{ème} partie* de ce chapitre ont eu pour objectif de comparer les taux d'adsorption de différents charbons actifs dans de diverses solutions. Les principaux points à retenir sont :

- ✓ Dans les solutions aurifères synthétique et réelle, la cinétique d'adsorption est rapide au bout de **80min** et correspond au transfert de la masse externe, tandis qu'elle est lente le long du temps restant et correspond à la phase de diffusion des ions d'or dans la porosité du charbon. Par contre dans une pulpe, la cinétique d'adsorption devient très lente, ceci est due à l'existence de la silice qui empêche l'adsorption ;
- ✓ La concentration n'a pas une grande influence sur le taux d'adsorption, tandis qu'on remarque des rendements excellents à des concentrations moyennes de **50g/t** ;
- ✓ Le taux d'adsorption ne dépend pas de la concentration de l'or initiale, or, l'adsorption est une caractéristique intrinsèque du charbon ;
- ✓ Le taux d'adsorption du charbon désorbé est faible comparé au charbon vierge en raison de nombre de pores diminués, ce qui rend le charbon vierge nettement mieux que charbon désorbé, cela dit que le charbon utilisé nécessite une réactivation thermique et chimique pour augmenter ces capacités adsorptives.



CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans le but de la réalisation de ce modeste travail, nous avons opté pour la caractérisation physico-chimique et la capacité d'adsorption du charbon actif dans l'industrie aurifère.

Notre étude s'est étalée sur une phase d'échantillonnage suivie d'une préparation des échantillons pour en finir par une analyse instrumentale et une interprétation des résultats.

Les principaux points névralgiques dégagés par cette étude sont énumérés comme suit:

- ↻ L'analyse granulométrique montre que le charbon actif (vierge, chargé et désorbé) est d'une granulométrie serrée et bien graduée ;
- ↻ Les taux d'humidité sont très faibles bien que le charbon vierge est plus humide par rapport au charbon chargé et le charbon désorbé ;
- ↻ Les taux de friabilité et de dureté sont dans les normes ;
- ↻ Le charbon vierge est moins dense que le charbon chargé et désorbé ;
- ↻ La porosité apparente du charbon vierge et du charbon désorbé est plus élevée par rapport au charbon chargé ;
- ↻ L'étude de l'effet de pH montre que la capacité d'adsorption est mieux dans le milieu alcalin, dans notre cas le pH était entre 10 et 10,5 ;

Les résultats des essais de la capacité d'adsorption du charbon actif ont montré que :

- ↻ La cinétique d'adsorption se déroule en deux étapes. La première étape est rapide et correspond au transfert de la masse externe, tandis que la deuxième étape est lente et correspond à la phase de diffusion des ions d'or dans la porosité du charbon ;
- ↻ Les résultats observés nous ont permis de conclure que la concentration n'a pas une grande influence sur le taux d'adsorption ;
- ↻ Les rendements sont excellents à des concentrations moyennes de 50g/t ;
- ↻ Le taux d'adsorption ne dépend pas de la concentration de l'or initiale, ce qui signifie que l'adsorption est une caractéristique intrinsèque du charbon ;
- ↻ Dans une pulpe de 50% en matière solide, la cinétique d'adsorption est très lente ceci est due à l'existence de la silice qui empêche l'adsorption ;
- ↻ Le taux d'adsorption du charbon désorbé est faible comparé au charbon vierge en raison de nombre de pores diminués ;
- ↻ Le charbon vierge est nettement mieux que charbon désorbé, cela dit que le charbon désorbé nécessite une réactivation thermique et chimique pour augmenter ses capacités adsorptives.

CONCLUSION GENERALE

Une étude complémentaire est nécessaire afin de mieux comprendre le comportement du charbon actif vis-à-vis des solutions aurifères.

En perspective, nous proposons l'étude de la cinétique d'adsorption suivant les modèles connus et les facteurs influençant l'adsorption ;

Une caractérisation par **BET** nous donnera plus d'informations sur la surface poreuse des différents types du charbon utilisé.



REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **KHOSRAVI.R, AZGHAR.A, REZA.G, VINOD.K & SHILPI.A.** Adsorption of gold from cyanide leaching solution onto activated carbon originating from coconut shell- optimization, kinetics and equilibrium studies. Journal of industrial and engineering chemistry, **2017**;
- [2] **VARGAS.C & NAVARO.P.** Adsorption of $Au-(CN)_2^-$ onto activated carbon impregnated with a cationic surfactant. Conference. Université de Santiago de Chile, **June 2015** ;
- [3] **EMMANUEL.F.** Adsorption de polluants gazeux sur des filtres de charbon actif. Modélisation des échanges couples de matière et de chaleur. Génie des procédés. Ecole Nationale Supérieure des Mines de SAINT-ETIENNE, **2000** ;
- [4] **ZARROUKI.M.** Étude de l'adsorption dans un système liquide-solide : Solution d'ion dicyanoaurate-charbon actif. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Supérieure des Mines de SAINT-ETIENNE, **1990** ;
- [5] **CHAOUCH.N.** Utilisation des sous-produits du palmier dattier dans le traitement physico-chimique des eaux polluées. Thèse de doctorat. Université HADJ LAKHDAR de BATNA, **2014** ;
- [6] **MEBARKI.B.** Etude des transferts de chaleurs et de masse dans une machine frigorifique à adsorption solaire. Thèse de doctorat. Université des frères MANTOURI de CANSTANTINE, **2017** ;
- [7] **KENANI.S.** Contribution à l'étude de la gustation des molécules sucrées à travers un processus d'adsorption. Modélisation par la physique statique. Thèse de doctorat. Université de REIMS CHAMPAGNE ARDENNE/ Ecole Doctorale, **2007** ;
- [8] **BENARIMA.AH & KOUADRI.MR.** Préparation et caractérisation d'un charbon actif à partir de coquilles d'œufs. Mémoire de master. Université KASDI MERBAH OUARGLA, **2017** ;
- [9] **FRANCINE.D.** Mécanismes d'interaction entre polluants organiques non volatils et charbons actifs dans de nouveaux géo matériaux de confinement. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de LORRAINE, **1997** ;

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

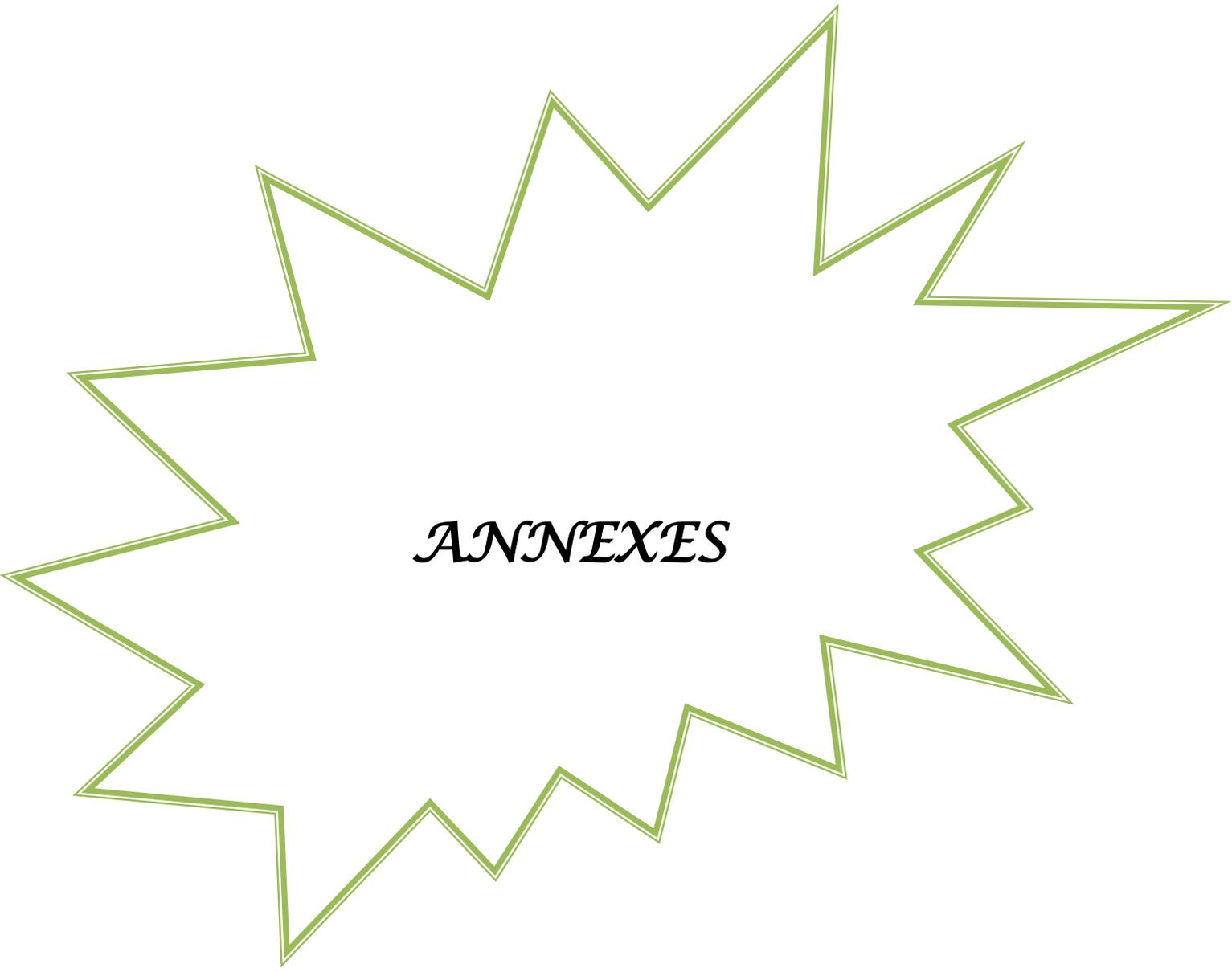
- [10] **BOUTCHICHE.M.** Etude de la capacité d'adsorption d'un charbon actif végétal sur le méthyle parabène. Mémoire de Master. Université TAHAR MOULAY de SAIDA, **2018** ;
- [11] **KASSOURIA & KHELIFI.C.** Bio régénération du charbon actif. Mémoire de master. Université ABDERRAHMANE MIRA de BEJAIA, **2018** ;
- [12] **LENOUAR.K.** Elaboration et caractérisation d'un charbon actif à partir de matériaux lignocellulosiques. Mémoire de magister. Université des Sciences et de la Technologie HOUARI BOUMEDIENE, **2009** ;
- [13] **SLASLI.MA.** Modélisation de l'adsorption par les charbons microporeux : Approches théorique et expérimentale. Thèse de doctorat. Université de NEUCHATEL, **2002** ;
- [14] **BAHNES.Z.** Activation des noyaux de jujube pour l'obtention d'un charbon actif. Thèse de doctorat. Université ABDELHAMID IBN BADIS de MOSTAGANEM, **2018** ;
- [15] **FADIAM.** Etude de l'adsorption du pesticide bromacil sur charbon actif en poudre en milieu aqueux. Effet compétiteur des matières organiques naturelles. Thèse de doctorat. Université de POITIERS, **2008** ;
- [16] **LEPAPE.H.** Etude des propriétés germicides de fibres de carbone activé : Application a la décontamination de l'air en cabine d'avion. Thèse de doctorat. Université de LIMOGES, **2003** ;
- [17] **MECHRI.G.** Préparation et caractérisation des charbons actifs à partir d'un bitume d'origine pétrolière. Activation par les hydroxydes. Mémoire de magister. Université LARBI BEN MHIDI de OUM EL BOUAGHI, **2011** ;
- [18] **YAHIAOUI.N.** Étude de l'adsorption des composés phénoliques des margines d'olive sur carbonate de calcium, hydroxyde-apatite et charbon actif. Mémoire de magister. Université MOULOUD MAMMERI de TIZI-OUZO, **2012** ;
- [19] **ATHEBA.GP.** Traitement des eaux par action combinée de la photo-catalyse solaire et de l'adsorption sur charbon actif : Conception et réalisation du procédé. Thèse De Doctorat. Université PAUL VERLAINE, METZ, **2009** ;

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [20] **AYRAL.C.** Elimination de polluants aromatiques par oxydation catalytique sur charbon actif. Thèse De Doctorat. Institut National Polytechnique de TOULOUSE, **2009** ;
- [21] **LU.J.** Etude comparative sur les charbons actifs. Synthèse technique. ENGREF Centre de MONTPELLIERS et OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU – SNIDE, **2005** ;
- [22] **ACADEMIE NATIONALE DE PHARMACIE.** Médicament : Produits de santé, biologie, santé et environnement, **1877** ;
- [23] **SEKIRIFA. ML.** Etude des propriétés adsorbants des charbons activés issus des noyaux des dattes. Applications au traitement d'effluent aqueux. Thèse de doctorat. Université BADJI MOKHTAR d'ANNABA, **2013** ;
- [24] **CEN.Y. & AL.** Application studies of activated carbon derived from rice husks produced by chemical-thermal process. A review. Adv. Colloid Interface Sci, **2011** ;
- [25] **GHRIBI.MA et OUNAS.MWR.** Etude de l'effet des ions ferriques sur l'extraction de l'or– cas de la mine d'Amesmessa-. Mémoire de Master. Université ABDERRAHMANE MIRA de BEJAIA, **2019** ;
- [26] **LOUZ.M.** Etude des paramètres physico-chimiques et hydrologiques de la lixiviation en tas du minerai aurifère –cas de la mine d'Amesmessa-. Mémoire de Master. Université de KHEMIS MILIANA, **2016** ;
- [27] **ZADRA.J.B. & AL.** A process for recovering gold and silver from activated carbon by leaching and electrolysis. U.S. Bur. Mines, **1952** ;
- [28] **DAVIDSON.RJ & DUNCANSON.D.** Journal of The South Mercian. Institute of Mining and Metallurgy, July, **1977** ;
- [29] **HEINEN.HJ, PETERSON.DG & LINDSTROM.RE.** World Mining and Technology. NEW YORK, **1976** ;
- [30] **DESCINES.G & WALLINGFORD.G.** Effect of oxygen and lead nitrate on the cyanidation of a sulphide bearing gold ore, Minerals engineering, Vol. 8. CANADA, **1995** ;
- [31] **ADOUANI.I.** Cours de chimie analytique 3^{ème} année docteur en pharmacie. Université FERHAT ABBAS de SETIF, **2020** ;

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [32] **ACHOUR.S & ALOUANE.W.** Optimisation des paramètres de l'extraction de l'or par cyanuration –cas de la mine d'Amesmess–. Mémoire de Master, Université ABDERRAHMANE MIRA de BEJAIA, **2016** ;
- [33] Article : *documentation.2ie-edu.org*, Annexe2 (analyse granulométrique) ;
- [34] **GUETTOUCHE.A.** Cours MDS, identification et classification des sols, (page18), Université de SETIF, **2016** ;
- [35] **BOUCHELKIA.N.** Etude de l'élimination du Plomb, du Zinc et du Cadmium par adsorption sur un charbon actif préparé à base des noyaux de jujube. Memoire de Magister, Université ABDERRAHMANE MIRA de BEJAIA, **2015**;
- [36] **S D. B. MAAZOU.SD.B & Biol.J.** Kinetic and thermodynamic studies adsorption of Methylene Blue (MB) in aqueous solution on a bio adsorbent from Cucumeropsis mannii Naudin waste seeds. *IFG*, **2018** ;
- [37] **MAMANE.OSA, ZANGUINA.A, DAOUS.I & NATATOU.I.** Préparation et caractérisation de charbons actifs à base de coques de noyaux de Balanites Eagyptiaca et de Zizyphus Mauritiana. *Journal de la société Ouest-Afr*, **Juin 2016** ;
- [38] **DEMIRBAS.A.** Effect of initial moisture content on theyields of oily products from pyrolysis of biomass. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, **2004** ;
- [39] Centrale Technologique pour la Recherche technologique de Base (LAAS-CNRS), Spectroscopie par absorption atomique SAA ;
- [40] **ELHAJJI.** Technique spectrométrique, science de matière et chimie, (fsr.ac.me).



ANNEXES

ANNEXES

♣ ANNEXE « A » : Protocole opératoire et analyses

Notre échantillon est soumis à l'analyse par spectrométrie d'absorption atomique (SAA) afin de déterminer les teneurs en Or initiales, finales et pendant les prélèvements.

Après avoir déterminé la teneur en or par SAA, les molécules d'or doivent être libérées du minerai, pour cela, une lixiviation est indispensable pendant nos essais, afin de préparer des solutions aurifères de différentes concentrations pour nos essais sur le charbon actif.

A.1. SPECTROMETRIE D'ABSORPTION ATOMIQUE (SAA)

La spectrométrie d'absorption atomique est une méthode de dosage d'éléments chimiques fondée sur l'absorption des radiations atomiques en phase vapeur.

A.1.1. Caractéristiques principales



Figure A.1 : Spectromètre d'absorption atomique du laboratoire d'Amesmassa [Photo prise].

- Analyst 400 ;
- Gamme spectrale : 189 - 900nm ;
- 4 Lampes multi-éléments ;
- Bande passante : 0.12nm à 2nm ;
- Fonction EDL(Electrodeless discharge lamp) ;
- Passeur automatique d'échantillons ;
- Reconnaissance automatique du type de lampes ;
- Lampe de référence au Deutérium [39].

A.1.2. Principe de fonctionnement

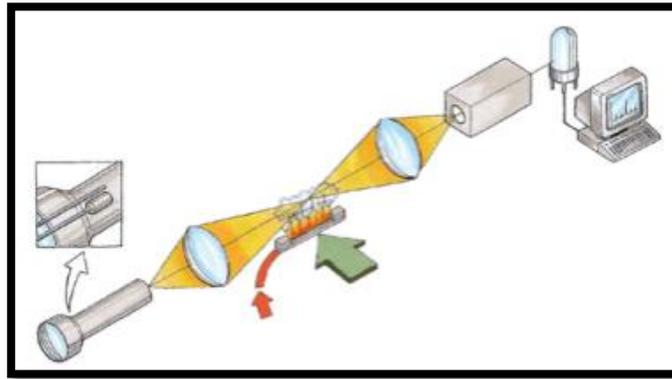


Figure A.2 : Principe de fonctionnement du SAA [39].

La solution contenant l'élément à doser est aspirée à travers un capillaire et dirigée vers le nébuliseur. Elle est ensuite pulvérisée à très grande vitesse à travers une chambre où s'éliminent les grosses gouttes grâce à une bille brise-jet. La solution ainsi vaporisée est entraînée par le combustible à travers le brûleur à la sortie duquel a lieu la combustion. Après dissociation thermique dans la flamme, les radiations incidentes qui sont fournies par une lampe à cathode creuse qui émet le spectre de l'élément que l'on veut doser sont absorbées.

La mesure de cette absorption permet de déterminer la concentration de l'élément à doser [39].

L'échantillon est porté à une température de 2000 à 3000 degrés pour que les combinaisons chimiques dans lesquelles les éléments sont engagés soient détruites [40].

Celui-ci voit son énergie varier au cours d'un passage d'un de ses électrons d'une orbite électronique à une autre [40] :

$$dE = h\nu \quad (\text{Equation A.1})$$

Où :

h : la constante de Planck ;

v : la fréquence du photon absorbé.

Généralement seuls les électrons externes de l'atome sont concernés (*figure A.3*) [40].

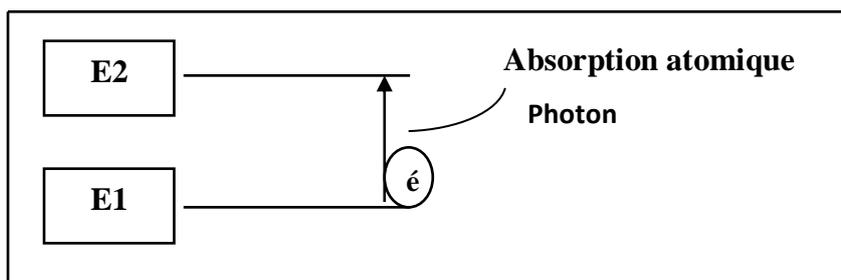


Figure A.3 : Schéma d'une transition électronique [40].

ANNEXES

L'analyse par absorption atomique utilise la loi de Beer- Lambert.

$$A = \epsilon l C = \log p/p_0 \quad (\text{Equation A.2})$$

Où :

A : Absorbance ;

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

l : La longueur de la flamme ;

C : concentration de solution en élément absorbant ;

p : La puissance incidente ;

p₀ : La puissance absorbée [40].

A.1.3. Matériels utilisés pour l'analyse

→ Pour la préparation thermique (fusion) :

- Un échantillon homogène d'une granulométrie <75µm ;
- Des creusets en porcelaine propres ;
- Un chariot ;
- Un four pour fusion ;
- Mélange de fondant constitué de carbonate de sodium, borax, farine et oxyde de plomb ;
- Une spatule ;
- Une balance électrique ;
- Nitrate d'argent ($AgNO_3$) ;
- Un marteau et un support.

→ Pour la coupellation :

- Des coupelles ;
- Un four.

→ Pour la préparation chimique (la digestion) :

- Des tubes à essai propres et un support ;
- Plaque chauffante pour Bain-marie ;
- Une solution d'acide nitrique (HNO_3) de 30% ;
- Une solution d'acide chloridrique (HCL) de 100% ;
- Eau distillée.

ANNEXES

→ Pour la détermination finale de l'analyse :

- Un spectromètre d'absorption atomique (SAA) (figure A.1).

A.1.4. Mode opératoire des essais

→ Pour la préparation thermique (fusion) :

- on commence par peser **30g** du minerai à analyser pour chaque essai (on prépare plusieurs essais pour un meilleur résultat) ;
- on verse les échantillons dans les creusets en porcelaine selon un ordre bien défini qui est noté sur une fiche de travail, puis on rajoute le mélange de fondant dans chaque creuset afin d'obtenir un bouton de plomb de **25** à **30g** (figure A.4);



Figure A.4 : Versement du minerai + fondants dans les creusets [Photo prise].

- on injecte dans chaque creuset **2ml** d' AgNO_3 comme il est montré dans (figure A.5), puis on mélange avec une spatule bien propre pour éviter toute contamination possible ;

ANNEXES



Figure A.5 : Injection de 2ml d'AgNO₃ [Photo prise].

- on met les creusets dans le four (*figure A.6*) à **1100°C** pendant **60min** pour assurer la fusion, puis on verse le fondant dans des moules selon l'ordre établie et on attend jusqu'au refroidissement total du mélange (*figure A.7*) ;



Figure A.6 : dépôt des creusets dans le four de fusion [Photo prise].



Figure A.7 : Versement du fondant dans les moules [Photo prise].

- à l'aide d'un marteau, on brise les scories pour récupérer les boutons de plomb résultants de la fusion, on les aplatit et on les mets dans leurs supports.
- ➔ **Pour la coupellation :**
- On préchauffe un nombre de coupelle égal aux boutons de plomb résultants pendant **10min** dans un four à **950°C** ;

ANNEXES

- Suivant la fiche de travail précédemment préparée, on dispose les boutons de plombs dans leurs coupelles, puis on les charge soigneusement dans le four à **950°C** pendant **40min** pour assurer leurs fusion ;
- On ouvre la trappe du four pour ventiler les vapeurs d'oxyde de plomb, puis on retire les coupelles et on les entrepose sur le plan de travail, on laisse ventiler et refroidir (*figure A.8*), on obtient à la fin de cette opération une perle constituée de métaux précieux (**Ag** et **Au**) ;

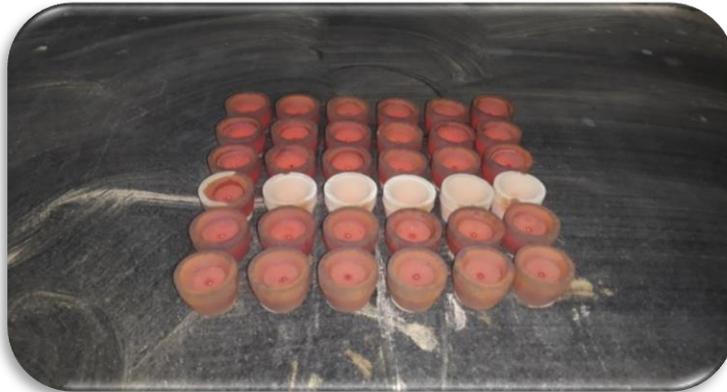


Figure A.8 : Perles d'Ag et Au dans les coupelles [Photo prise].

➔ Pour la préparation chimique (la digestion) :

- On dispose les perles résultantes de la coupellation dans des tubes à essais qui seront bien arrangés dans leurs support selon l'ordre établi sur la fiche de travail ;
- On ajoute dans chaque tube à essai **3ml** d'**HNO₃** à 30% et on met dans un Bain-marie (*figure A.9*) préchauffé pendant **20 min** pour éliminer l'argent (**Ag**) ;
- On rajoute **3ml** d'**HCl** sur le résidu d'Or dans chaque tube, on mélange les acides pour former de l'eau régale qui va faire dissoudre l'Or, puis on remet sur Bain-marie pendant **20min** ;
- A la fin, on y ajoute **4ml** d'eau distiller pour diluer la solution, on laisse refroidir pendant **10min**;
- Une fois refroidi, on agite les tubes à essai afin de s'assurer d'une bonne homogénéisation ;

ANNEXES



Figure A.9 : Mise des tubes à essais contenant les perles sur bain-marie pour refroidissement [Photo prise].

→ Pour la détermination finale de l'analyse :

- On fait passer les tubes à essai après décantation totale du résidu un par un dans le spectromètre qui est lié à un ordinateur pour lire le résultat finale de la teneur en Or de notre minerai (*figure A.1*).

A.2. ESSAIS DE LA LIXIVIATION DYNAMIQUE DU MINERAI EN BOUTEILLES ROULANTES

A.2.1. Matériels utilisés

- Une balance électrique ;
- Soude caustique ($NaOH$) pour régulariser le pH ;
- Cyanure ;
- 500g du minerai d'or ;
- Bouteilles roulantes en verre ;
- pH-mètre ;
- 1L d'eau distillée ;
- Agitateur mécanique ;
- Des tubes à essais et leur support ;
- Spectromètre d'absorption atomique (SAA).

ANNEXES

A.2.2. Mode opératoire

- On pèse **500g** du minerai + **1L** d'eau distillée ;
- On ajoute une quantité de **NaOH** jusqu'à obtention d'un **PH** entre (**10-11**) ;
- On ajoute **0.3g** de cyanure (*figure A.10*) ;



Figure A.10 : Cyanure utilisé pour les essais [Photo prise].

- On met la pulpe en agitation pendant **12h** (*figure A.11*);



Figure A.11 : Dispositif de rotation des bouteilles roulantes [Photo prise].

- On effectue des prélèvements après différents temps de séjours dans des tubes à essais (*figure A.12*) bien ordonnés selon une fiche de travail déjà préparée ;

ANNEXES

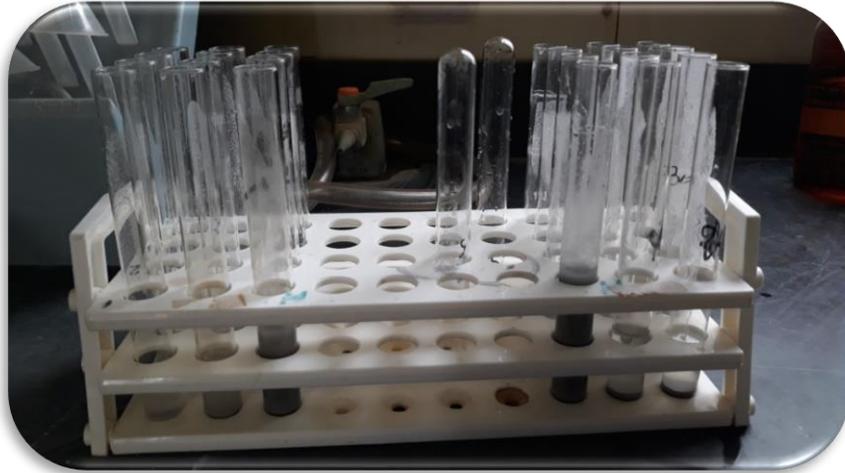


Figure A.12 : Décantation de la pulpe dans les tubes à essais [Photo prise].

- On mesure le pH et la température de chaque prélèvement ;
- Après l'écoulement du temps de lixiviation, on récupère la pulpe et on passe à l'opération de filtration à l'aide du dispositif présenté dans (figure A.13) afin de séparer le filtrat du le gâteau et les analyser ;
- On pèse le gâteau humide, puis on le met dans le four pour le sécher afin de le peser encore pour but de calculer la différence de masse qui sera ajouter au volume du filtrat ;
- On trace les tableaux et les courbes représentant les taux de lixiviation.



Figure A.13 : Dispositif de la filtration [Photo prise].

ANNEXES

A.2.3. Méthodes de calculs

→ Calcul de la quantité d'Or lixiviée :

$$Qte\ d'Or\ lixiviée = \frac{CAu * V}{1000} \quad (Equation\ A.3)$$

Avec :

CAu : la teneur en Or en (g/t) ;

V : volume de la solution en (ml).

→ Calcul du taux de lixiviation analysée :

$$Taux\ de\ lixiviation\ analysée = \frac{Qte\ d'Or\ lixivié * 100 * 1000}{CAu_i\ analysé * m} \quad (Equation\ A.4)$$

Avec :

m : la masse du minerai (g).

→ Calcul du taux de lixiviation calculée :

$$Taux\ de\ lixiviation\ calculée = \frac{Qte\ d'Or\ lixivié * 100 * 1000}{CAu_i\ calculé * m} \quad (Equation\ A.5)$$

$$CAu_i\ calculé = \frac{CAuf\ en\ solution * Vf + CAuf\ du\ gâteau * mg}{mi} \quad (Equation\ A.6)$$

Avec :

m : la masse du minerai (g) ;

CAu_f : la teneur en Or final du gâteau.

ANNEXES

♣ ANNEXE « B » : Caractérisation minéralogique

B.1. DIFFRACTION A RAYON X (DRX)

L'analyse radio-cristallographique des échantillons à température ambiante dans un domaine angulaire 2θ allant de 10 à 80° avec un pas angulaire de $0,01$ degré a été réalisée à l'aide d'un diffractomètre type **RIGAKU**, Miniflex du laboratoire **LPCMC** [25].

L'identification des phases (dépouillement) a été réalisée par une recherche automatique en se basant sur des fichiers **ASTM** (*American Society of Testing and Material*). Selon l'étude précédente [25], les résultats obtenus sont illustrés dans les figures ci-dessous :

Pour l'échantillon de minerai frais (*Figure II.25*), obtenu lors de la caractérisation minéralogique de l'échantillon du minerai frais montre la présence de plusieurs phases cristallisées à différents angles de diffraction contenant essentiellement le quartz, le plomb, le fer et le soufre.

On distingue trois phases: phase dominante du quartz à 97% (Si_3O_6), la Pyrite (Fe_4S_8 ou bien disulfure de Fe^{+2}) à 2%, ainsi que la Galène (Pb_4S_4) à 1%.

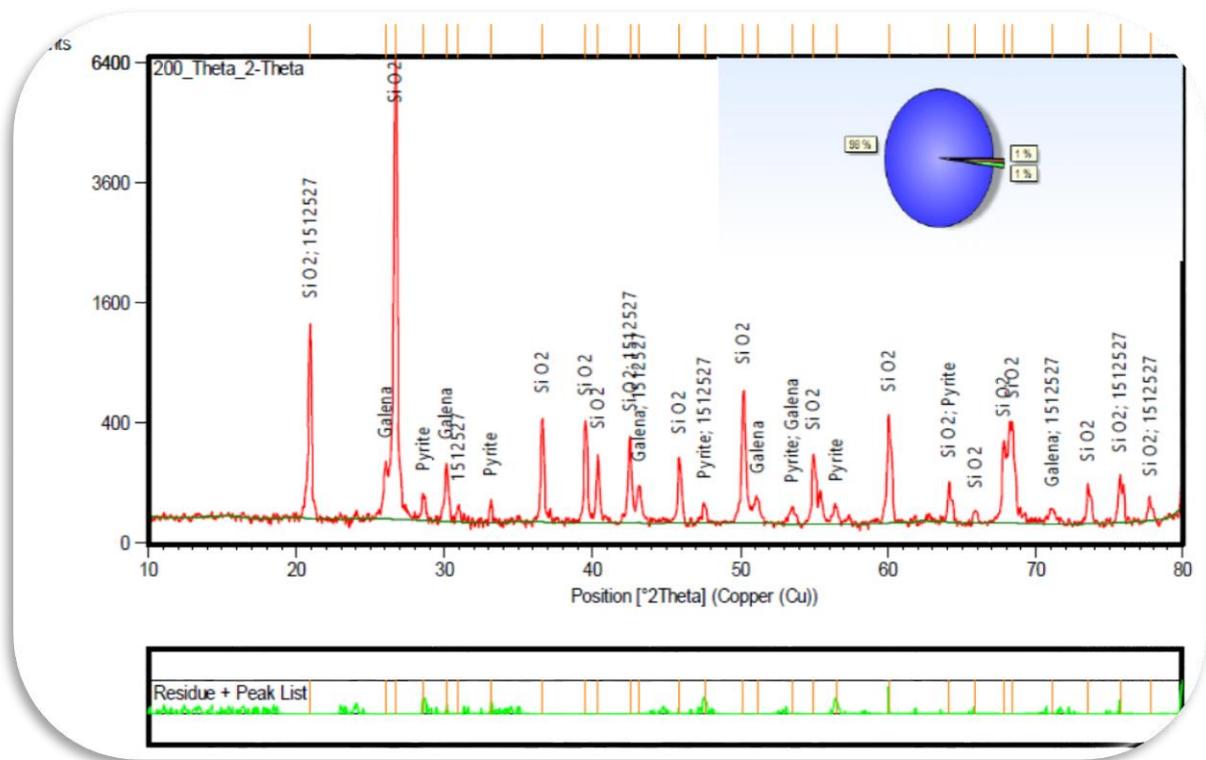


Figure B.1 : Diffractogramme des phases du minerai frais [25].

Résumé

Le site minier d'Amesmessas intègre quotidiennement le charbon actif dans son processus d'extraction de l'or. Il est introduit après le procédé de lixiviation (cyanuration des solutions aurifères) et son rôle principal est l'adsorption de l'or (Au) de la pulpe. Ce travail a pour objet l'étude expérimentale des propriétés physico-chimiques du charbon actif seul utilisé dans l'industrie aurifère ainsi que l'étude de sa capacité d'adsorption.

La première étape consiste à la dissolution de l'or par le procédé de cyanuration ; cette partie prend en charge la phase d'échantillonnage, la préparation des échantillons et l'analyse instrumentale. La seconde partie consiste en le conditionnement du charbon actif pour un meilleur rendement. Les résultats montrent que le charbon utilisé (surtout le vierge) présente une bonne capacité d'adsorption lorsqu'il possède : une granulométrie serrée et bien graduée, un taux de friabilité et d'humidité faible, une densité approximative de 445kg/m^3 , une porosité allant de 50 à 70% et un pH de 10 à 11 (milieu alcalin).

L'influence des paramètres comme la concentration, le type du charbon et la nature de la solution ont été étudiées pour obtenir les conditions optimales pour une favorisation incrémentale de l'adsorption.

Mots clés

Or, Minerai, Charbon actif, Adsorption, solution aurifère, taux de récupération.

Abstract

The Amesmessa mine incorporates daily the activated carbon into their gold mining process. This element is introduced at the end of the leaching process (the cyanide of the gold solutions), its main role is the extraction of gold (Au) from the pulp solution. The aim of this work is the experimental study of the physical-chemical properties of activated carbon alone used in the gold industry and the study of its adsorption capacity.

The first step is to dissolve gold by cyanide process; this part focuses on the sampling phase, sample preparation and instrumental analysis. The second part consists of the activated carbon conditioning for a better yield. The results show that the used carbon (virgin one) presents a good adsorption capacity when : has a tight and well-grated particle size, a low friability and humidity rate, a density equal to 445kg/m^3 , a porosity ranging from 50 to 70%, and a pH of 10 to 11 (alkaline medium).

The influence of parameters such as concentration, type of activated carbon and nature of the solution was studied in order to reveal the optimal conditions for an incremental favorization of adsorption.

Keywords

Gold, Ore Activated Carbon, Adsorption, Gold Solution, Recovery Rate.