



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE - ANNABA

Département Génie Minier, de la Métallurgie et des Matériaux

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme d'INGENIEUR D'ETAT

Génie minier

Présenté par

Chafik MESSAADIA
Mohammed Amin MANSOURI

Valorisation des déchets d'équipement électrique et électronique (DEEE) par une voie hydro-métallurgique en vue de la récupération des métaux précieux

Encadré par

Dr. Toufik BATOUCHE
ENSTI-Annaba

Co-encadré par

Dr. GUETTAF TEMAM Tahar
CRTI-URMM-Annaba

Membres du jury :

▪ Dr. Hamza CHENITI	Président	ENSTI-Annaba
▪ Dr. Ali MESSAI	Examineur	ENSTI-Annaba
▪ Dr Amir BOUSTILA	Examineur	ENSTI-Annaba
▪ Dr NECHMA Yacine	Examineur	ENSTI-Annaba

École Nationale Supérieure
de Technologie et d'Ingénierie - Annaba



المدرسة الوطنية العليا
للتكنولوجيا والهندسة - عنابة

AUTORISATION DE SOUTENANCE

Nom et Prénom des candidats : Mansouri Med Amin et Messaadia Chafik.....

Département : Département Génie Minier, de la Métallurgie et des Matériaux.....

Filière : Génie Minier

Spécialité : Génie Minier

Diplôme préparé : INGENIEUR D'ETAT

Promotion : 2023-2024

Nom et Prénom de l'encadreur : BATOUCHE Toufik

Thème du projet de fin d'étude :

Valorisation des déchets d'équipement électrique et électronique (DEEE) par une voie hydro-métallurgique en vue de la récupération des métaux précieux

.....
.....
.....

Appréciation de l'encadrant : Avis favorable

.....
.....

Date et visa de l'encadrant

Annaba, le 23-06-2024

Dr. BATOUCHE T

Remerciements

Toute notre gratitude, grâce et remerciements vont à « ALLAH » le Tout-Puissant, qui nous a donné la force, la patience, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

Nos remerciements et notre respect vont chaleureusement à notre Encadrant, **Dr. BATOUCHE Toufik** et à notre Co-encadrant, **Dr. GUETTAF TEMAM Tahar**, pour leurs précieux conseils, leurs remarques pertinentes et leur patience tout au long de la rédaction de ce mémoire et nous sommes reconnaissants d'avoir eu la chance de travailler à leurs côtés.

Nous tenons également à exprimer vivement notre gratitude et notre reconnaissance envers les membres du jury de soutenance pour avoir accepté d'examiner notre travail :

- **Dr. Hamza CHENITI**
- **Dr. Ali MESSAI**
- **Dr Amir BOUSTILA**
- **Dr Yacine NECHMA**

Nous souhaitons également remercier chaleureusement tous les enseignants et les responsables du département de Génie Minier, de la Métallurgie et des Matériaux, spécialement Dr **HABES Sameh**, Dr **ROUAIGHIA Issam** et le doctorant **HEBBAZ Abdennour**.

Nos vifs remerciements au personnel du Laboratoires de l'école ENSTI Annaba, en particulier **Mr. SOUKHAL Samir**, **Mr. Brahmia Hichem**, **Mr. METIRI Moustapha**, **Mr. SEBAI Ramzi** et **Mme. Zeddouri Hakima**.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude envers tous ceux qui nous ont apporté leur aide, de près ou de loin, tout au long de ce parcours. Vos encouragements, votre soutien moral et vos précieux conseils ont été des éléments clés pour mener ce projet à terme.

Nous sommes conscients que ce projet de fin d'étude n'aurait pas été possible sans l'aide et le soutien inconditionnel de tous ceux qui nous ont entourés.

Dédicaces

*J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail à : Mon Père
ma fierté qui a tout consacré effort et moyen pour ma
réussite sans lui je n'aurai rien accompli*

*Ma chère mère pour sa compréhension et sa patience et
son encouragement et sa tendresse*

*A mes frères **Khayrou** et **Bilal** et mes sœurs **Sara** et **Iman***

*À ma chère petite nièce, **Zihar**, ton sourire et ta joie de
vivre m'inspirent chaque jour. Que ce travail reflète
l'amour et l'espoir que tu apportes à notre famille.*

*Mes enseignants et Tous ceux qui ont participé de près
ou de loin à ma formation par des cours, par des conseils,
par des gestes d'encouragement, d'amours ou d'amitié.*

Chafik

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à nos frères de Gaza libre,

*À ma mère et à mon père pour leurs sacrifices, leur
soutien et leurs encouragements,*

À mes frères Youssef et Islam,

*À ma sœur Sana et Nour El Houda, à l'âme de mon cœur
Rahaf et Maria, et à mes amis Amine et Abdel Karim,
ainsi qu'à tous les membres de l'Association des Savants
Musulmans, section de Tazgait*

Mohamed Amin

ملخص

يركز مشروع التخرج هذا على إعادة تدوير نفايات المعدات الكهربائية والإلكترونية (DEEE)، باستخدام طرق المعالجة المائية. تبدأ الدراسة بتقديم عام لنفايات المعدات الكهربائية والإلكترونية، وتركيبها والتحديات المرتبطة بإدارتها. ثم تصف عمليات أخذ العينات وتوصيف نفايات المعدات الكهربائية والإلكترونية من الهواتف وأجهزة الكمبيوتر وأجهزة التلفزيون. يستكشف الجزء التجريبي تقنيات الترشيح والترسيب لاستعادة المعادن الثمينة، مع تقييم كفاءة العمليات وتأثيرها البيئي. تسلط النتائج الضوء على التحديات التقنية والبيئية لهذه العملية، مؤكدة على الحاجة إلى تطوير نهج أكثر استدامة وفعالية للمساهمة في الاقتصاد الدائري في مجال النفايات الإلكترونية

الكلمات المفتاحية: النفايات الكهربائية والإلكترونية، استعادة القيمة، المعالجة المائية، الترشيح، التوصيف، الأثر البيئي

Résumé

Ce projet de fin d'études porte sur la valorisation des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), par des méthodes hydrométallurgiques. L'étude commence par une présentation générale des DEEE, leur composition et les enjeux liés à leur gestion. Elle décrit ensuite les processus d'échantillonnage et de caractérisation de DEEE provenant de téléphones, ordinateurs et téléviseurs. La partie expérimentale explore les techniques de lixiviation et de précipitation pour récupérer les métaux précieux, tout en évaluant l'efficacité des procédés et leur impact environnemental. Les résultats mettent en lumière les défis techniques et environnementaux de cette valorisation, soulignant la nécessité de développer des approches plus durables et efficaces pour contribuer à une économie circulaire dans le domaine des déchets électroniques.

Mots-clés : DEEE, valorisation, hydrométallurgie, lixiviation, caractérisation, impact environnemental

Abstract

This final year project focuses on the recovery of valuable materials from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), using hydrometallurgical methods. The study begins with an overview of WEEE, its composition, and the challenges associated with its management. It then describes the sampling and characterization processes for WEEE from phones, computers, and televisions. The experimental part explores leaching and precipitation techniques for recovering precious metals, while evaluating the efficiency of the processes and their environmental impact. The results highlight the technical and environmental challenges of this recovery process, emphasizing the need to develop more sustainable and effective approaches to contribute to a circular economy in the field of electronic waste.

Keywords: WEEE, valorization, hydrometallurgy, leaching, characterization, environmental impact

Liste de tableaux

Tableau III.01 : Résultats d'analyse par multi-paramètres pour étudier l'impact environnementales des rejets liquides générés par la valorisation des déchets D3E.....	21
Tableau III.2. Résultat d'analyse par multi paramètre des effluents acides neutralisés	24

Liste des Figures

FigureI.1. Fractions des matériaux constitutifs des DEEE (%) selon le système de recyclage des e- déchets	3
Figure.I.2. Production mondiale de déchets d'équipement électriques et électroniques (DEEE)	4
FigureII.1. Broyeur	6
FigureII.2. Couteau du broyeur.	7
FigureII.3. Tamiseuse	7
FigureII.4. déferrent produits obtenue après le tamisage.....	8
FigureII.5. Séparateur magnétique.....	8
FigureII.6. Résultats d'analyse DRX pour les déchets TE	9
FigureII.7. Résultats d'analyse DRX pour les déchets de pc	9
FigureII.8. Résultats d'analyse DRX pour les déchets TV	10
FigureII.9. Résultats de DRX.de l'ensemble des déchets PC.TE.TV	10
Figure.II.10 : Résultats d'analyse EDX de l'échantillon. Te brut	11
Figure.II.11 : Résultats d'analyse EDX de l'échantillon PC BRUT	12
Figure.II.12 : Résultats d'analyse EDX de l'échantillon TV. BRUT	13
Figure.III.1. Lixiviation à l'eau régale	14
Figure.III.2. Séparation solide/liquide par filtration	15
Figure. III.3. Précipitation de l'or	15
Figure.III.4. Récupération de cuivre	15
Figure.III.5. Résultats d'analyse EDX de l'échantillon PC Or.....	16
Figure.III.6. Résultats d'analyse EDX de l'échantillon. TE Or.....	17
Figure.III.7. Résultats d'analyse EDX de l'échantillon. TV Or	17
Figure.III.8. Résultats d'analyse EDX de l'échantillon. PC Cu	18
Figure.III.9. Résultats d'analyse EDX de l'échantillon. TE Cu	19
Figure.III.10. Résultats d'analyse EDX de l'échantillon. TV Cu.....	20
Figure.III.11. Résultats d'analyse EDX du rejet solide	21
Figure.III.12. Résultats d'analyse EDX de l'échantillon d'une plante arroser par les rejets liquides	23
Figure.III.13. Résultats d'analyse de l'échantillon du sol contaminer par l'eau régale.	23
Figure. III.14. Neutralisation des effluents acides par NaOH et CaOH ₂ et eau de robinet. ...	24

Liste des abréviations

DEEE ou D3E : Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques

EEE : Équipements Électriques et Électroniques

PCB : Polychlorobiphényles

BTP : Bâtiment et Travaux Publics

MEB : Microscopie Électronique à Balayage

EDX : Spectroscopie à Rayons X à Dispersion d'Énergie

DRX : Diffraction des Rayons X

PH : Potentiel Hydrogène

EH : Potentiel redox

ORP : Potentiel d'Oxydo-Réduction

DO : Oxygène Dissous

PSU : Practical Salinity Unit (unité de salinité)

TDS : Total Dissolved Solids (solides totaux dissous)

CON : Conductivité

Liste des symboles

HNO₃ : Acide nitrique

HCl : Acide chlorhydrique

Co : Cobalt

Mg : Magnésium

Cl : Chlore

Fe : Fer

S : Soufre

Na : Sodium

C : Carbone

Al : Aluminium

N : Azote

Cu : Cuivre

O : Oxygène

Au : Or

Ba : Baryum

Si : Silicium

Pb : Plomb

Sn : Étain

Ag : Argent

Ca : Calcium

P : Phosphore

Ti : Titane

Table des matières

Remerciment.....	I
Dedicace.....	II
Dedicace.....	III
ملخص.....	IV
Resume	IV
Abstract.....	IV
Liste des tableaux	V
Liste des figures	VI
Liste des abreviations.....	VII
Table des matières.....	VIII
Introduction générale.....	1

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction	3
I.2. Classification des déchets	3
I.3. Définitions Les déchets électroniques	3
I.4. Composition des DEEE	3
I.5. Statistiques nationales et mondiales sur les quantités de DEEE	4
I.6. Méthode de valorisation de DEEE	4
I.6.1. Pyrométallurgie.....	4
I.6.2. Combustion.....	4
I.6.3. Pyrolyse	5
I.6.4. Lixiviation	5
I.6.5. Cyanuration.....	5
I.6.6. Amalgamation	5
I.7. Conclusion	5

CHAPITRE II : ECHANTILLONNAGE ET CARACTERISATION DES DECHETS D3E

II.1 Introduction.....	6
II.2 Echantillonnage et préparation des échantillons	6
II.2 .1 Méthodologie d'échantillonnage	6
II.2.2. Collecte d'échantillons	6
II.2.3. Broyage des cartes mères	6
II.3. Analyse granulométrique	7
II.4. Séparation magnétique.	8
II.4.1. Fabrication d'appareils.....	8
II.5. Caractérisation des échantillons	8
II.5. 1. Analyse par Diffraction par Rayons X (DRX).....	8
II.5. 1. 1. Résultats d'analyse DRX des cartes mères des téléphones portables	9
II.5. 1. 2. Résultats d'analyse DRX des cartes mères des micro-ordinateurs (PC)	9
II.5. 1. 3. Résultats d'analyse DRX des cartes mères des téléviseurs (TV)	10
II.5. 2. Analyse par Microscopie Electronique à Balayage (MEB)	11
II.5. 2. 1. Résultats d'analyse MEB des cartes mères des téléphones portables.....	11
II.5. 2. 2. Résultats d'analyse MEB des cartes mères des micro-ordinateurs (PC) ..	12
II.5. 2. 3. Résultats d'analyse MEB des cartes mères des téléviseurs (TV).....	12
II.6. Conclusion.....	13

CHAPITRE III : ESSAIS DE VALORISATION DES DECHETS D3E

III.1.Introduction.....	14
III.2. Matériel et méthodes de valorisation	14
III.2.1. Préparation des réactifs.....	14
III.2.2. Séparation solide/liquide	14
III.2.3. Précipitation de l'or	15
III.2.4. Récupération de cuivre.....	15
III.3. Caractérisation des concentrés et des rejets obtenus	13

III.3.2. Analyse par Microscopie Electronique à Balayage (MEB).....	13
III.3. 1. 1. Résultats d’analyse MEB de concentré de l’or obtenu	17
III.3. 1. 2. Résultats d’analyse MEB de concentré de cuivre obtenu.....	18
III.3. 1. 3. Résultats d’analyse MEB du rejet solide obtenu.....	20
III.4. Effets des rejets liquides de la lixiviation sur l'environnement.....	22
III.4.1. Pollution de l'eau.....	22
III.4.2. Impact sur le sol et les plantes.	23
III.4.3. Neutralisation des effluents acides	24
III.8. Conclusion	25
Conclusion generale	26
References bibliographiques	
ANNEXES	

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Un déchet est un objet arrivé en fin de vie ou un matériau ayant subi une altération physique ou chimique et destiné à être éliminé **(Pichon et Moret, 2016)**. Tout déchet d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute objet, ou produit et tout bien dont le propriétaire ou le détenteur se défait, projette de se défaire, ou dont il a l'obligation de se défaire ou de l'éliminer **(Loi n° 01-19, 2001)**.

La société moderne produit une grande quantité de déchets qui peuvent être divisés en différentes catégories :

- **Les déchets municipaux**
- **Les déchets industriels**
- **Les déchets nucléaires**
- **Les déchets du BTP**
- **Déchets forestiers, d'élevage et agricoles**
- **Déchet ultime**
- **Déchets électroniques et électroniques DEEE ou D3E**

Également appelés déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), sont le terme utilisé pour décrire tous les produits électroniques jetés ou retournés qui ne sont plus fonctionnels.

Les appareils fréquemment remplacés mais insuffisamment recyclés constituent la première source de déchets dans le monde. En effet, près de 50 millions de tonnes de déchets sont produites chaque année dans le monde par les équipements électriques et électroniques.

Une population en croissance annuelle dont les conséquences sociales et environnementales sont catastrophiques, faute de solutions efficaces en matière de recyclage et de réparation. Il a atteint 57 millions de tonnes en 2021. Les experts du Forum DEEE prévoient que si la tendance actuelle se poursuit, ils dépasseront les 70 millions de tonnes d'ici 2030.

La composition du DEEE dépend principalement du type d'appareil électronique, du fabricant, de la date de fabrication, du modèle et de l'âge de l'EEE qui est réfuté **(Andreou et al,2021)**. De plus, la variété des matériaux présents dans le DEEE rend difficile l'attribution d'une composition. Matériaux généraux pour l'ensemble du flux de déchets **(Mor Mbodji,2021)**.

En fait, leur composition est diversifiée puisqu'ils sont constitués de matériaux métalliques et non métalliques dans des proportions variables qui dépendent principalement du type d'appareil. Les matériaux les plus courants dans les équipements électriques et électroniques sont les métaux et les plastiques. Le pourcentage de métaux (tels que le cuivre, l'aluminium, le fer et d'autres métaux) représente plus de 60 % des DEEE, alors que les plastiques représentent environ 30 % du total (Lukose, 2015).

En ce qui concerne les métaux, les DEEE incluent à la fois les métaux toxiques (mercure, argent, aluminium, fer, cuivre, etc.) et les métaux précieux (ou or, argent, etc.). Ainsi que les métaux lourds tels que l'antimoine, le cadmium, le plomb, le nickel et le chrome. **(Mmereki et al. 2016)**

La concentration de métaux précieux est plus élevée dans les déchets de téléphones et d'ordinateurs que dans les déchets électroniques des appareils électroménagers. A l'inverse, ces derniers possèdent plusieurs pièces constituées de métaux plus traditionnels comme le cuivre, le zinc, etc. **(ADEME et al., 2018).**

Ce travail vise à valoriser les déchets D3E en utilisant une voie hydro métallurgique en vue de la récupération des métaux, particulièrement : l'or et le cuivre. Sur ce et suite à notre estimation notre mémoire est structuré en trois chapitres comportant une partie d'étude bibliographique débutée par une introduction et achevée par une conclusion générale.

- Le premier chapitre est totalement consacré aux généralités sur les déchets d'équipement électronique et électrique autrement dit DEEE leur définition, composition, production et les méthodes de valorisation.
- Le deuxième chapitre porte sur l'échantillonnage, la préparation des échantillons des D3E, et la caractérisation de ces échantillons.
- Le troisième chapitre est consacré aux tentatives de la récupération de certains métaux à partir des DEEE (l'or et le cuivre au titre d'exemple) ainsi que les résultats de caractérisation des produits obtenus.

CHAPITRE I: RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Introduction

Les équipements électroniques et électriques (EEE) contiennent des substances ou composants dangereux pour notre environnement (batterie et accumulateurs, gaz à effet de serre, composants contenant du mercure, condensateurs pouvant contenir des PCB, etc.), mais ils présentent aussi un fort potentiel de recyclage des matériaux qui les composent (métaux ferreux et non ferreux, métaux rares, verre, plastiques, etc.). Malheureusement en Algérie il n'y a aucune filière agréée pour collecter et valoriser ces déchets

I.2. Classification des déchets

La société moderne produit une grande quantité de déchets divisés en différentes catégories : les déchets municipaux, les déchets industriels, les déchets nucléaires, les déchets du BTP, les déchets forestiers, d'élevage et agricoles, les déchets ultimes, et les déchets électroniques (DEEE ou D3E).

I.3. Définitions Les déchets électroniques

Les déchets électroniques, ou DEEE, désignent les produits électroniques jetés ou retournés, comme les ordinateurs, téléphones, téléviseurs, électroménagers, équipements de communication, audio/vidéo, chauffage/refroidissement, etc (VDR GUIDE JR., 2000).

I.4. Composition des DEEE

La composition du DEEE dépend principalement du type d'appareil électronique, du fabricant, de la date de fabrication, du modèle et de l'âge de l'EEE qui est réutilisé. En 2021, Andreou et al. De plus, la variété des matériaux présents dans le DEEE rend difficile l'attribution d'une composition. (ONG Ondo et al., 2011)

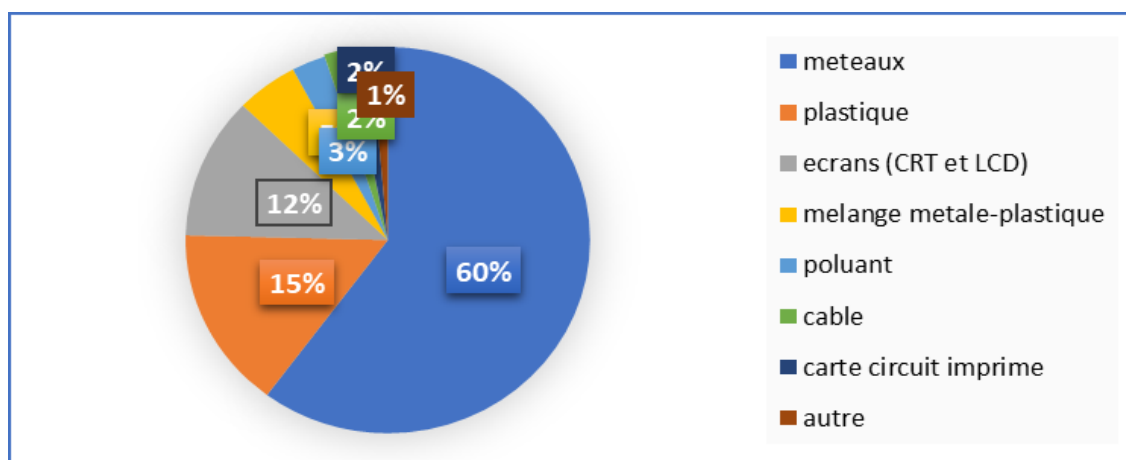


Figure I.1. Fractions des matériaux constitutifs des DEEE (%) selon le système de recyclage des e- déchets (SWICO/S.EN. S) en Suisse (Weber et al., 2019)

I.5. Statistiques nationales et mondiales sur les quantités de DEEE

Les appareils fréquemment remplacés mais insuffisamment recyclés constituent la première source de déchets dans le monde. En effet, près de 50 millions de tonnes de déchets sont produites chaque année dans le monde par les équipements électriques et électroniques.

Une population en croissance annuelle dont les conséquences sociales et environnementales sont catastrophiques,

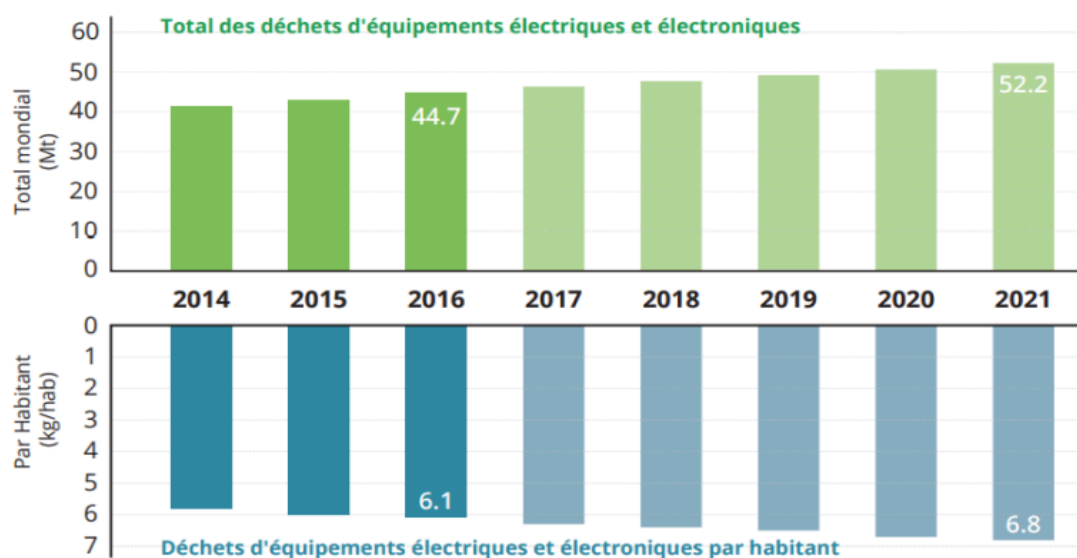


Figure.I.2. Production mondiale de déchets d'équipement électriques et électroniques (DEEE) (Baldé, 2017)

I.6. Méthode de valorisation de DEEE

I.6.1. Pyrométallurgie

La pyrométallurgie fait référence au traitement des minerais par des procédés thermiques tels que le grillage des sulfures et la fusion des minerais de fer dans les hauts-fourneaux. Il existe un grand nombre de procédés pyrométallurgies différentes. Bien que le haut-fourneau soit probablement le plus connu, de nombreux autres procédés existent dans ce domaine du traitement thermique des minerais. **(technique de l'ingénieur, 2001).**

I.6.2. Combustion

L'incinération des déchets électroniques à environ 1 100°C élimine les impuretés par volatilisation ou en formant des scories et boues. Cependant, en raison des gaz et de l'énergie

des résines et plastiques, seulement 10 % des cartes peuvent être traitées à la fois sans que le processus ne devienne chaotique.

I.6.3. Pyrolyse

La pyrolyse détruit les plastiques et résines par évaporation et cracking thermique des vapeurs, produisant une matière polymétallique plus facile à traiter dans les fonderies de cuivre sans perte de métaux ni déchets ultimes. Les gaz produits sont peu nombreux et faciles à traiter. Boliden, en Suède, utilise une pyrolyse à haute température (1 150°C), mais cette méthode violente peut causer des instabilités et produit une scorie pâteuse, rendant la séparation des matériaux difficile. (Thomas, 2016.) (Actu-environnement, 2024.)

I.6.4. Lixiviation

La lixiviation consiste à mettre en solution, sous forme ionique, les métaux recherchés. Le but est de déterminer le type de lixiviat optimal en termes de quantité et de coût de réactif, de solubilisation minimale d'impuretés et d'entretien du matériel. (technique de l'ingénieur, 2024.)

I.6.5. Cyanuration

La cyanuration est la voie optimale industrielle du traitement des minerais d'or depuis plus de cent ans. Elle repose sur le principe de lixiviation qui est une technique d'extraction de produits solubles par un solvant (solution de cyanure de sodium). (Techniques De L'Ingénieur, 2024)

I.6.6. Amalgamation

L'amalgamation est une technique de récupération du métal (on parle aussi d'extraction chimique dans le domaine de la métallurgie). Elle consiste à allier l'or (et l'argent) avec du mercure et à décomposer l'alliage (25 à 50 % d'or) par distillation du mercure, vers 400-500°C. (systext, 2022)

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les méthodes de traitement des déchets électroniques et donné un aperçu de tout ce qui concerne les déchets, leurs types, leurs sources, leur production mondiale et nationale et leurs compositions.

Les déchets DEEE, désignent les produits électroniques jetés ou retournés, comme les ordinateurs, téléphones, téléviseurs. Ces déchets sont composés principalement du Plastique, des métaux et d'autre composants. La production mondiale de ce type de déchets elle est en croissance continue. Parmi les méthodes les plus connues de la valorisation des D3E on trouve la pyrométallurgie, la pyrolyse, la lixiviation, ... etc.

CHAPITRE II: ECHANTILLONNAGE ET CARACTERISATION DES DECHETS D3E

II.1 Introduction

Ce chapitre traite les différentes étapes de préparations et caractérisation de nos échantillons, commençant par la collecte, le déchetage, le broyage et l'échantillonnage jusqu'aux différents analyses disponibles effectuées (MEB et DRX).

II.2 Echantillonnage et préparation des échantillons

II.2.1 Méthodologie D'échantillonnage

Pour les besoins de notre étude, trois types d'échantillons de cartes mères ont été prélevés :

- Echantillons de composants de téléphone portable.
- Echantillons de composants d'ordinateur.
- Echantillons de composants de tv.

II.2.2. Collecte d'échantillons

Nos échantillons ont été collectés auprès de tous les spécialistes en réparation de téléphones, de ordinateurs et de téléviseurs, en raison de l'absence d'une entreprise spécialisée dans le recyclage des déchets électroniques et électriques. Collecte d'environ 15 kg de déchets(figure 1 Annexe A).

II.2.3. Broyage des cartes mères

Différents types de broyeurs existent, comme le broyeur à marteaux, à ciseaux ou à couteaux. Dans notre cas, nous avons choisi d'adapter une meuleuse tronçonneuse portatif CROWN 115mm 600w ct13003 pour en faire une machine de broyage. Rendre en machine de broyage. La machine choisie ; est la meuleuse tronçonneuse portatif CROWN 115mm 600w ct13003.



Figure.II.1. Broyeur

Le type de broyeur possible pour ce type de déchets est le broyeur à couteaux. Pour fabriquer le couteau, nous avons sorti un disque à découper en plastique et en bois du broyeur et l'avons coupé en quatre couteaux. Ce couteau est aiguisé sur les quatre côtés pour faciliter le processus de broyage.

Pour faciliter le broyage, les composants sont déchetés manuellement en petits morceaux de 10 à 20 mm (figure 2. Annexe A) et introduit dans cet ustensile.



Figure.II.2. Couteau du broyeur.

II.3. Analyse granulométrique

L'échantillon broyé a été tamisé à l'aide d'une tamiseuse de Marque : CONTROLS Type : Tamis mécanique à tamis multiples pendant 15 minutes à une fréquence de vibration constante de 100.

Après tamisage, on obtient des particules de différents dimension. Nous sélectionnons ceux d'une dimension de 630 micromètres pour être analysés ou utilisés dans les essais des valorisations.



Figure.II.3. Tamiseuse

Après le tamisage, nous obtenons des particules de différents dimension pour les échantillons sélectionnés, comme indiqué dans la figure



Figure.II.4. Déférents produits obtenus après le tamisage

II.4. Séparation magnétique

Pour réaliser une séparation magnétique efficace pour éliminer la ferraille on a essayé de trouver une solution facile et peu coûteuse, en l'absence d'un séparateur magnétique professionnel au laboratoire. L'utilisation d'aimants puissants en néodyme semble être une bonne option.

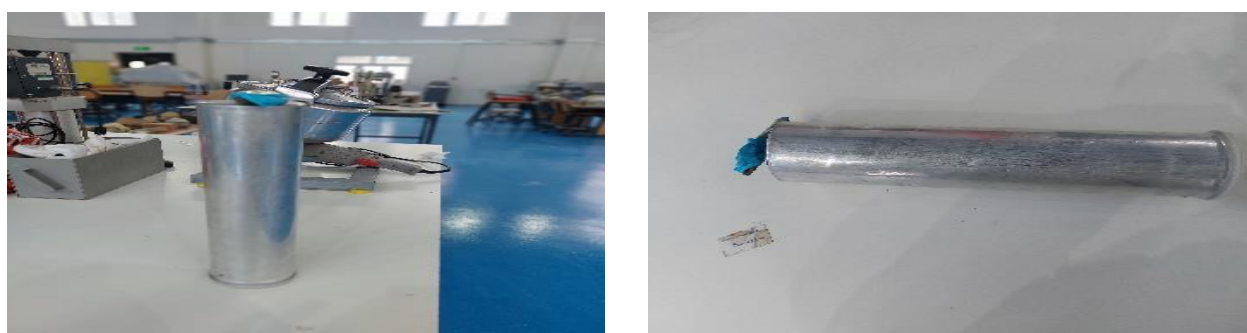


Figure.II.5. Séparateur magnétique.

II.5. Caractérisation des échantillons

Les échantillons des cartes mères prélevés et préparés sont conservés dans des boîtes et des sachets bien fermés pour éviter toute sorte de contamination (figure 3 Annexe A), puis sont envoyés au laboratoire spécialisé pour effectués toutes les analyses possibles de caractérisation (MEB, EDS et DRX), et les résultats sont ensuite analysés et discutés.

II.5. 1. Analyse par Diffraction par Rayons X (DRX)

L'analyse de la diffractométrie aux rayons X (XRD), a été réalisée à l'aide d'un diffractomètre de marque Rigaku « Ultima IV » (figure 4 Annexe A) caractérisé par un courant et une tension égale à 30 mA respectivement à 40 kV. Cette analyse a été réalisé au niveau de l'unité de recherche en mines et métallurgie URMM-CRTI-Annaba.

II.5. 1. 1. Résultats d'analyse DRX des cartes mères des téléphones portables

Les résultats d'analyse par DRX des cartes mères des téléphones portables (Te) sont illustrés dans la figures II.6 (tableau 1 Annexe B).

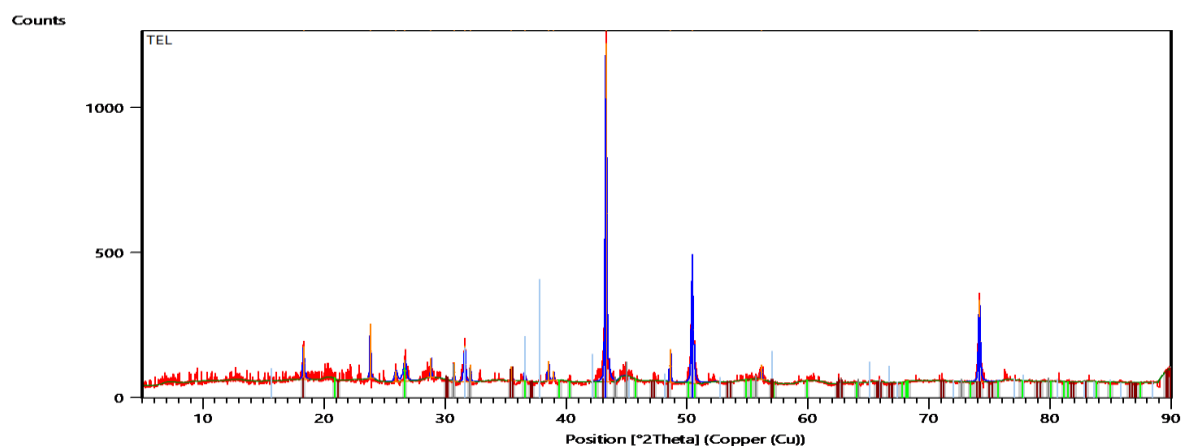


Figure.II.6. Résultats d'analyse DRX pour les déchets TE

Grâce à l'analyse des motifs et des pics illustrés dans le graphique, nous avons pu déterminer la structure cristalline des minéraux présents dans cet échantillon. Le grand pic représente le cuivre, tandis que l'oxyde de Silicon et le fer sont indiqués par des pics plus petits.

II.5. 1. 2. Résultats d'analyse DRX des cartes mères des micro-ordinateurs (PC)

Les résultats d'analyse par DRX des cartes mères des micro-ordinateurs (PC) sont illustrés dans la figures II.7 (tableau 2 Annexe B).

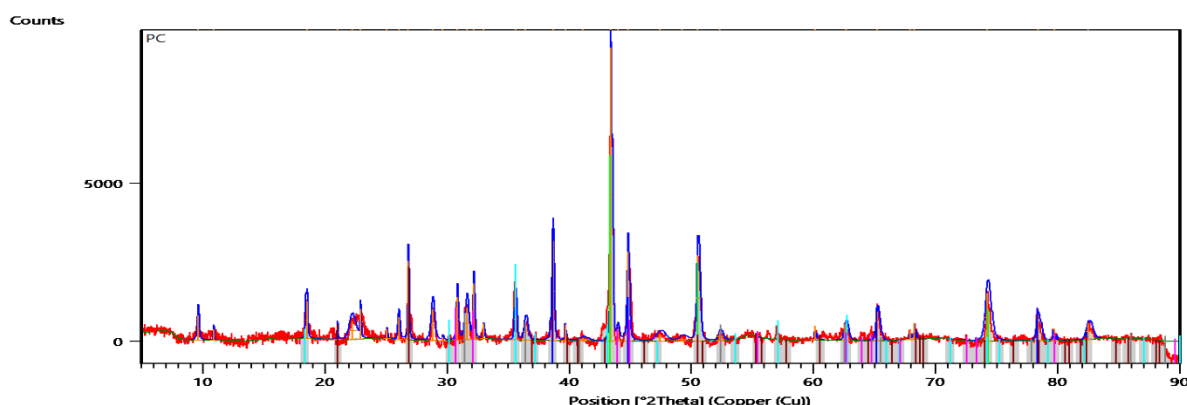


Figure.II.7. Résultats d'analyse DRX pour les déchets de pc

Lorsque on analyse les motifs et les pics représentés sur le graphique, ainsi que les résultats numériques, nous avons pu déterminer la structure cristalline des minéraux présents dans cet échantillon. Cela nous a permis d'identifier les divers minéraux en différentes proportions, tels que le cuivre, l'aluminium, et le silicium, parmi d'autres, indiqués par différentes couleurs sur ces oscillations.

II.5. 1. 3. Résultats d'analyse DRX des cartes mères des téléviseurs (TV)

Les résultats d'analyse par DRX des cartes mères des téléviseurs (TV) sont illustrés dans la figures II.8 et (tableau 3 Annexe B).

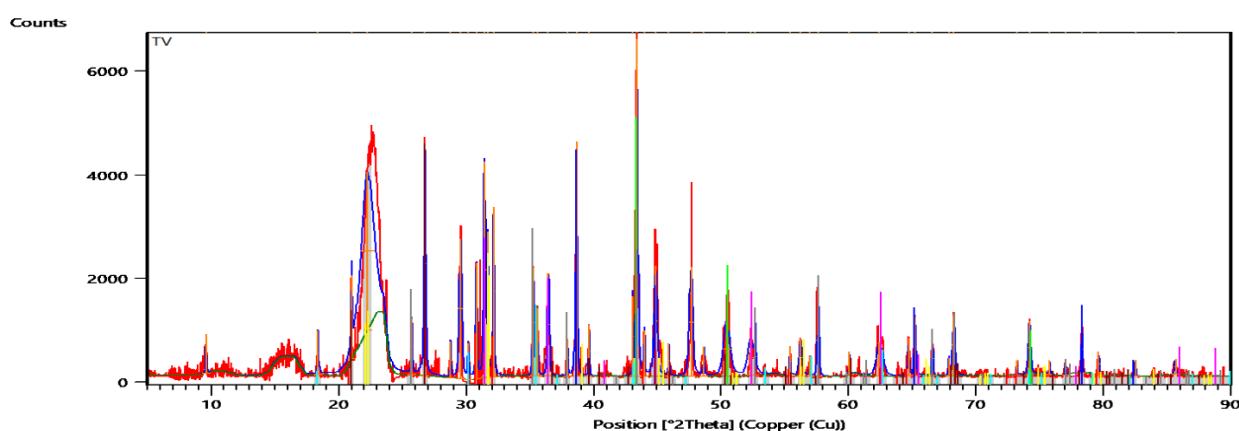


Figure.II.8. Résultats d'analyse DRX pour les déchets TV

Et grâce à l'analyse des motifs et des pics illustrés dans le graphique, nous observons un chevauchement important entre les ondes, ce qui indique la présence de nombreuses structures cristallines. Nous déduisons également la présence de cuivre, le Barium, le fer et d'autres minéraux à travers les différentes ondulations.

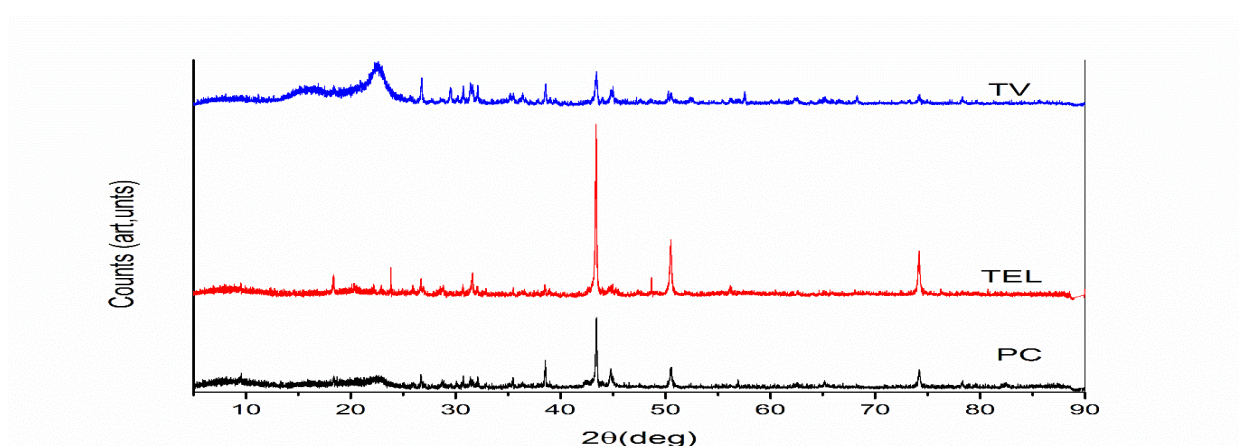


Figure.II.9. Résultats de DRX.de l'ensemble des déchets PC.TE.TV

À partir des oscillations obtenues pour les trois échantillons regroupés dans ce document, nous constatons qu'il y a un nombre presque égal de pics dans chacun des trois graphiques oscillants, mais ils diffèrent en hauteur, ce qui représente les quantités variées des minéraux étudiés en différentes quantités. Par exemple, la quantité de cuivre présente dans les déchets de téléphones est inférieure à celle des déchets de télévisions et d'ordinateurs. De même, la quantité d'aluminium présente dans les déchets de téléviseur est plus importante que dans les autres.

II.5. 2. Analyse par Microscopie Electronique à Balayage (MEB)

La Microscopie Electronique à Balayage MEB (ou Scanning Electron Microscopy SEM) est une technique d'observation de la topographie des surfaces. Elle apporte des informations sur la structure et la texture d'un échantillon mais aussi sur la taille et la forme des grains élémentaires ou agglomérats selon le grossissement choisi. L'analyse par EDX permet de déterminer la composition et de la distribution des éléments chimiques dans l'échantillon analysé.

Les échantillons préparés, ont été observées par microscope électronique à balayage (MEB) de marque FTI QUANTA 250 (figure 5. Annexe A) au laboratoire de l'ENSTI-Annaba. Ce microscope est couplé à une microanalyse chimique EDX globale, qui a permis d'identifier la composition chimique.

II.5. 2. 1. Résultats d'analyse MEB des cartes mères des téléphones portables

Les résultats d'analyse par MEB-EDX des cartes mères des téléphones portables (Te) sont illustrés dans la figures II.10 et (tableau 4 Annexe B).

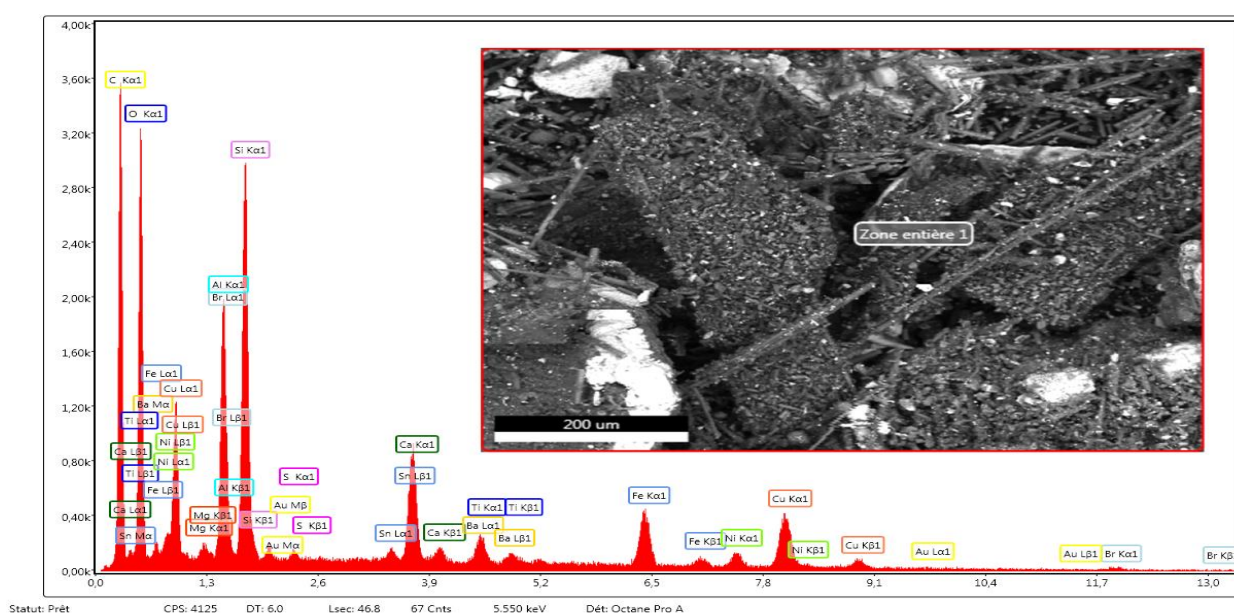


Figure.II.10 : Résultats d'analyse EDX de l'échantillon. Te brut

L'analyse révèle une composition dominée par le carbone (47,63%) et l'oxygène (37,31%), suggérant la présence de matériaux organiques ou polymères. Des éléments significatifs incluent le silicium (5,20%) et le brome (4,99%), probablement liés aux composants semi-conducteurs et aux retardateurs de flamme. Des métaux comme le cuivre, le magnésium, le calcium et le fer sont présents en moindres quantités, ainsi que des traces d'autres éléments. Cette composition reflète la complexité des cartes mères de téléphones portables modernes.

II.5. 2. 2. Résultats d'analyse MEB des cartes mères des micro-ordinateurs (PC)

Les résultats d'analyse par MEB-EDX des cartes mères des micro-ordinateurs (PC) sont illustrés dans la figures II.11 et (tableau 5 Annexe B).

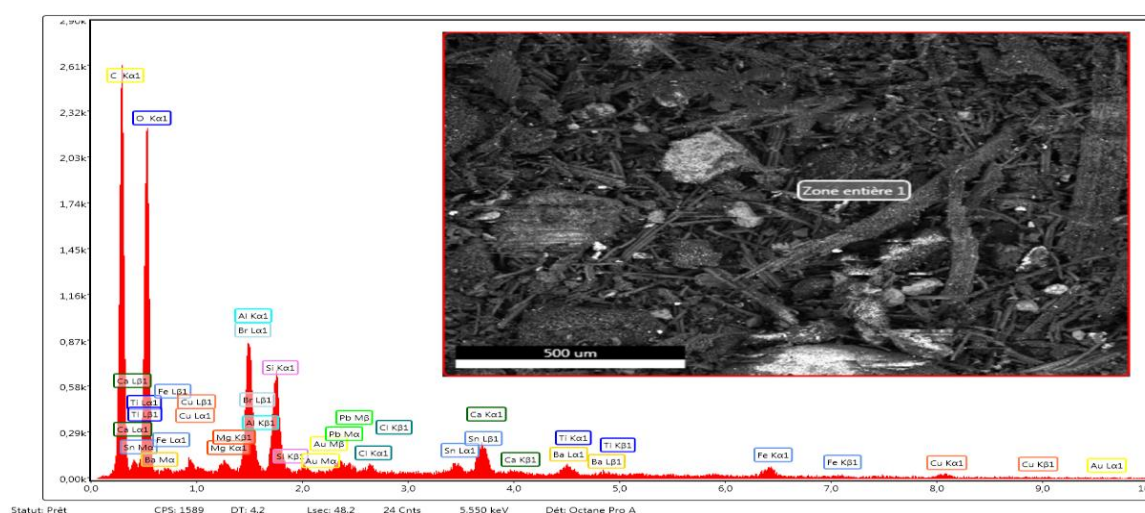


Figure.II.11 : Résultats d'analyse EDX de l'échantillon PC BRUT

Les éléments principaux détectés sont le carbone (C) et l'oxygène (O), représentant respectivement 44,58% et 41,49% en masse de l'échantillon. Cette forte présence de carbone et d'oxygène indique la présence de matériaux organiques ou de résines utilisées dans la fabrication des cartes mères.

L'aluminium (Al) et le silicium (Si) sont présents en quantités notables, avec 5,33% et 3,69% en masse respectivement. Ces éléments sont couramment utilisés dans les semi-conducteurs et les composants électroniques.

De très faibles quantités d'or (Au) et de molybdène (Mo) ont également été détectées, bien que leurs marges d'erreur soient très élevées, ce qui rend leur quantification peu fiable.

II.5. 2. 3. Résultats d'analyse MEB des cartes mères des téléviseurs (TV)

Les résultats d'analyse par MEB-EDX des cartes mères des téléviseurs (TV) sont illustrés dans la figures II.12 et (tableau 6 Annexe B).

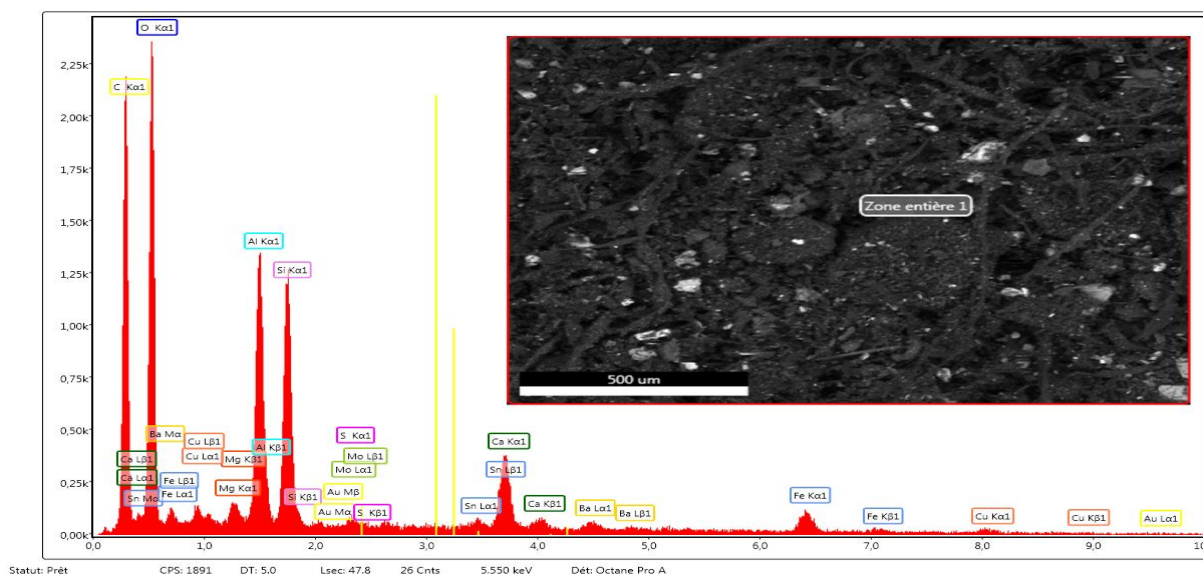


Figure.II.12 : Résultats d'analyse EDX de l'échantillon TV. BRUT

L'élément prédominant dans cet échantillon est le carbone, représentant 76,71% de la masse totale et 95,53% de la composition atomique. Cette forte présence de carbone suggère l'utilisation importante de matériaux organiques ou polymères dans la fabrication de la carte mère.

Les oxydes de silicium (SiO_2) et d'aluminium (Al_2O_3) sont les composés inorganiques les plus abondants, avec respectivement 5,98% et 4,88% de la masse totale. Ces éléments sont probablement liés aux composants semi-conducteurs et aux substrats céramiques utilisés dans les circuits électroniques.

Des traces significatives d'oxyde de brome (Br_2O , 3,16%) ont été détectées, potentiellement issues de retardateurs de flamme utilisés pour améliorer la sécurité du dispositif.

II.6. Conclusion

Les différents essais effectués nous permettent de préparer et d'identifier la composition de déchets électroniques provenant de téléphones, ordinateurs et téléviseurs. Les analyses ont révélé une matrice polymère contenant diverses charges minérales et métalliques issues des composants électroniques avec des différents pourcentages (plastique, fer, cuivre, or, aluminium, ... etc.). La préparation des déchets par déchiquetage, broyage et élimination de certains pourcentages possible de la ferraille par la séparation magnétique permet de faciliter les opérations de valorisation en aval.

CHAPITRE III : ESSAIS DE VALORISATION DES DECHETS D3E

III.1. Introduction

Ce chapitre comporte les essais de valorisation des déchets D3E en utilisant une voie hydro-métallurgique par des réactifs chimiques ainsi que les résultats de contrôle de qualité des produits obtenus (concentrés et rejets) et leurs interprétations.

III.2. Matériel et méthodes de valorisation

III.2.1. Préparation des réactifs

Dans un premier temps, nous préparons les solutions suivantes

- Solution d'acide chlorhydrique (HCl)
- Solution d'acide nitrique (HNO₃)
- Solution d'eau régale (joue un rôle d'un dissolvant des métaux)
- Solution de sulfate ferreux (joue le rôle d'un précipitant d'or)
- Solution de carbonate de sodium (joue le rôle d'un précipitant de cuivre)

NB : Les protocoles de préparation des solutions sont respectivement détaillés dans Annexe.

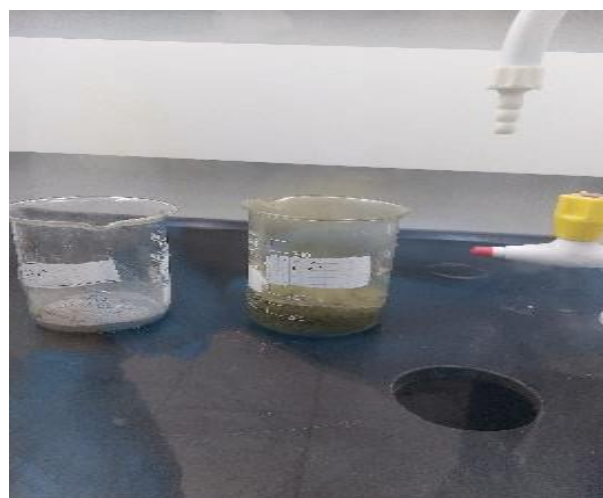


Figure.III.1. Lixiviation à l'eau régale

III.2.2. Séparation solide/liquide

Pour réaliser une séparation solide-liquide par filtration, nous commençons par plier un papier filtre en forme de cône et le plaçons dans un entonnoir. Nous positionnons l'entonnoir au-dessus d'un récipient de collecte. Ensuite, nous versons lentement le mélange solide-liquide dans l'entonnoir. Le liquide passe à travers le papier filtre et est recueilli dans le récipient en dessous, tandis que les particules solides sont retenues par le filtre.



Figure.III.2. Séparation solide/liquide par filtration

III.2.3. Précipitation de l'or

Dans la solution filtrée contenant Au^{3+} , on précipite l'or avec un agent réducteur (sulfate ferreux) puis on filtre le précipité d'or métallique.

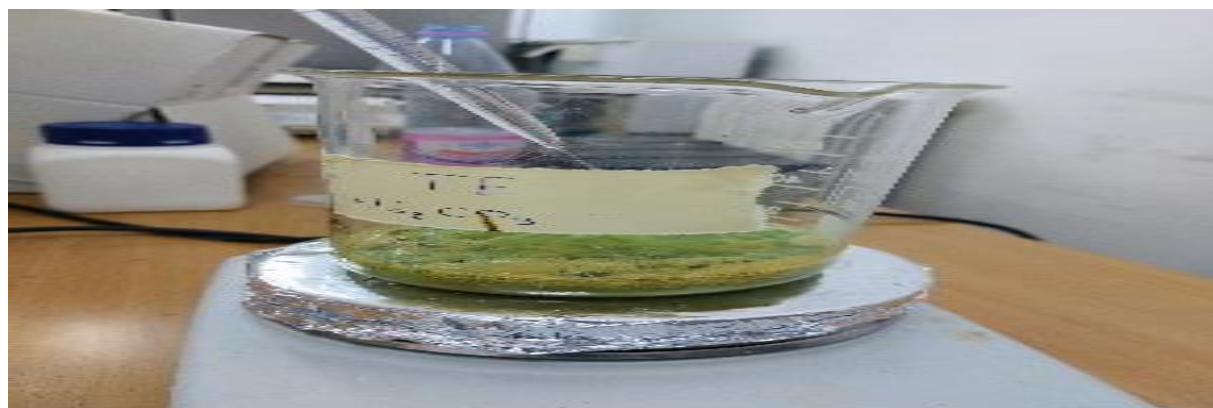


Figure. III.3. Précipitation de l'or

III.2.4. Récupération de cuivre

Pour récupérer le cuivre nous répétons la même méthode que nous avons utilisée déjà pour précipiter l'or, juste l'agent précipitant a été remplacé par le carbonate de sodium.

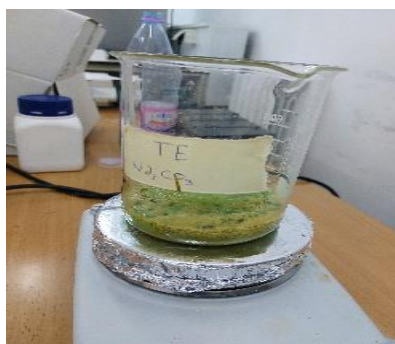


Figure.III.4. Récupération de cuivre

III.3. Caractérisation des concentrés et des rejets obtenus

Les différents produits obtenus au cours de l'expérience (Concentré de cuivre, concentré de l'or, rejet solide) ont été analysés par le MEB (la seule technique disponible).

III.3.1. Analyse par Microscopie Electronique à Balayage (MEB)

III.3.1. 1. Résultats d'analyse MEB de concentré de l'or obtenu

Les résultats d'analyse par MEB-EDX du concentré de l'or récupéré à partir des cartes mères de micro-ordinateurs, de téléphones portables (Te) et de téléviseurs sont illustrés dans les figures III.5, figures III.6 et figures III.7 respectivement (voir aussi tableau 7. Annexe B, tableau 8. Annexe B et tableau 9. Annexe B).

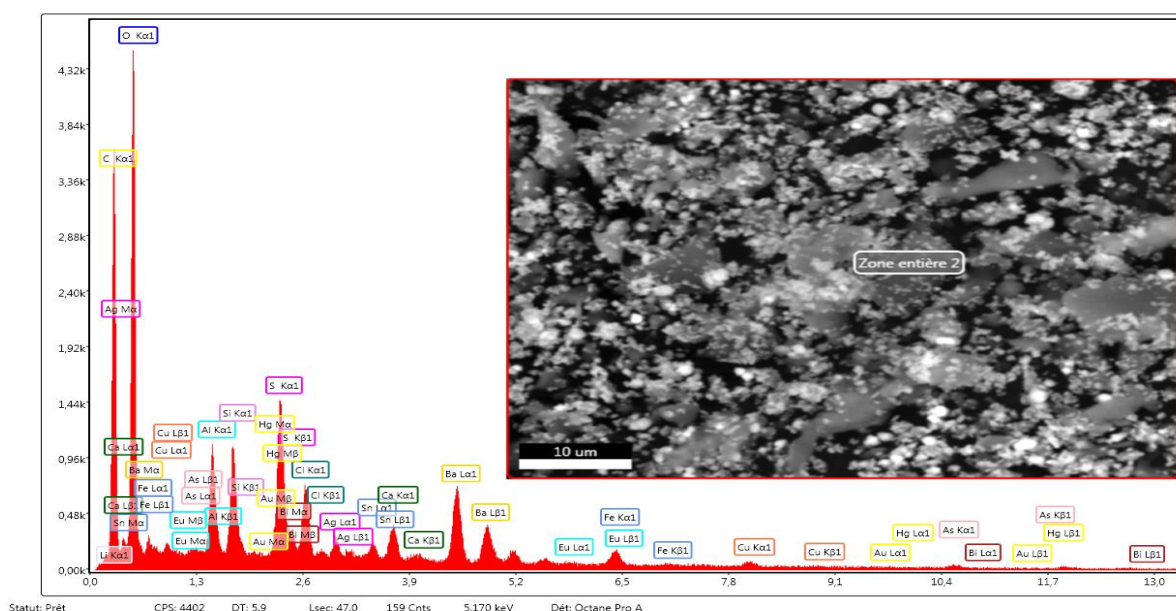


Figure.III.5. Résultats d'analyse de l'échantillon PC Or

Bien que la quantité soit faible (0,36% en Au_2O_3), de l'or est bien détecté dans cet échantillon, La présence d'oxydes métalliques variés tels que Al_2O_3 , SiO_2 , BaO , SnO_2 , CaO , Fe_2O_3 pourrait provenir d'impuretés ou de résidus issus des réactifs utilisés lors de la précipitation (eau régale, sulfate ferreux).

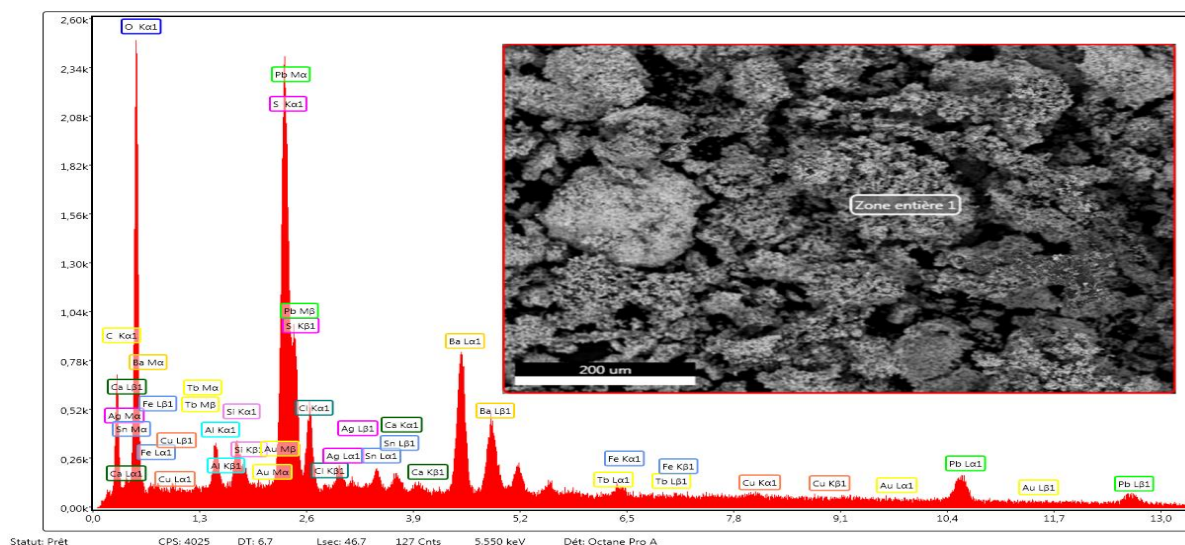


Figure.III.6. Résultats d'analyse EDX de l'échantillon. TE Or

L'analyse MEB-EDX du concentré d'or récupéré à partir des cartes mères de téléphones portables révèle une composition complexe. Le carbone domine avec 45,13% en masse, suivi par le plomb (19,68% sous forme de PbO_2) et le baryum (12,22% sous forme de BaO). La présence de métaux précieux est confirmée, avec 0,49% d'or (sous forme de Au_2O_3) et 1,16% d'argent. D'autres éléments significatifs incluent l'aluminium (6% sous forme de Al_2O_3), le silicium (4,67% sous forme de SiO_2), et le soufre (5,72%). Cette composition reflète la complexité des matériaux utilisés dans les cartes électroniques, combinant des métaux précieux, des métaux de base, et divers composés. La présence notable de carbone suggère probablement des résidus de matériaux organiques ou de polymères utilisés dans la fabrication des cartes. La détection d'or et d'argent, bien qu'en faibles quantités, souligne le potentiel de récupération de ces métaux précieux à partir de déchets électroniques.

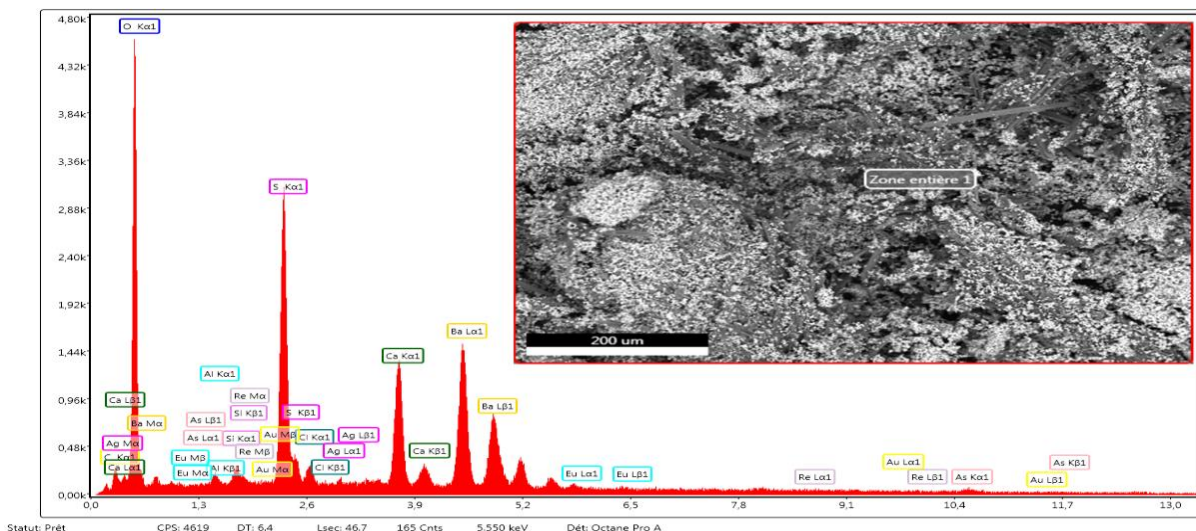


Figure.III.7. Résultats d'analyse EDX de l'échantillon. TV Or

L'analyse MEB-EDX du concentré d'or récupéré à partir des cartes mères de téléviseurs révèle une composition complexe dominée par l'oxygène (61,04% en masse) et le carbone (10,32% en masse). Cette forte présence d'oxygène suggère que de nombreux éléments sont sous forme d'oxydes.

La teneur en or est relativement faible (0,15% en masse), ce qui est typique des déchets électroniques où les métaux précieux sont présents en petites quantités mais restent économiquement intéressants à récupérer. D'autres métaux notables incluent le calcium (3,71% en masse), l'argent (0,36% en masse), et des traces d'europium, de rhénium et d'arsenic. La présence de silicium (1,28% en masse) et d'aluminium (0,57% en masse) est liée aux composants céramiques ou aux circuits imprimés.

En résumé, au lieu d'un précipité d'or pur, les résultats suggèrent que l'échantillon est un mélange complexe de composés oxydés, de métaux et de résidus provenant de la décomposition de la carte mère par lixiviation. Une étape de purification supplémentaire serait nécessaire pour obtenir de l'or plus concentré à partir de ce mélange.

III.3.1. 2. Résultats d'analyse MEB de concentré de cuivre obtenu

Les résultats d'analyse par MEB-EDX du concentré de cuivre récupéré à partir des cartes mères de micro-ordinateurs, de téléphones portables (Te) et de téléviseurs sont illustrés dans les figures III.8, figures III.9 et figures III.10 (voir aussi tableau 10. Annexe B, tableau 11. Annexe B et tableau 12. Annexe B).

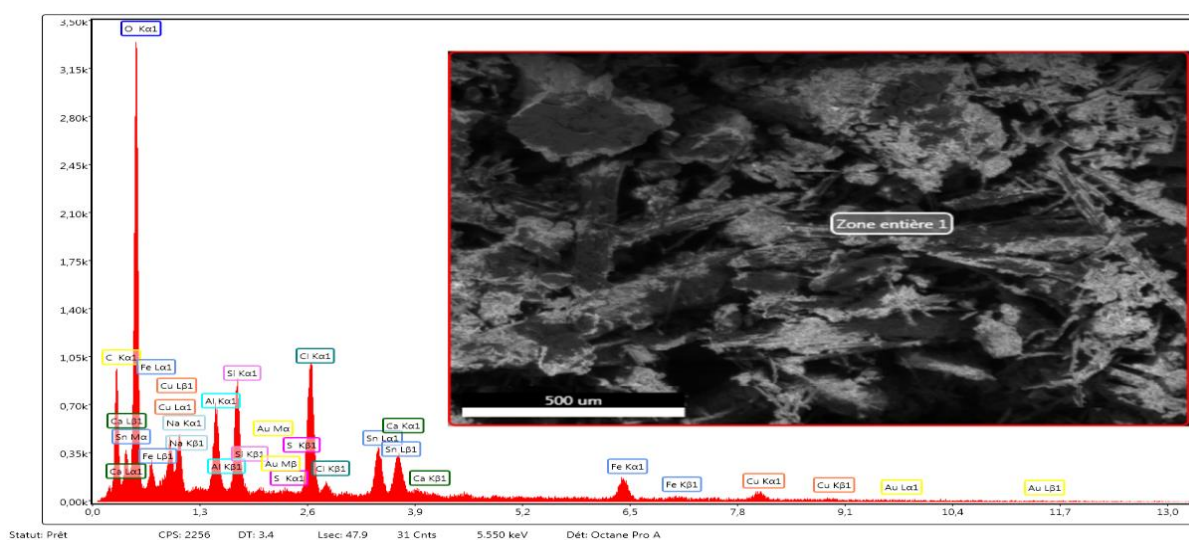


Figure.III.8. Résultats d'analyse EDX de l'échantillon. PC Cu

La composition massique montre une forte teneur en oxygène (53,71%) et en carbone (29,86%), indiquant probablement la présence de composés organiques oxydés provenant de la

décomposition de la carte mère. Le sodium (7,84%) et l'aluminium (3,12%) sont également présents en quantités notables.

Bien que le cuivre soit détecté, sa concentration est extrêmement faible (0,07% massique). De petites quantités d'autres métaux comme l'étain (0,74%), le fer (0,17%), l'or (0,05%) et le calcium (0,13%) sont également présentes.

Des éléments typiquement présents dans les circuits imprimés, tels que le silicium (2,11%), le soufre (0,15%) et le chlore (2,04%), sont détectés.

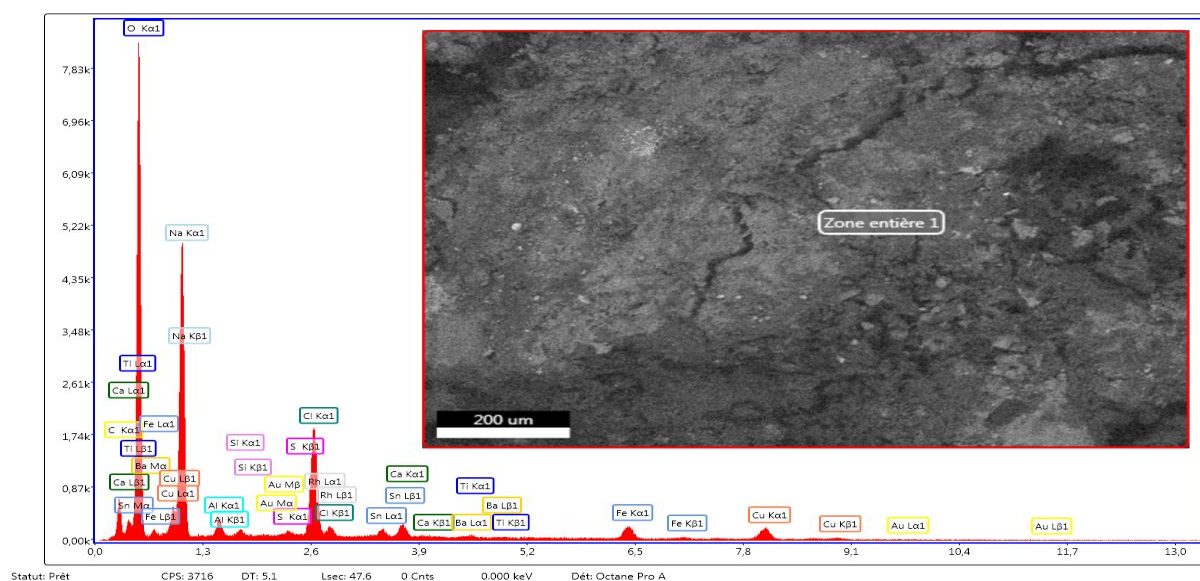


Figure.III.9. Résultats d'analyse EDX de l'échantillon. TE Cu

La composition massique montre de fortes teneurs en oxygène (48,76%) et en sodium (30,64%), suggérant la présence de composés oxydés de sodium. Le carbone (14,42%) est également présent en quantité notable.

Bien que du cuivre soit détecté (0,57% massique), sa concentration reste relativement faible. De très petites quantités d'autres métaux comme l'or (0,12%), le fer (0,40%), l'étain (0,21%) et le calcium (0,15%) sont aussi présentes.

Des éléments typiques des circuits électroniques comme l'aluminium (1,36%), le silicium (0,54%), le soufre (0,14%) et le chlore (2,64%) sont détectés, indiquant probablement des résidus du processus de récupération à partir de la carte mère.

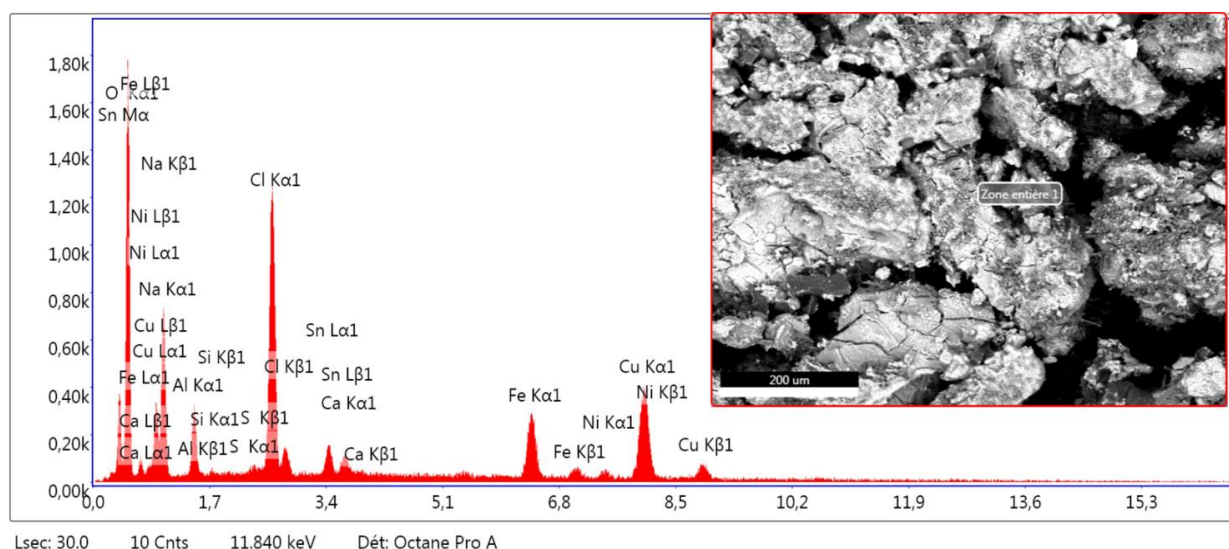


Figure.III.10. Résultats d'analyse EDX de l'échantillon. TV Cu

Le concentré analysé présente une composition complexe, avec plusieurs éléments détectés. L'oxygène est l'élément le plus abondant, représentant 45,49% en masse et 60% en proportion atomique. Cela suggère que de nombreux éléments sont présents sous forme d'oxydes.

Le sodium est le deuxième élément le plus abondant, avec 27,69% en masse. Sa présence importante pourrait être due à des composants électroniques spécifiques ou à des processus de traitement.

D'autres éléments métalliques sont présents en quantités notables, notamment le chlore (9,72%), l'aluminium (6,14%) et le fer (2,32%). La présence de chlore pourrait indiquer des résidus de composés utilisés dans les circuits imprimés ou les processus de traitement.

Le cuivre, qui est l'élément d'intérêt principal dans ce concentré, représente 5,10% en masse. Bien que ce ne soit pas le composant majoritaire, sa présence confirme l'efficacité partielle du processus de récupération.

III.3.1. 3. Résultats d'analyse MEB du rejet solide obtenu

Les résultats d'analyse par MEB-EDX du rejet solide obtenu générer par les opérations de valorisation des déchets D3E sont illustrés dans la figures III.11 et (tableau 13 Annexe B).

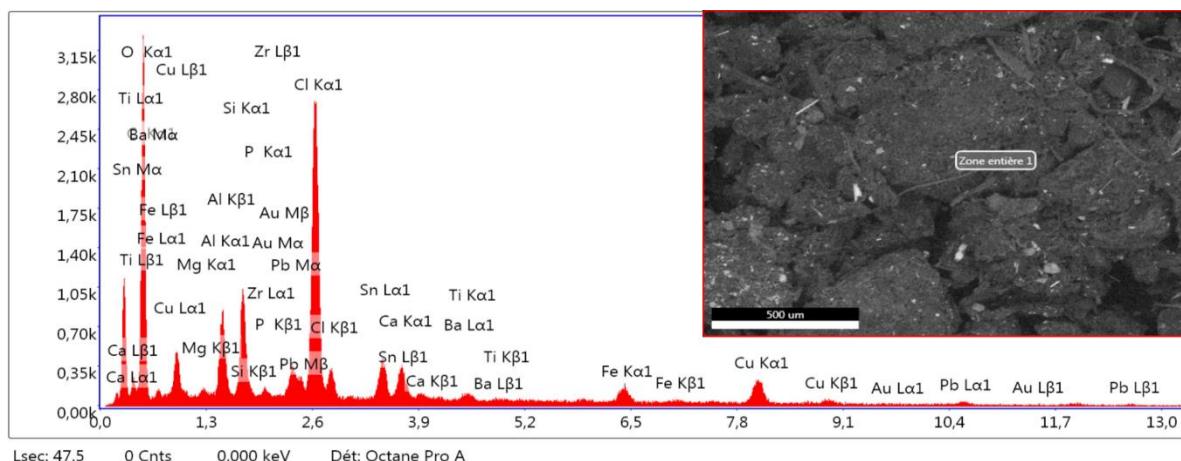


Figure.III.11. Résultats d'analyse EDX du rejet solide

L'analyse MEB-EDX des rejets révèle une composition dominée par le carbone (58,76%), indiquant la présence importante de matières organiques (plastique), probablement des résidus de polymères provenant des cartes électroniques. Cette matière organique peut être réutilisée dans l'industrie des PVC, l'industrie des peintures et dans la fabrication des articles de bureau comme les porte-stylos, les classeurs et les corbeilles.

Les rejets contiennent une quantité significative de chlore (10,01%), ainsi que des oxydes d'aluminium (8,02%) et de silicium (7,91%). Ces éléments proviennent des divers composants des circuits imprimés et des substrats utilisés dans la fabrication des cartes mères. Leur présence dans les rejets indique qu'ils n'ont pas été ciblés par le processus de récupération du cuivre.

III.4. Effets des rejets liquides de la lixiviation sur l'environnement

Les processus chimiques utilisés pour valoriser les déchets électroniques génèrent des effluents acides contenant des substances chimiques dangereuses. Ces rejets peuvent avoir des impacts négatifs sur l'environnement s'ils ne sont pas correctement traités et gérés.

III.4.1. Pollution de l'eau

Les solutions acides telles que l'acide chlorhydrique et l'acide nitrique peuvent s'infiltrer dans les eaux souterraines et de surface, provoquant une pollution de l'eau et modifiant son pH, ce qui peut affecter la vie aquatique.

Afin de déterminer l'effet des rejets liquides sur l'eau, des échantillons ont été prélevés de ces rejets et les eaux usées du complexe de El-Hadjar ont été ajoutées à différentes concentrations comme suit :

- **Échantillon 1** : il est composé de 450 ml de déchets liquides du complexe El-Hadjar.

- **Échantillon 2** : il est composé de 300 ml de déchets d'El-Hadjar + 150 ml de nos rejets liquides de valorisation.
- **Échantillon 3** : il est composé de 300 ml de nos rejets liquides de valorisation + 150 ml de déchets du complexe El-Hadjar.
- **Échantillon 4** : il est composé du Sol mélangé avec l'eau + 300 ml de nos rejets liquides de valorisation.

Ensuite, les échantillons préparés ont été analysés en utilisant le multi-paramètres, les résultats obtenus sont présentés dans le tableau III.01

Tableau III.01. Résultats d'analyse par multi-paramètres pour étudier l'impact environnementales des rejets liquides générés par la valorisation des déchets D3E

Échantillon	Ph	EH (mV)	ORP (mV)	DO (ppm)	PSU (ppm)	TDS (ppm)	CON (mS/cm)	T (C°)
Ech N° 01	7,84	-17,2	29.1	1,8	0,85	843	1687	22,1
Ech N° 02	1,8	333,9	388.0	1,9	28,18	21,82	43,64	22,44
Ech N° 03	1,42	354,9	430.5	2,9	55,14	39,48	78,96	21,25
Ech N° 04	1,6	360	442	3,2	58,5	41,33	8,3	21,3

L'échantillon 1 montre des caractéristiques d'eau presque normale avec un pH légèrement alcalin, une faible salinité et une concentration modérée de solides dissous, bien que le niveau d'oxygène dissous soit bas. En revanche, les échantillons 2.,3. et 4. De sol sont extrêmement acides ($\text{pH} < 2$), rendant l'environnement inhospitalier pour la plupart des formes de vie aquatique. Ces échantillons présentent également des valeurs EH et ORP élevées, indiquant une forte capacité oxydante. Leurs niveaux d'oxygène dissous sont faibles à modérés, ce qui pose des défis pour la survie des organismes aquatiques. Les valeurs de PSU indiquent une salinité extrêmement élevée, ce qui est préoccupant. Malgré cette salinité, la conductivité anormalement basse suggère une faible teneur en métaux.

III.4.2. Impact sur le sol et les plantes.

L'infiltration des solutions acides et des produits chimiques dans le sol peut entraîner à une contamination, le rendant impropre à l'agriculture et pouvant endommager ou tuer les plantes.

Afin de déterminer les effets des rejets liquides sur le sol et les plantes, on a arrosé une plante par ces rejets pour avoir une idée sur la possibilité de contamination du sol et la probabilité d'absorber les métaux et les éléments nocifs par la plante. Les résultats obtenus d'analyse par

MEB de la plante et le sol contaminées sont illustrés dans la figure.III.11 et la figure.III.12 (voir aussi tableau 14. Annexe B et tableau 15. Annexe B).

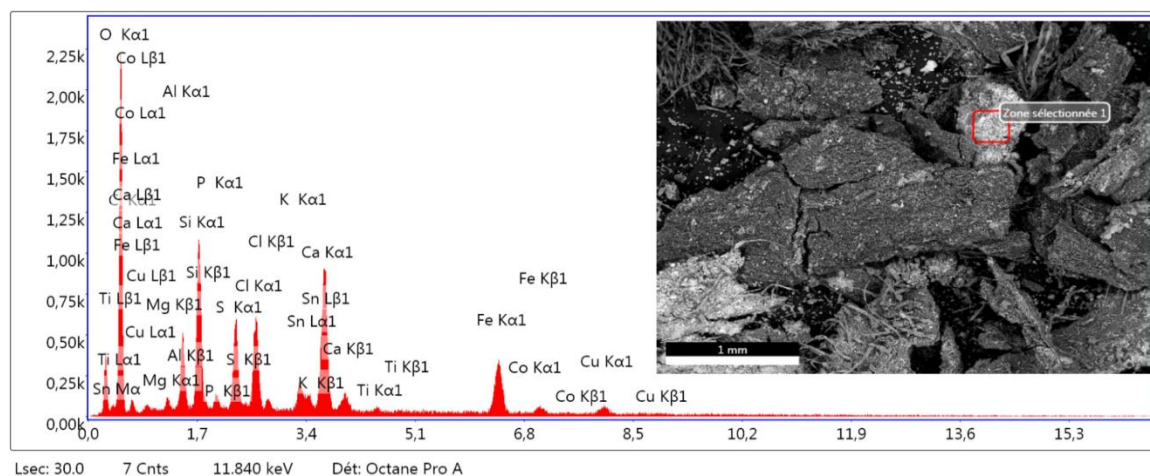


Figure.III.12. Résultats d'analyse EDX d'une plante arrosée par les rejets liquides

Les résultats montrent que l'échantillon de plante contient une variété d'éléments, notamment le carbone, le magnésium, l'aluminium, le silicium, le phosphore, le soufre, le chlore, l'étain, le calcium, le titane, le fer, le cobalt et le cuivre. La présence de ces éléments reflète la composition naturelle de la plante, mais aussi potentiellement l'influence des rejets liquides de lixiviation.

Il y a présence d'éléments tels que le cobalt, le cuivre, le fer et l'étain, qui est liés à l'exposition aux rejets de lixiviation. Bien que leurs teneurs soient généralement faibles, leur présence suggère une contamination potentielle de la plante par ces éléments.

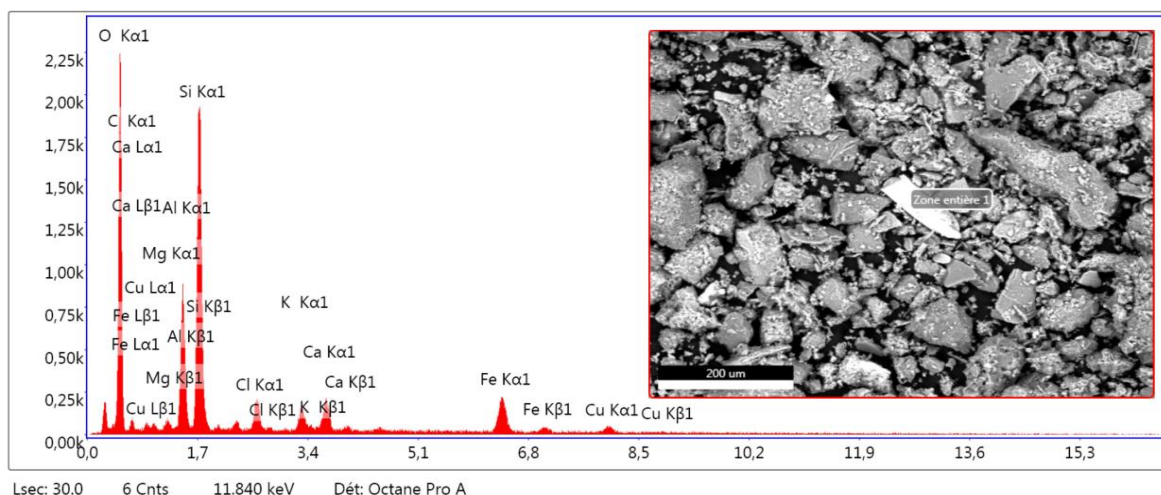


Figure.III.13. Résultats d'analyse EDX de l'échantillon du sol contaminé par les rejets liquides.

III.4.3. Neutralisation des effluents acides

Afin de démunir l'effet néfaste de nos effluents acides avant les générer dans la nature, on doit neutraliser ces rejets liquides pour démunie leurs acidités. Pour cette raison trois essais de neutralisation ont été effectué sur l'échantillon N°03.

- **Essais A** : Par l'ajout de 300 ml de solution d'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à 150 ml de l'échantillon N°03.
- **Essais B** : Par l'ajout 300 ml de solution d'hydroxyde de sodium a NaOH de 150 ml de l'échantillon N°03.
- **Essais C** : Par l'ajout de 300 ml d'eau du robinet a 150 ml de l'échantillon N°03.



Figure. III.14. Neutralisation des effluents acides par NaOH et $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et eau de robinet

Tableau.III.2. Résultat d'analyse par multi paramètre des effluents acides neutralisés

Ec h	Neutralisan t	PH	EH (mv)	ORP (mv)	DO (ppm)	MST (ppm)	TDS (ppm)	PSU	CON (mS/cm)	T (C°)
A	Chaux	2.74	281.5	27.1	28	13.17	16.95	13.4	11.4	23.30
B	NaOH	5.18	155.1	32.2	72.3	36.50	49.47	35.7	29	22.85
C	EAU	2.04	320.6	30.9	39.9	19.29	25.41	16.46	10.9	23.4

Les résultats présentés dans le tableau III.2 illustrent les effets de l'ajout de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, de NaOH et de l'eau du robinet à l'effluent acide. Les valeurs de pH sont restées constamment basses après l'ajout de 300 ml de solution de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ à 150 ml d'eau royale et après l'ajout de 300 ml d'eau du robinet à 150 ml d'eau royale. Les valeurs de pH ont varié d'environ 2,74 à 2,04, ce qui indique une capacité de neutralisation insuffisante. D'autres paramètres, tels que EH (potentiel

d'oxydoréduction), ORP (potentiel d'oxydoréduction) et DO (oxygène dissous), montrent également des variations indiquant l'efficacité partielle du traitement.

Le traitement avec NaOH a conduit à une augmentation significative des niveaux de pH vers des valeurs plus neutres ou basiques (de 5,18 à 10,18) lorsque 300 ml de NaOH ont été ajoutés à 150 ml d'eau royale, ce qui indique une neutralisation plus efficace de l'effluent acide. D'autres paramètres, tels que : EH, ORP, DO et la conductivité (CON), indiquent une amélioration de la qualité de l'eau après traitement.

Nous concluons que l'utilisation de NaOH est plus efficace que $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et l'eau pour neutraliser les effluents acides, permettant ainsi d'atteindre le niveau de pH souhaité et de réduire l'impact environnemental de ces effluents.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a effectué plusieurs expérimentations pour valoriser les DEEE en utilisant l'eau régale pour dissoudre l'or et le cuivre puis les précipites en utilisant respectivement le sulfate ferreux et le carbonate de sodium. Les résultats de la caractérisation du concentré obtenues révèlent que la qualité d'or et de cuivre récupérés reste insuffisante. Cela peut être expliqué par plusieurs raisons:

- Présence d'autres matériaux dans les cartes qui se décomposent également lors de la lixiviation.
- Présence d'autres matériaux peuvent être précipiter également lors de précipitation de l'or et de cuivre.
- Utilisation des filtres dans la séparation solide liquide de qualité probablement inférieure et aussi manque d'équipement de filtration par pompe sous vide.
- Manque de réactifs chimiques avec des quantités suffisantes ou utilisation de réactifs de qualité inférieure, compromettant l'efficacité du processus de lixiviation et de précipitation.

L'analyse des rejets révèle une composition dominée par le carbone, indiquant la présence importante de matières organiques (plastique). Cette matière peut être réutilisée dans l'industrie des PVC, peinture et les articles de bureau comme porte-stylos, classeurs, corbeilles.

Afin de déterminer l'effet des rejets liquides sur l'eau, des échantillons ont été prélevés de ces rejets, les eaux usées de El-Hadjar ont été ajoutées à différentes concentrations. Les résultats montrent que nos rejets liquides ont une influence néfaste sur l'environnement. Les résultats des essais de neutralisation des effluents acides montrent qu'il est possible de réduire leurs effets impact sur l'environnement par l'ajout de NaOH.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les déchets électroniques représentent un défi environnemental croissant à l'échelle mondiale en raison de leur production toujours plus importante et de leur composition complexe en matériaux toxiques et en métaux précieux. La récupération de ces déchets est un secteur très important pour l'évolution d'économie nationale ainsi que pour la protection de l'environnement et la préservation des ressources naturelles.

L'absence de traitement des déchets peut avoir un impact catastrophique sur l'environnement en raison des déchets de métaux lourds (Plomb, Mercure, Cadmium, etc...) et autres substances toxiques. Cependant, ils cachent aussi un potentiel de valorisation non négligeable grâce à la récupération des métaux précieux comme l'or et le cuivre qu'ils contiennent. Les méthodes de valorisation des DEEE sont divers on mentionne au titre d'exemple la pyrolyse, la cyanuration l'amalgamation, et la lixiviation.

Les différentes techniques d'analyses appliquées (DRX et MEB) ont mis en évidence des caractérisations globales pour nos échantillons de déchets.

Cette étude a montré que les déchets électroniques broyés provenant d'appareils comme les téléphones, ordinateurs et téléviseurs sont des mélanges hétérogènes complexes contenant une matrice polymère chargée de métaux précieux issus des composants électroniques (aluminium, fer, cuivre, or, argent, ...etc).

La lixiviation a été proposée pour la valorisation des déchets D3E, est une méthode simple elle consiste à dissoudre les métaux à l'aide de l'eau régale puis les précipiter par un agent de précipitation adéquat suivis par la séparation solide/liquide en utilisant la filtration et finalement le séchage des produits obtenus (concentrés et rejets).

Ces résultats dérivent d'une étude faite à l'échelle du laboratoire. Dans le but de passer à l'échelle industrielle, il est préférable de faire des essais d'abord à l'usine pilote afin d'étudier le dimensionnement de l'usine de valorisation des déchets D3E ainsi que son impact économique et environnementale.

En guise des perspectives nous envisageons d'améliorer la qualité des concentrés récupérés de l'or et de cuivre par des nouveaux procédés, par l'optimisation des paramètres expérimentaux de la lixiviation (changement des réactifs, variation de la concentration des réactifs, changement du temps de précipitation, ... etc.) avec un traitement des rejets solides et liquides, en vue de protéger l'environnement (par exemple par l'ajout de soude caustique ou de chaux aux effluents liquides générés).

Par manque de moyen de préparation mécanique (Déchiquetage et broyage), de caractérisation (FRX) et d'enrichissement (Flottation, Séparation magnétique) ainsi que de

réactifs de lixiviation suffisants et d'un four de fusion pour les métaux, nous n'avons pas pu bien étudier et optimiser la valorisation des déchets D3E par la méthode utilisée ou par les autres méthodes telle que ; la flottation, changement des réactifs ou leurs concentrations. Il est vivement recommandé de procéder à des essais de valorisation de ce type de déchets en utilisant d'autres réactifs et d'autres techniques.

Nous recommandons vivement aux responsables du département et de l'école d'acquérir dans les plus brefs délais tous les équipements nécessaires pour la valorisation et pour la caractérisation ainsi que les réactifs nécessaires ce qui permettra aux élèves ingénieurs ou doctorants de l'utiliser dans les projets similaires et pour permettre aux prochains étudiants d'améliorer et de valider nos résultats.

References bibliographies

ADEME, FANGEA, E., Développement Durable, D., **DEPROUW, A., OVER, M., HOUVENC, S., PENSEC, A.,** 2018. Rapport Annuel du registre des déchets d'équipements électriques et électroniques. 132 pages

Andeobu, L., Wibowo, S., Grandhi, S., 2021. An Assessment of E-waste Generation and Environmental Management of Selected Countries in Africa, Europe and North America: A Systematic Review. *Sci. Total Environ.* 148078. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148078>

Baldé, C.P., Forti V., Gray, V., Kuehr, R., Stegmann, P. : The Global E-waste Monitor – 2017, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna.

GUIDE JR, V. D. R. (2000). Production planning and control for remanufacturing: industry practice and research needs. *Journal of operations Management*, 75(4), 467-483

HAVLIK, T., ORAC, D., BERWANGER, M., & MAUL, A. (2014). The effect of mechanical-physical pretreatment on hydrometallurgical extraction of copper and tin in residue from printed

<https://www.thierrysouccar.com/sites/thierrysouccar.com/files/2016/02/extrait-famille-zero-dechet.pdf>

Loi n° 01-19 du 27 Ramadhan 1422 correspondant au 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.

Mmerek, D., Li, B., Baldwin, A., Hong, L., 2016. The Generation, Composition, Collection, Treatment and Disposal System, and Impact of E-Waste, E-Waste in Transition - From Pollution to Resource. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/61332>

Mor Mbodji. Etude des impacts environnementaux et sanitaires des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) au Sénégal : cas de la ville de Dakar. Chimie analytique. Université de Lyon; Université Cheikh Anta Diop (Dakar), 2021. Français. ffNNT : 2021LYSE1290ff. fftel-03733715f

Ongondo, F.O., Williams, I.D., Cherrett, T.J., 2011. How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes. *Waste Manag.* 31, 714–730. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.023> Pichon, Moret, 2016, p. 25.

systext. (2022, March 1). SystExt. https://www.systext.org/glossaire_amalgamation

Technique de l'ingénieur. (2001.). Techniques De L'Ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/elaboration-et-recyclage-des-metaux-de-transition-42649210/pyrometallurgie-et-electroraffinage-du-cuivre-m2241/pyrometallurgie-m2241niv10001.html>

Techniques De L'Ingénieur, 2024. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/metallurgie-extractive-42369210/metallurgie-extractive-m2235/lixiviation-m2235v4niv10003.html>

Thomas, C. (2016.). Recyclage des cartes électroniques : un aperçu de l'état de l'art. Cairn.info. <https://www.cairn.info/revue-responsabilite-et-environnement-2016-2-page-57.htm>

Weber, A.M., Mawodza, T., Sarkar, B., Menon, M., 2019. Assessment of potentially toxic trace element contamination in urban allotment soils and their uptake by onions: A preliminary case study from Sheffield, England. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 170, 156– 165. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.090>

PCC Group. (2024, May 6). Qu'est-ce que l'eau régale et à quoi sert-elle ? PCC Group Product Portal. <https://www.products.pcc.eu/fr/blog/quest-ce-que-leau-regale-et-a-quoi-sert-elle/>

Hudson, W. G. H. (2024.). FR2530609A1 - Procédé de préparation d'un sulfate ferrique acide à partir du sulfate ferreux - Google Patents. <https://patents.google.com/patent/FR2530609A1/fr>

AZprocede, J. N. (2009.). AZprocede - Réaction: préparation d'une solution de Carbonate de Sodium à partir du produit technique. (C)2009_Auteur. https://www.azprocede.fr/tpgc_sujet_ts1_reaction.html

ANNEXES

Annexe A



Figure.1. Échantillons des déchets électroniques et électriques



Figure 2. Déchiquetage des Cartes mères manuellement

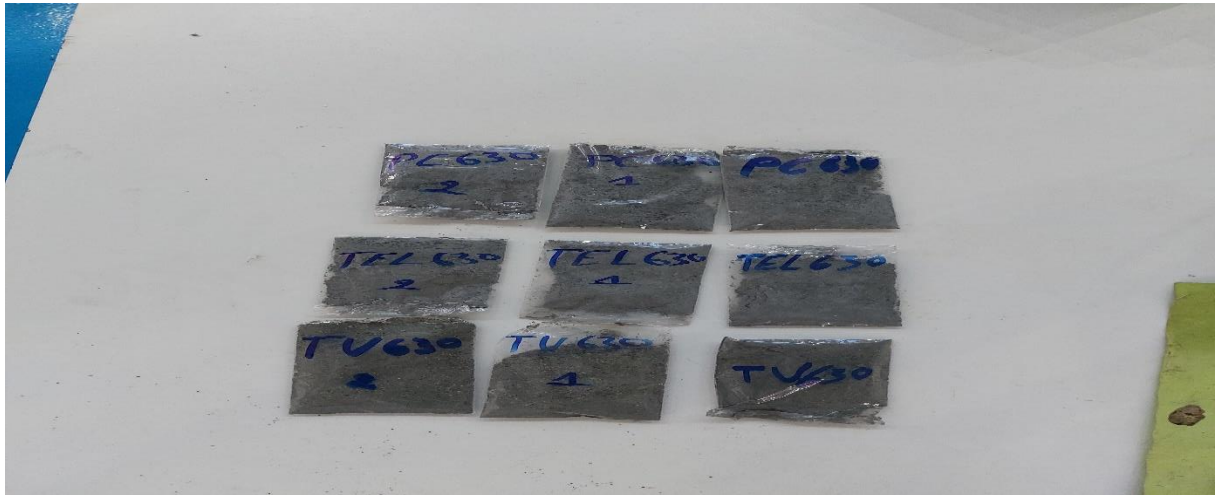


Figure 3. Échantillons des cartes mère broyés.



Figure 4. Diffractomètre de marque Rigaku « Ultima IV »



Figure 5. La Microscopie Electronique à Balayage MEB

Annexe B

Tableau.1 Résultats d'analyse DRX pour les déchets TE

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [$^{\circ}$ 2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	96-901-3015	57	Copper	0.000	0.771	Cu ₄ O ₀
*	01-085-0798	12	Silicon Oxide	0.000	0.038	Si O ₂
*	00-001-0926	5	Tin	0.000	0.047	Sn
*	01-075-1609	4	Iron Oxide	0.000	0.041	Fe ₃ O ₄

Tableau.2. Résultats d'analyse DRX pour les déchets PC

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [$^{\circ}$ 2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	00-001-1180	56	Aluminum	0.000	0.353	Al
*	03-065-9743	49	Copper	0.000	0.596	Cu
*	00-033-1374	30	Tin Oxide	0.000	0.086	Sn O ₂
*	01-083-2467	24	Silicon Oxide	0.000	0.235	Si O ₂
*	01-077-0010	23	Copper Iron Oxide	0.000	0.242	Cu Fe ₂ O ₄
*	96-900-8571	20	Tin	0.000	0.104	Sn ₄ O ₀

Tbleau.3. Résultats d'analyse DRX pour les déchets TV

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [$^{\circ}$ 2Th.]	Scale Factor	Chemical Formula
*	00-001-1180	47	Aluminum	0.000	0.648	Al
*	03-065-9743	40	Copper	0.000	0.743	Cu
*	01-073-1512	37	Aluminum Oxide	0.000	0.421	Al ₂ O ₃
*	01-083-2466	35	Silicon Oxide	0.000	0.664	Si O ₂
*	01-073-2410	28	Magnesium Iron Oxide	0.000	0.204	Mg Fe ₂ O ₄
*	00-033-1374	30	Tin Oxide	0.000	0.399	Sn O ₂
*	01-075-0276	21	Barium Iron Oxide	0.000	0.354	Ba Fe O ₃
*	01-089-4898	19	Tin	0.000	0.131	Sn

Tableau.4: Résultats d'analyse EDX de l'échantillon. Te brut

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
LiK	84.24	91.20	1.53	19.46	0.9480	0.9954	1.1305	1.0000
C K	11.33	7.09	421.18	9.76	0.0265	1.0354	0.2257	1.0000
O K	3.35	1.57	598.40	8.34	0.0113	0.9872	0.3421	1.0000
AlK	0.08	0.02	162.62	7.15	0.0010	0.8748	1.4124	1.0086
SiK	0.07	0.02	164.99	8.36	0.0009	0.8937	1.4915	1.0131
S K	0.14	0.03	287.86	7.25	0.0018	0.8749	1.4753	1.0285
BiM	0.04	0.00	32.47	43.72	0.0009	0.5777	4.1902	0.9991
ClK	0.06	0.01	121.06	10.10	0.0008	0.8322	1.4286	1.0300
AgL	0.04	0.00	33.07	31.89	0.0006	0.6696	2.4150	1.0027
SnL	0.05	0.00	32.28	27.69	0.0007	0.6410	2.1933	1.0044
CaK	0.04	0.01	59.33	12.56	0.0005	0.8434	1.3052	1.0730
BaL	0.42	0.02	173.69	13.80	0.0048	0.6073	1.8513	1.0069
EuL	0.01	0.00	1.90	70.97	0.0001	0.5980	1.5634	1.0149
FeK	0.04	0.01	36.52	14.16	0.0005	0.7525	1.1400	1.2125
CuK	0.02	0.00	11.91	29.69	0.0002	0.7203	1.0982	1.4174
AuL	0.02	0.00	1.93	64.09	0.0001	0.5021	1.2401	1.0705
HgL	0.02	0.00	1.49	61.60	0.0001	0.4930	1.2262	1.0754
AsK	0.03	0.00	8.34	36.30	0.0004	0.6669	1.0604	1.9036

Tableau.5. Résultats d'analyse EDX de l'échantillon PC BRUT

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C	45.13	86.24	91.43	10.64	0.1054	1.1598	0.2622	1.0000
Al 2O3	6.00	1.35	56.91	11.87	0.0056	1.0005	0.2312	1.0013
Si O2	4.67	1.79	55.88	12.14	0.0049	1.0239	0.2842	1.0021
S	5.72	4.10	223.83	8.14	0.0199	1.0053	0.4495	1.0038
Pb O2	19.68	1.89	266.88	10.77	0.1523	0.6626	1.7477	1.0042
Cl	3.20	2.07	80.28	12.46	0.0071	0.9575	0.3016	0.9980
Ag	1.16	0.25	17.55	28.48	0.0052	0.7718	0.7574	1.0025
Sn	0.67	0.13	10.32	41.18	0.0034	0.7400	0.8961	1.0039
Ca O	0.06	0.02	1.29	99.89	0.0001	0.9736	0.4609	0.9980
Ba O	12.22	1.83	171.49	8.12	0.0685	0.7032	1.1574	1.0019
Tb 2O3	0.14	0.01	2.13	74.09	0.0008	0.6786	1.2108	1.0072
Fe	0.50	0.20	17.42	21.10	0.0025	0.8741	0.7611	0.9984
Cu O	0.36	0.10	8.11	50.42	0.0017	0.8402	0.8922	1.0080
Au 2O3	0.49	0.03	3.30	63.80	0.0026	0.5920	1.2467	1.0251

Tableau.6: Résultats d'analyse de l'échantillon TV. BRUT

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	47.63	59.51	415.23	8.58	0.1682	1.0472	0.3372	1.0000
O K	37.31	35.00	432.08	10.37	0.0544	1.0021	0.1456	1.0000
MgK	1.05	0.65	55.12	11.92	0.0023	0.9257	0.2334	1.0042
BrL	4.99	0.94	230.99	3.45	0.0301	0.7131	0.8468	1.0000
AlK	0.36	0.20	29.71	16.33	0.0010	0.8914	0.3220	1.0038
SiK	5.20	2.78	552.00	8.26	0.0171	0.9109	0.3594	1.0026
S K	0.11	0.05	16.41	20.91	0.0005	0.8921	0.5185	1.0070
SnL	0.15	0.02	16.63	35.59	0.0019	0.6537	1.9209	1.0022
CaK	0.86	0.32	199.50	3.58	0.0075	0.8601	0.9878	1.0275
BaL	0.23	0.03	19.89	32.17	0.0028	0.6191	1.9362	1.0055
TiK	0.13	0.04	32.64	15.51	0.0012	0.7796	1.0690	1.0543
FeK	0.67	0.18	125.73	6.60	0.0065	0.7668	1.1227	1.1360
NiK	0.19	0.05	30.19	14.66	0.0019	0.7737	1.1115	1.1906
CuK	1.01	0.24	134.61	6.76	0.0099	0.7339	1.1066	1.2101
AuL	0.10	0.01	2.62	70.16	0.0007	0.5117	1.3595	1.0426

Tableau.7. Résultats d'analyse de l'échantillon PC Or

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	10.32	16.44	36.34	14.73	0.0286	1.1038	0.2511	1.0000
O K	61.04	72.96	649.99	9.14	0.1559	1.0588	0.2412	1.0000
AlK	0.57	0.41	16.04	13.78	0.0012	0.9455	0.2137	1.0059
SiK	1.28	0.87	56.68	11.60	0.0037	0.9668	0.2984	1.0094
S K	8.73	5.21	616.86	6.58	0.0434	0.9477	0.5178	1.0121
ClK	0.69	0.37	45.17	16.06	0.0032	0.9020	0.5071	1.0182
AgL	0.36	0.06	14.89	18.50	0.0032	0.7262	1.2175	1.0057
CaK	3.71	1.77	318.49	4.79	0.0283	0.9152	0.8024	1.0396
BaL	12.34	1.72	379.39	7.60	0.1181	0.6596	1.4524	0.9993
EuL	0.08	0.01	2.18	74.79	0.0007	0.6500	1.2966	0.9982
ReL	0.10	0.01	1.55	67.42	0.0007	0.5755	1.2586	1.0067
AuL	0.15	0.01	1.53	66.41	0.0010	0.5484	1.2257	1.0089
AsK	0.62	0.16	11.64	29.78	0.0054	0.7277	1.0200	1.1650

Tableau.8. Résultats d'analyse de l'échantillon. TE Or

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	44.58	54.97	248.18	9.14	0.1609	1.0459	0.3451	1.0000
O K	41.49	38.41	306.07	10.79	0.0604	0.9950	0.1463	1.0000
MgK	1.35	0.82	42.90	11.26	0.0037	0.9116	0.3007	1.0047
AlK	5.33	2.93	251.31	8.25	0.0201	0.8765	0.4290	1.0044
SiK	3.69	1.95	217.37	7.88	0.0167	0.8944	0.5052	1.0036
AuM	0.03	0.00	0.94	99.99	0.0004	0.5623	2.2686	1.0009
MoL	0.14	0.02	4.96	43.03	0.0012	0.6675	1.2929	0.9999
S K	0.00	0.00	0.02	99.99	0.0000	0.8735	0.7250	1.0090
SnL	0.32	0.04	9.59	37.56	0.0031	0.6208	1.5625	1.0015
CaK	1.32	0.49	83.24	5.64	0.0117	0.8375	1.0298	1.0275
BaL	0.53	0.06	9.79	39.25	0.0046	0.5818	1.4825	1.0030
FeK	0.89	0.24	27.67	13.71	0.0077	0.7375	1.0612	1.1063
CuK	0.33	0.08	5.55	36.45	0.0029	0.6974	1.0480	1.1957

Tableau.9. Résultats d'analyse de l'échantillon. TV Or

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C	76.71	95.53	328.31	8.29	0.2758	1.0416	0.4128	1.0000
Mg O	1.57	0.58	23.73	12.20	0.0028	0.9090	0.3924	1.0036
Br 2O	3.16	0.27	56.90	6.85	0.0181	0.6855	1.1011	1.0000
Al 2O3	4.88	0.72	91.71	9.09	0.0103	0.8741	0.5421	1.0030
Si O2	5.98	1.49	113.91	8.49	0.0124	0.8921	0.5918	1.0029
Au 2O3	0.08	0.00	1.26	99.99	0.0008	0.5611	2.3104	1.0027
Pb O2	1.02	0.06	16.11	24.20	0.0087	0.5503	2.1238	1.0042
Cl	0.18	0.08	7.96	26.94	0.0011	0.8282	0.8781	1.0045
Sn	1.12	0.14	19.34	20.46	0.0087	0.6198	1.5051	1.0027
Ca O	1.76	0.47	44.53	9.15	0.0091	0.8363	1.0276	1.0099
Ba O	0.94	0.09	8.78	44.56	0.0058	0.5812	1.4140	1.0036
Ti O2	0.53	0.10	9.52	22.71	0.0021	0.7559	1.0353	1.0192
Fe	1.07	0.29	17.42	17.56	0.0072	0.7371	1.0468	1.0464
Cu O	1.01	0.19	6.96	30.85	0.0053	0.6974	1.0384	1.0860

Tableau.10. Résultats d'analyse de l'échantillon. PC Cu

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	29.86	38.54	125.95	9.63	0.1037	1.0493	0.3310	1.0000
O K	53.71	52.04	457.94	9.35	0.1259	1.0036	0.2335	1.0000
NaK	7.84	5.29	92.56	15.75	0.0126	0.9109	0.1762	1.0016
AlK	3.12	1.79	99.86	10.06	0.0073	0.8918	0.2622	1.0038
SiK	2.11	1.17	98.08	9.75	0.0060	0.9113	0.3091	1.0044
S K	0.15	0.07	12.02	17.57	0.0006	0.8922	0.4675	1.0117
ClK	2.04	0.89	211.97	6.72	0.0103	0.8486	0.5914	1.0112
SnL	0.74	0.10	61.07	23.85	0.0136	0.6533	2.8319	1.0000
CaK	0.13	0.05	24.38	12.10	0.0011	0.8596	0.9761	1.0239
FeK	0.17	0.05	45.22	14.24	0.0021	0.7658	1.4103	1.1355
CuK	0.07	0.02	15.84	24.72	0.0009	0.7327	1.3819	1.2669
AuL	0.05	0.00	2.10	77.18	0.0006	0.5104	2.3284	1.0408

Tableau.11. Résultats d'analyse de l'échantillon. TE Cu

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	32.23	43.36	132.76	11.12	0.0870	1.0630	0.2540	1.0000
O K	47.43	47.91	403.55	10.07	0.0797	1.0177	0.1651	1.0000
MgK	1.69	1.12	49.15	11.44	0.0036	0.9406	0.2264	1.0030
AlK	3.93	2.35	175.34	9.07	0.0114	0.9059	0.3201	1.0036
SiK	2.38	1.37	148.38	8.66	0.0089	0.9259	0.4034	1.0043
ZrL	0.52	0.09	19.20	16.61	0.0040	0.7137	1.0626	1.0022
PbM	1.07	0.08	39.60	20.54	0.0131	0.5974	2.0204	1.0167
ClK	5.84	2.66	545.39	4.48	0.0372	0.8628	0.7363	1.0031
RhL	0.24	0.04	11.70	36.00	0.0023	0.7010	1.3384	1.0009
SnL	1.80	0.24	76.85	10.88	0.0173	0.6646	1.4490	1.0007
CaK	0.32	0.13	29.13	14.89	0.0026	0.8744	0.8950	1.0073
BaL	0.33	0.04	10.40	43.10	0.0030	0.6296	1.4726	1.0021
TiK	0.13	0.04	11.72	27.07	0.0010	0.7927	0.9632	1.0161
FeK	0.61	0.18	38.91	13.58	0.0052	0.7799	1.0424	1.0489
CuK	1.48	0.38	64.54	7.95	0.0125	0.7465	1.0493	1.0793

Tableau.12. Résultats d'analyse de l'échantillon. TV Cu

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	14.42	20.87	89.20	12.56	0.0390	1.0769	0.2509	1.0000
O K	48.76	52.98	1065.29	8.54	0.1433	1.0305	0.2852	1.0000
NaK	30.64	23.17	791.15	9.78	0.0514	0.9359	0.1790	1.0007
AlK	1.36	0.88	59.33	14.49	0.0023	0.9165	0.1834	1.0023
SiK	0.54	0.33	36.71	12.03	0.0013	0.9365	0.2494	1.0036
S K	0.14	0.07	16.21	19.89	0.0006	0.9170	0.4656	1.0099
ClK	2.64	1.30	383.90	6.53	0.0138	0.8723	0.5943	1.0087
RhL	0.00	0.00	0.02	99.99	0.0000	0.7086	1.3127	0.9997
SnL	0.21	0.03	17.48	32.54	0.0023	0.6716	1.6285	1.0000
CaK	0.15	0.06	26.70	12.15	0.0012	0.8837	0.8841	1.0238
BaL	0.04	0.01	2.83	69.76	0.0005	0.6360	1.7492	1.0018
TiK	0.00	0.00	0.93	99.99	0.0000	0.8008	1.0076	1.0490
FeK	0.40	0.12	62.31	8.51	0.0039	0.7874	1.0937	1.1292
CuK	0.57	0.16	63.43	8.36	0.0057	0.7534	1.0899	1.2189
AuL	0.12	0.01	2.65	62.08	0.0009	0.5251	1.3176	1.0311

Tableau.13. Résultats d'analyse de l'échantillon. Des Rejet solide

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
O K	45.49	60.00	368.18	8.79	0.1469	1.0693	0.3021	1.0000
NaK	27.69	25.42	207.04	10.91	0.0399	0.9771	0.1472	1.0015
AlK	6.14	4.80	86.75	11.82	0.0100	0.9599	0.1689	1.0037
SiK	0.75	0.56	15.09	15.15	0.0016	0.9823	0.2095	1.0061
S K	0.57	0.37	20.67	16.78	0.0022	0.9643	0.3964	1.0165
ClK	9.72	5.79	427.80	6.84	0.0457	0.9184	0.5079	1.0083
SnL	1.85	0.33	44.86	15.69	0.0161	0.7226	1.2017	1.0014
CaK	0.14	0.07	7.19	49.36	0.0009	0.9335	0.7064	1.0194
FeK	2.32	0.88	130.31	5.02	0.0215	0.8383	1.0046	1.1001
NiK	0.24	0.09	11.66	29.47	0.0023	0.8489	1.0166	1.1054
CuK	5.10	1.69	210.92	4.03	0.0456	0.8070	1.0269	1.0798

Tableau.14. Résultats d'analyse de l'échantillon d'une plante arrosée par les rejets liquides

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C K	19.61	27.75	60.71	13.26	0.0495	1.0593	0.2383	1.0000
O K	55.98	59.45	455.83	9.73	0.1132	1.0181	0.1985	1.0000
MgK	2.07	1.45	48.30	12.14	0.0040	0.9462	0.2038	1.0052
AlK	3.94	2.48	141.66	9.87	0.0101	0.9122	0.2805	1.0071
SiK	6.00	3.63	310.97	8.53	0.0199	0.9332	0.3535	1.0067
P K	0.61	0.33	30.71	17.24	0.0022	0.8972	0.3969	1.0107
S K	2.48	1.31	177.64	7.83	0.0118	0.9157	0.5153	1.0127
ClK	2.44	1.17	195.30	7.08	0.0130	0.8719	0.6028	1.0142
K K	0.59	0.26	58.99	11.81	0.0042	0.8691	0.7895	1.0285
SnL	0.77	0.11	35.55	18.91	0.0080	0.6856	1.4990	1.0008
CaK	3.29	1.39	324.16	4.08	0.0257	0.8858	0.8681	1.0180
TiK	0.07	0.03	7.56	50.34	0.0006	0.8043	0.9241	1.0377
FeK	1.74	0.53	151.92	5.08	0.0156	0.7947	1.0448	1.0763
CoK	0.02	0.01	1.44	83.21	0.0002	0.7773	1.0531	1.0995
CuK	0.39	0.10	26.42	18.27	0.0036	0.7647	1.0519	1.1428

Tableau.15. Résultats d'analyse de l'échantillon du sol contaminé par l'eau régale.

Elément	% de masse	% atomique	Intensité totale	Erreur %	Kratio	Z	A	F
C	26.72	66.37	33.72	35.55	0.0319	1.0665	0.1799	1.0000
Mg O	3.49	2.58	34.49	12.85	0.0033	0.9531	0.2645	1.0101
Al 2O3	18.13	5.31	239.11	8.71	0.0199	0.9189	0.3579	1.0113
Si O2	43.07	21.38	568.78	8.18	0.0423	0.9401	0.3578	1.0027
Cl	2.07	1.74	70.36	10.98	0.0054	0.8784	0.4755	1.0092
K	1.05	0.80	48.62	14.56	0.0040	0.8757	0.6840	1.0176
Ca O	2.06	1.09	69.16	10.24	0.0064	0.8925	0.7664	1.0184
Fe 2O3	2.94	0.55	95.79	6.77	0.0114	0.8008	1.0331	1.0749
Cu O	0.47	0.18	13.87	25.92	0.0022	0.7706	1.0445	1.1412

Annexe C

Préparation de l'eau régale

Ingrédients nécessaires :

- Acide chlorhydrique (HCl) concentré à 37%
- Acide nitrique (HNO₃) concentré à 68-70%

Précautions de sécurité :

- Portez des gants, des lunettes et un équipement de protection approprié
- Travaillez sous une hotte chimique bien ventilée
- Gardez un bol d'eau froide à proximité pour refroidir le mélange si nécessaire

Instructions :

1. Dans un récipient en verre résistant aux acides, mesurez 3 parts en volume d'acide chlorhydrique concentré. **(PCC Group, 2024)**
2. Ajoutez lentement 1 part en volume d'acide nitrique concentré au mélange.
3. Remuez doucement le mélange avec une tige en verre. Une réaction exothermique aura lieu, dégageant des vapeurs nitreuses rouges/brunes toxiques.
4. Laissez le mélange se stabiliser et refroidir avant utilisation.



Figure.1. Préparation de l'eau régale

NB : L'eau régale doit être préparée juste avant son utilisation, car le mélange perd son pouvoir oxydant au fil du temps

Préparation de sulfate ferreux (Hudson,2024)

Ingrédients :

- Sulfate ferreux heptahydraté ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) en poudre ou cristaux
- Eau distillée ou déminéralisée
- Équipement de laboratoire : balance, bécher, agitateur magnétique, fiole jaugée de 1L

Calcul de la masse nécessaire :

- Masse molaire du $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ = 278,02 g/mol
- Concentration désirée = 0,7 mol/L
- Volume final = 1 L
- Masse de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ = Concentration x Volume x Masse molaire = 0,7 mol/L x 1 L x 278,02 g/mol = 194,6 g

Mode opératoire :

1. Peser précisément 194,6 g de sulfate ferreux heptahydraté sur une balance.
2. Transférer la poudre/cristaux dans un bécher de 1 à 2 L de capacité.
3. Ajouter environ 600 mL d'eau distillée au bécher et agiter sur une plaque chauffante à 60-70°C pour dissoudre complètement les cristaux.
4. Une fois dissous, laisser refroidir la solution à température ambiante.
5. Transférer quantitativement la solution dans une fiole jaugée de 1 L propre et rincée en utilisant de l'eau distillée supplémentaire.
6. Compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge de 1 L et agiter vigoureusement.
7. Filtrer si nécessaire pour retirer toute particule insoluble.
8. Transférer dans un flacon ambré ou opaque pour le stockage à l'abri de la lumière.

Vous obtiendrez ainsi environ 1 L de solution limpide vert pâle de sulfate ferreux à 0,7 M exactement.



Figure.2. Préparation de sulfate ferreux

Préparation de Carbonate de Calcium

Matériel nécessaire :

- Carbonate de sodium anhydre (Na_2CO_3) en poudre
- Eau distillée
- Bécher de 150 ml
- Agitateur magnétique et barreau aimanté
- Balance de précision
- Spatule

Etapas du protocole :

1. Calculer la masse de Na_2CO_3 requise pour 100 mL de solution. Par exemple, pour une concentration de 0,5 M : $\text{Masse Na}_2\text{CO}_3 = 0,5 \text{ mol/L} * 0,1 \text{ L} * 105,99 \text{ g/mol} = 5,3 \text{ g}$
2. Peser avec précision 5,3 g de Na_2CO_3 dans le bécher de 150 mL.
3. Ajouter environ 80 mL d'eau distillée dans le bécher.
4. Placer un barreau aimanté et agiter à l'aide de l'agitateur magnétique pendant 10-15 min pour dissoudre complètement le sel.
5. Une fois totalement dissous, ajuster le volume final à 100 mL avec l'eau distillée restante.
(AZprocede, 2009.)
6. La solution de carbonate de sodium 0,5 M est désormais prête pour être ajoutée goutte-à-goutte à la solution de cuivre sous agitation.
7. Après ajout complet, laisser agiter 30 min pour permettre la précipitation du CuCO_3 .
8. Filtrer le précipité sous vide.
9. Rincer le précipité à l'eau distillée pour éliminer les traces de sels.
10. Sécher le précipité de CuCO_3 à l'étuve à 105°



Figure.3.Préparation de Carbonate de Calcium