

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



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 : Mr. MIMOUNI Younes

Mr. HAFSI Kouceila

Récupération et recyclage des métaux nobles contenus dans les déchets d'équipements électroniques et électriques

Soutenu le 03 / 07 /2024 devant le jury composé de :

Président :	Mme. K. KICHER	M.A.A.	U.A.M.B
Promotrice :	Mme. Z. SOUICI	M.C.A	U.A.M.B
Examineur:	Mr. S. BOUABDALAH	M.C.A	U.A.M.B
Co-Promoteur :	Melle. N. SI TAYEB	Doctorante	U.A.M.B

Année universitaire 2023/2024

Remerciements

En guise de reconnaissance, nous tenons à témoigner nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de notre projet de fin d'étude et à l'élaboration de ce modeste travail.

Nous exprimons notre grande gratitude et nos sincères remerciements à notre Promotrice Mme Z. SOUICI pour sa patience, sa disponibilité, ses conseils, ses efforts attachants et son soutien moral, sans elle ce travail ne pourrait pas voir jour.

Nos chaleureux remerciements sont adressés à Mme.K. KICHERM.A., à l'université de Bejaia, d'avoir accepté de présider le jury d'évaluation. Ainsi que Mr S. BOUABDALAH, enseignant-chercheur à l'université de Bejaia qu'ils ont manifesté en acceptant d'examiner ce modeste travail et l'enrichir par leurs utiles propositions.

Nous remercions Melle H. SI TAYEB pour son aide inestimable, ses conseils pleins de sens et son effort.

Enfin, nous n'oserons jamais oublier de remercier Mr A.H. SOUICI pour son énorme effort, ses sincères orientations et conseils.

Dédicace

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail à :

Mon père ABDRAHMANE, qui m'a poussée toujours à être au-devant, qui n'a jamais cessé de m'encourager dans la poursuite de mes études en m'apportant tout son soutien et qui peut être fier aujourd'hui de son petit-fils après les années de sacrifices. Je serais toute ma vie reconnaissant, que Dieu le garde ;

Ma mère FARIDA, la plus forte Maman au monde, ma source de courage et d'inspiration, celle qui a implanté en moi l'amour du savoir et qui a sacrifié sa jeunesse, son temps et son énergie pour faire de moi la personne que je suis aujourd'hui. Je suis très fière d'être ton fils et prêt à tout faire pour te voir épanouie!

Ma deuxième mère MEGDOUDA, qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi, qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'étude. Dieu la protège pour nous Votre satisfaction restera toujours mon but

Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de vous

Mon très cher frère NABIL qui n'a jamais cessé de m'encourager et de sacrifier pour m'aider à avancer dans la vie. Merci pour tes précieux conseils, le bonheur que tu m'apportes au quotidien et le réconfort que tu m'as toujours apporté

Mon binôme YOUNES, qui était comme un frère pour moi, qui m'a soutenu moralement, m'a encouragé durant notre travail, Merci pour tout ce que tu as fait pour moi cher frère

Ma femme ZAINA

Ton soutien moral, ton encouragement, ton aide, tes conseils, ta gentillesse, m'ont permis d'avancer et réussir dans mes études. Ce travail soit témoignage de ma reconnaissance et de mon amour sincère et fidèle

Mon très cher frère ALA EDINE qui nous as quitté le 03/08/2022, puisse dieu l'accueillir dans son infini miséricorde.

Mes chers (e) amis (es) :

*LOTFI, RAFIK, SAMIR, CHERIF, BOUSSOU, MASSINISSA, TARIK, YOUNES, MICIPSA,
FOUAD, ZIDENE, MEKHELOUF*

AMEL, KENZA, MERIEME, CHERIFA

KOCEILA

Dédicace

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail à :

Mon père AREZKI, qui m'a poussée toujours à être au-devant, qui n'a jamais cessé de m'encourager dans la poursuite de mes études en m'apportant tout son soutien et qui peut être fier aujourd'hui de son petit-fils après les années de sacrifices. Je serais toute ma vie reconnaissant, que Dieu le garde ;

Ma mère FARIDA, la plus forte Maman au monde, ma source de courage et d'inspiration, celle qui a implanté en moi l'amour du savoir et qui a sacrifié sa jeunesse, son temps et son énergie pour faire de moi la personne que je suis aujourd'hui. Je suis très fière d'être ton fils et prêt à tout faire pour te voir épanouie

Mes chers (e) amis (es) :

*LOTFI, RAFIK, SAMIR, CHERIF, BOUSSOU, MASSINISSA, TARIK, YOUNES, MICIPSA,
ZIDENE, MEKHELOUF*

YOUNES

Résumé

En 2019, 53,6 millions de tonnes de DEEE ont été produits dans le monde entier, et ce volume est en croissance exponentielle suite à la perpétuelle évolution technologique dictée par l'industrie électronique.

Il s'agit d'une technologie traditionnelle pour la récupération des métaux des DEEE, notamment les métaux précieux des déchets issus des plaques électroniques.

Les résultats ont montré après analyses des solutions lixiviantes par la spectroscopie UV-visible l'existence de plusieurs métaux nobles en plus des éléments de terres rares.

Tandis que la caractérisation de la poudre issue du séchage de la solution lixiviantes utilisant l'eau régale, a montré l'existence de l'argent libre en plus de l'or et de platine

Mots clés : DEEE, extraction, lixiviation, métaux nobles, acides.

Abstract

In 2019, 53.6 million tonnes of WEEE were produced worldwide, and this volume is growing exponentially as a result of the perpetual technological evolution dictated by the electronics industry. This is a traditional technology for recovering metals from WEEE, particularly precious metals from waste from electronic plates. The results of the UV-visible spectroscopic analysis of the leaching solutions showed the presence of several noble metals in addition to rare earth elements, while characterization of the powder obtained from drying the leaching solution using aqua regia revealed the presence of free silver in addition to gold and platinum.

Keywords: WEEE, extraction, leaching, noble metals, acids.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Généralité sur les déchets d'équipements électroniques et électriques	4
I.1. Qu'est-ce qu'un déchet?	4
I.2. Définition du déchet au sens de la loi Algérienne.....	5
I.3. Classification des déchets selon la loi Algérienne	5
I.4. Les déchets d'équipements électroniques et électriques (DEEE)	6
I.4.1. Catégorisation des déchets d'équipements électroniques et électriques (DEEE)...	6
I.4.2. Les déchets d'équipements électroniques et électriques (DEEE) dans le monde....	8
I.4.3. Gestion des déchets d'équipements électroniques et électriques (DEEE) en Algérie. Lois et procédure	11
Chapitre II: Recyclage des déchets d'équipements électroniques et électriques (DEEE)	15
II.1. Généralités.....	15
II.2. La collecte	15
II.3. Démâtage.....	16
II.4. Broyage	19
II.5. Différenciation	19
II.6. Séparation.....	20
II.7. Nature et composition	20
II.8. Technologie de recyclage des PCB.....	22
II.8.1. Recyclage des métaux précieux par un processus de Pyrométallurgie.....	23
II.8.2. Recyclage des métaux par un processus de l'Incineration.....	23
II.8.3. Recyclage des métaux précieux par un processus de Pyrolyse.....	24
II.8.4. Recyclage des métaux précieux par un processus de l'Hydrométallurgique.....	24
Chapitre III : Matériaux, protocole expérimental et méthode d'analyse	30
III.1. Echantillonnage des cartes électronique.....	30
III.2. Préparation des échantillons	32
III.3. Broyage des circuits intégrés (CI) et transistors.....	34
III.4. Extraction par voie humide (Lixiviation)	35
III.5. Techniques de caractérisation.....	41
III.5.1. Analyse par diffraction des rayons X [44]	42

III.5.2. Principe de la diffraction des rayons X [44]	42
III.5.3. Spectroscopie UV-visible	44
Chapitre IV : Résultats et discussions	45
IV.1. Résultat de la spectroscopie UV-visible.....	45
IV.2. Résultats de la diffraction des rayons X	49
Conclusion générale	51
Bibliographie	52

Liste des Tableaux

Tableau II. 1 : Études portant sur les techniques de séparation physique appliquées aux cartes électroniques.....	20
Tableau II. 2 : Classification des déchets de PCB (ADEME, 2008).....	21
Tableau III. 1 : Poids des éléments récupérés	32
Tableau III. 2 : Caractéristiques des échantillons.....	32
Tableau IV. 1 : Bandes d'absorption des solutions lixiviées	49
Tableau IV. 2 : Bandes d'absorption des solutions lixiviées	49

Liste des figures

Figure I. 1 : Photo illustrant les DEEE [12]	6
Figure I. 2 : Résumé analytique [14].....	11
Figure I. 3 : Statistiques de l'agence nationale des déchets [16].....	13
Figure II. 1 : Alternatives de recyclage des cartes électronique.....	23
Figure II. 2 : Les différentes étapes pour le traitement de déchets par hydrométallurgie.	25
Figure II. 3 : Comparaison entre l'hydrométallurgie et la pyrométallurgie pour le recyclage des DEEE.....	28
Figure III. 1 : Déchets récoltés (déchets d'ordinateur).....	31
Figure III. 2 : Démantèlement d'un déchet (une carte mère de pc et une carte mère de télévision)	31
Figure III. 3 : Echantillon 01 issu des circuits intégrés (CI)	33
Figure III. 4 : Echantillon 02 issu des transistors	33
Figure III. 5 : Echantillon 03 issu des cartes avec des connecteurs en plaque d'or	34
Figure III. 6 : Broyage des circuits intégrés(CI)	35
Figure III. 7 : Lixiviation avec l'acide nitrique	36
Figure III. 8 : Préparation de l'eau régale	37
Figure III. 9 : Libération des gaz sous une haute au laboratoire	39
Figure III. 10 : Diagramme du procédé d'extraction des métaux dans les déchets de circuits imprimés par voie hydrométallurgique	41
Figure III. 11 : Schéma d'un diffractomètre.....	42
Figure III. 12 : Un faisceau de rayons X.	43
Figure III. 13 : Schéma simplifié le principe de l'UV-Visible.....	44
Figure IV. 1 : Solutions obtenues après lixiviation.....	46
Figure IV. 2 : Spectre UV-visible de l'échantillon 01	47
Figure IV. 3 : Spectre UV-visible de l'échantillon 02	47
Figure IV. 4 : Spectre UV-visible de l'échantillon 03	48
Figure IV. 5 : Diffractogramme des précipités de l'attaque par l'eau régale.....	50

Liste des abréviations

DS : Déchets spéciaux

DSD : Déchets spéciaux dangereux

DI : Déchets inertes

DAS: Déchets d'activités de soins

CPU Unité : centrale (Central processing unit)

DEEE : Déchet d'équipement électrique et électronique

EC : Composant électronique

EEE : Equipement électrique et électronique

IC: Circuitintégré (Integreated circuit)

PCB:Polychlorobiphényle

PCB: Printed Circuit Board

DRX : Diffraction des rayons X

**INTRODUCTION
GENERALE**

Introduction générale

L'utilisation croissante d'équipements électriques et électroniques (EEE) dans notre vie quotidienne a entraîné une augmentation des déchets électroniques, ce qui a suscité des inquiétudes à plusieurs égards.

Premièrement, les procédés d'extraction et de transformation des matériaux nécessaires à la production d'équipements électriques et électroniques sont source de pollution environnementale.

Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) contiennent particulièrement de nombreux métaux, qu'il s'agisse de métaux communs (Cu, Fe, Al).

La production de la plupart de ces métaux nécessite des procédés de purification complexes, consommateurs de grandes quantités d'eau et d'énergie et entraînant des impacts environnementaux importants sur plusieurs indicateurs (gaz à effet de serre, eutrophisation, acidification des océans, etc).

De plus, les déchets électroniques se distinguent par leur toxicité, car ils sont l'un des polluants les plus importants et présentent le risque de détruire des écosystèmes entiers s'ils sont pollués et mal gérés, ce qui augmente les problèmes environnementaux des équipements électriques et électroniques.

Ces substances ont des effets néfastes sur la santé humaine, notamment pour les travailleurs exposés dans les centres de recyclage informels [5-7].

Ces pièces contiennent des matériaux qui sont néanmoins précieux soit en raison de leur rareté, soit de leur complexité.

Plusieurs des métaux contenus dans ces déchets électroniques sont considérés comme « critiques » dans l'Union européenne en raison de leur risque de rupture d'approvisionnement et de leur importance économique [8].

Le fait de ne pas recycler les déchets électriques et électroniques entraîne la perte des matériaux précieux qu'ils contiennent et augmente le besoin d'utiliser des matières premières.

Ainsi, l'épuisement des minerais stimule la recherche de techniques d'extraction et de séparation plus efficaces, tandis que les pressions économiques et environnementales

Introduction générale

nécessitent le développement de procédés moins coûteux, moins consommateurs d'énergie et plus respectueux de l'environnement.

C'est pourquoi les cartes électroniques, qui collectent la plupart des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) non ferreux, constituent une ressource importante.

Il est donc nécessaire d'élaborer des réglementations qui réglementent l'utilisation des équipements électriques et électroniques afin de minimiser les effets négatifs de ces déchets.

Les métaux qui composent nos e-déchets sont un véritable dépôt de métaux précieux en Algérie, rentable, mais étrangement pour le moment il n'y a aucun investissement dans la gestion efficace des e-déchets, comme les entreprises qui génèrent de tels déchets.

L'objectif de notre travail consiste à faire valoir le potentiel des métaux précieux existant dans des déchets d'équipements électriques et électroniques.

Outre l'introduction et la conclusion, notre mémoire est présenté, sous forme de quatre chapitres comme suit : Un premier chapitre qui met le point sur les déchets et leurs catégories ainsi que leurs procédés de traitement.

Nous avons exposé aussi les réglementations algériennes traitant les lois de la gestion des déchets d'équipements électroniques et électriques (DEEE) en Algérie.

Dans le deuxième chapitre, nous allons exposer les méthodes de recyclage des DEEE de la collecte à la séparation.

CHAPITRE I :
**GENERALITE SUR LES DECHETS
D'EQUIPEMENTS ELECTRONIQUES ET
ELECTRIQUES**

Chapitre I : Généralité sur les déchets d'équipements électroniques et électriques

Introduction

La plupart des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) contiennent des métaux et d'autres éléments de grande importance. Ils sont considérés comme source secondaire des métaux nobles et même des éléments de terres rares. Lorsque ces déchets ne sont pas traités de façon appropriée, ils peuvent avoir un impact négatif sur la santé et l'environnement.

Au cours de ce chapitre, nous allons donner, selon la bibliographie, des définitions des déchets en général et des déchets d'équipements électroniques et électriques (DEEE) en particulier. La gestion des DEEE en Algérie est aussi exposée.

I.1. Qu'est-ce qu'un déchet?

Étymologiquement, le mot «déchet» vient du verbe «jeter» dans le dictionnaire du XIV^e siècle, la forme normale du verbe «jeter» signifie réduire la valeur d'un matériau ou d'une chose au point qu'il devienne inutile de le laisser à un certain lieu et à une certaine heure [9].

Un déchet est un bien que son propriétaire destine à l'abandon. Étymologiquement, déchet vient de déchoir, du latin **cadere** (tomber). La racine «dis» traduit l'éloignement et la séparation ; c'est bien là l'esprit qui entoure tous les objets qui sont considérés comme des déchets. Dans le même champ lexical, nous retrouvons «détritus», «ordure», «résidu», termes également employés pour désigner ces objets ou restes que l'on ne veut plus. Depuis la nuit des temps, l'homme produit des déchets. Dans ses activités les plus lointaines et les plus simples, les déchets de l'homme se limitaient à des restes organiques dégradés dans la nature par des processus biologiques naturels. C'est en augmentant sa technicité et son équipement, ainsi que la concentration de population au même endroit, que les déchets deviennent visibles et envahissants. C'est leur concentration et le manque de prise en compte qui fait des déchets un problème pour les populations humaines. [10].

I.2. Définition du déchet au sens de la loi Algérienne

La loi N° 01-19 du 12 décembre 2001 parue au journal officiel de la république algérienne N° 77, définit le déchet comme « Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, et plus généralement toute substance ou produit et tout bien meuble 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. »

Du point de vue environnement, un déchet peut constituer une menace du moment où qu'il peut être en contact direct ou indirect avec cet environnement. Ce contact peut être direct par pose ou le résultat d'un traitement [11].

I.3. Classification des déchets selon la loi Algérienne

Conformément à l'article 5 du Règlement Algérien du 21 décembre 2001 et numéroté 01-19, les déchets sont répartis en 3 catégories:

- Déchets domestiques et assimilés
- Déchets dangereux
- Déchets spéciaux
- Déchets non dangereux

- **Déchets domestiques et déchets assimilés** : Tous les déchets ménagers, ainsi que les déchets assimilés issus de l'industrie, du commerce, de l'artisanat et d'autres activités, peuvent être considérés comme des déchets ménagers selon leurs caractéristiques.
- **Déchets dangereux** : Tous les déchets issus principalement de l'exploitation minière, de l'exploitation en carrière, de la démolition, de la construction ou de la réparation, qui ne sont pas traités physiquement, chimiquement ou biologiquement lors de l'élimination des déchets et qui ne sont pas contaminés par des substances dangereuses ou autres. Il est possible que cela soit nocif pour la santé ou l'environnement.
- **Déchets spéciaux** : Les déchets issus de l'industrie, de l'agriculture, de la médecine, du secteur des services et de toutes autres activités ne peuvent pas être collectés, transportés et traités dans les mêmes conditions que les déchets domestiques en raison de la nature et de la composition des matières qu'ils contiennent. et des déchets similaires aux déchets inertes.

- **Déchets non dangereux:** Tout type de déchet non dangereux, ses composants ou les propriétés des substances dangereuses qu'il contient peut nuire à la santé humaine et/ou à l'environnement.

I.4. Les déchets d'équipements électroniques et électriques (DEEE)

Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE, D3E) ou PEEFV — produits électriques et électroniques en fin de vie — sont une catégorie de déchets constituée des équipements en fin de vie, fonctionnant à l'électricité ou via des champs électromagnétiques, ainsi que les équipements de production, de transfert et de mesure de ces courants et champs (ce sont surtout des ordinateurs, imprimantes, téléphones portables, appareils photos numériques, réfrigérateurs, jeux électroniques, télévisions, etc.).



Figure I. 1 : Photo illustrant les DEEE [12]

I.4.1. Catégorisation des déchets d'équipements électroniques et électriques (DEEE)

Chapitre I : Généralité sur les déchets d'équipements électroniques et électriques

La catégorisation des Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE) en France et en Europe suit une nomenclature harmonisée afin de faciliter leur collecte, leur traitement et leur recyclage. Cette classification permet de distinguer les différents types de DEEE en fonction de leurs caractéristiques techniques et de leurs potentiels impacts environnementaux.

Les principales catégories de DEEE sont les suivantes :

1. Équipements ménagers:

- Gros appareils : réfrigérateurs, congélateurs, lave-linge, sèche-linge, cuisinières, fours.
- Petits appareils : aspirateurs, ventilateurs, grille-pain, cafetières, rasoirs électriques.
- Outils électriques : perceuses, scies, ponceuses.
- Outillage électroportatif : perceuses sans fil, visseuses.
- Jouets et équipements de loisirs : consoles de jeux, trains électriques, voitures télécommandées.
- Instruments de mesure et de contrôle : thermomètres, horloges.
- Appareils de traitement de l'information et de télécommunications : ordinateurs, téléphones portables, tablettes, imprimantes.
- Écrans : téléviseurs, écrans d'ordinateurs.
- Lampes : lampes à incandescence, lampes halogènes, lampes fluorescentes, lampes LED.

2. Équipements professionnels:

Outillage électroportatif et machines-outils : perceuses, scies, ponceuses, presses.

Matériel médical : appareils de radiologie, scanners, IRM.

- Instruments de mesure et de contrôle : instruments de mesure de précision, etc.
- Équipements de production industrielle : robots, machines-outils.
- Équipements de télécommunications : serveurs, routeurs.
- Écrans professionnels : écrans pour signalétique.

3. Froids et climatiseurs:

- Réfrigérateurs et congélateurs domestiques et professionnels.
- Climatiseurs domestiques et professionnels.
- Pompes à chaleur.

4. Lampe:

- Lampes à incandescence.
- Lampes halogènes.

- Lampes fluorescentes.
- Lampes LED.

5. Piles et accumulateurs:

- Piles boutons.
- Piles alcalines.
- Piles lithium-ion.
- Accumulateurs au plomb.
- Accumulateurs nickel-cadmium.
- Accumulateurs nickel-métal-hydrure.

6. Autres déchets DEEE:

- Panneaux photovoltaïques.
- Déchets d'amiante issus d'équipements électriques et électroniques.
- Câbles électriques.

Il est important de noter que cette catégorisation peut varier légèrement en fonction des réglementations locales.

En outre, certains DEEE peuvent faire l'objet de réglementations spécifiques, comme les lampes contenant du mercure ou les équipements contenant des substances dangereuses [13].

I.4.2. Les déchets d'équipements électroniques et électriques (DEEE) dans le monde

En 2019, on a officiellement enregistré 9,3 Mt de DEEE comme collectés et recyclés, ce qui représente 17,4% de la quantité totale de DEEE produits. Il s'agit d'1,8 Mt de plus qu'en 2014, soit une augmentation annuelle de près de 0,4 Mt. Cependant, la production totale de DEEE a augmenté de 9,2 Mt, ce qui représente une augmentation annuelle de près de 2 Mt. Les activités de recyclage évoluent donc à une vitesse inférieure à celle de la production mondiale de DEEE. En 2019, c'est l'Europe qui a enregistré le taux le plus élevé de collecte et de recyclage des déchets (42,5%), suivie de l'Asie (11,7%). Le taux de l'Amérique et de l'Océanie était équivalent (respectivement 9,4 % et 8,8 %). Le taux le plus faible était de 0,9 % en Afrique.

L'évolution de 82,6% (44,3 Mt) des DEEE produits en 2019 reste inconnue. Les réponses à la question de leur localisation et de leur influence sur l'environnement varient d'une région à l'autre.

Dans les pays à revenu élevé, il est généralement possible d'avoir une infrastructure de

Chapitre I : Généralité sur les déchets d'équipements électroniques et électriques

recyclage des déchets, et : Environ 8% des déchets électroménagers sont jetés à la poubelle, puis enfouis ou incinérés. Ce sont principalement les petits équipements et les petits équipements informatiques qui sont concernés. [13]

Selon les estimations, environ 7 à 20% des produits électriques et électroniques défectueux (DEEE) ou des équipements électriques et électroniques usagés traversent une frontière. Il est probable que la plupart des déchets ménagers et commerciaux non enregistrés se mélangent à d'autres flux de déchets, tels que les déchets plastiques et métalliques.

Le recyclage des parties facilement recyclables peut donc être effectué, mais souvent dans des conditions moins favorables, sans dépollution et sans récupération des matériaux précieux. Il ne vaut donc pas la peine de privilégier une telle méthode de recyclage. L'infrastructure de gestion des DEEE n'est pas encore parfaitement développée dans les pays à faible revenu et à revenu intermédiaire, voire, dans certains cas, n'existe pas du tout. Ainsi, la plupart des DEEE sont gérés par le secteur informel. Dans cette situation, ils sont fréquemment traités de manière inappropriée, ce qui a des répercussions sérieuses sur la santé des employés et des enfants qui, fréquemment, vivent, travaillent et jouent à proximité des sites de gestion des DEEE. [14]

Depuis 2014, il y a passé de 61 à 78 pays qui ont adopté une politique, une législation ou une réglementation nationale aux DEEE. Cependant, il y a peu de progrès réglementaires dans certaines régions, les textes sont peu mis en œuvre et les politiques, législations ou réglementations ne favorisent pas encore la collecte et la gestion efficace des DEEE en raison de manques d'investissements et de volonté politique. De plus, la définition des produits dans le droit est souvent différente de celle des systèmes de classement des DEEE proposés dans la méthode de statistiques sur les DEEE harmonisée à l'échelle internationale et couramment utilisée. En raison de ces disparités dans la définition des produits, les données statistiques sur les DEEE ne sont pas uniformes entre les différents pays

Différents additifs toxiques ou substances dangereuses sont présents dans les DEEE, tels que du mercure, des retardateurs de flamme bromés (RFB), des chlorofluorocarbures (CFC) ou des hydro chlorofluorocarbures (HCFC). Les risques pour l'environnement et la santé des personnes sont grands en raison de l'augmentation du volume de DEEE produits, des taux de collecte faibles et des méthodes d'élimination et de traitement écologiquement rationnelles. En tout, les déchets électroménagers non enregistrés à travers le monde contiennent chaque année 50 tonnes de mercure et 71 tonnes de plastiques RFB, qui sont en grande partie rejetés dans

Chapitre I : Généralité sur les déchets d'équipements électroniques et électriques

l'environnement et entraînent des conséquences néfastes sur la santé des travailleurs affectés. De plus, une mauvaise gestion des DEEE contribue au réchauffement climatique. Tous d'abord, s'il n'y a pas de recyclage des matériaux présents dans les DEEE, ils ne peuvent pas être utilisés en remplacement des matières premières, ce qui entraînerait une diminution des émissions de gaz à effet de serre liées à l'extraction et au tri des matières premières. Par la suite, les substances réfrigérantes présentes dans certains dispositifs d'échange thermique sont des polluants. En tout, 98 millions de tonnes d'équivalents de CO₂ ont été introduits dans l'atmosphère par des réfrigérateurs et des climatiseurs abandonnés et non traités de manière écologiquement responsable. D'après l'Agence internationale de l'énergie, il s'agit d'environ 0,3 % des émissions mondiales d'énergie enregistrées en 2019.

Les DEEE sont considérés comme une "mine urbaine" car ils renferment divers métaux précieux, qu'ils soient essentiels ou non essentiels, qui peuvent servir de matières secondaires à condition d'être recyclés. En 2019, la valeur des matières premières utilisées dans la production mondiale de DEEE s'élevait à environ 57 milliards USD. Elle est principalement causée par le fer, le cuivre et l'or. Actuellement, le taux de déchets enregistrés comme collectés et recyclés est de 17,4%. Des matières premières d'un montant équivalent à 10 milliards USD sont récupérées de manière écologique rationnelle à partir des déchets électroménagers produits à travers le monde, et 4 Mt de matières premières pourraient être recyclées. Grâce au recyclage des matières primaires secondaires, le recyclage du fer, de l'aluminium et du cuivre a entraîné une économie nette de 15 Mt d'équivalents CO₂.

En utilisant des matières primaires secondaires à la place de matériaux vierges, on peut recycler ces matières. En bref, il est primordial d'augmenter de manière significative le taux des déchets électroménagers produits à l'échelle mondiale qui sont officiellement enregistrés comme étant collectés et recyclés (17,4% actuellement), surtout compte tenu de l'augmentation rapide de ce flux de déchets, qui devrait atteindre 74,7 millions de tonnes d'ici 2030. Il est aussi primordial de collecter plus de matériaux pour les utiliser en circuit fermé et de réduire l'utilisation de matériaux vierges. [14]

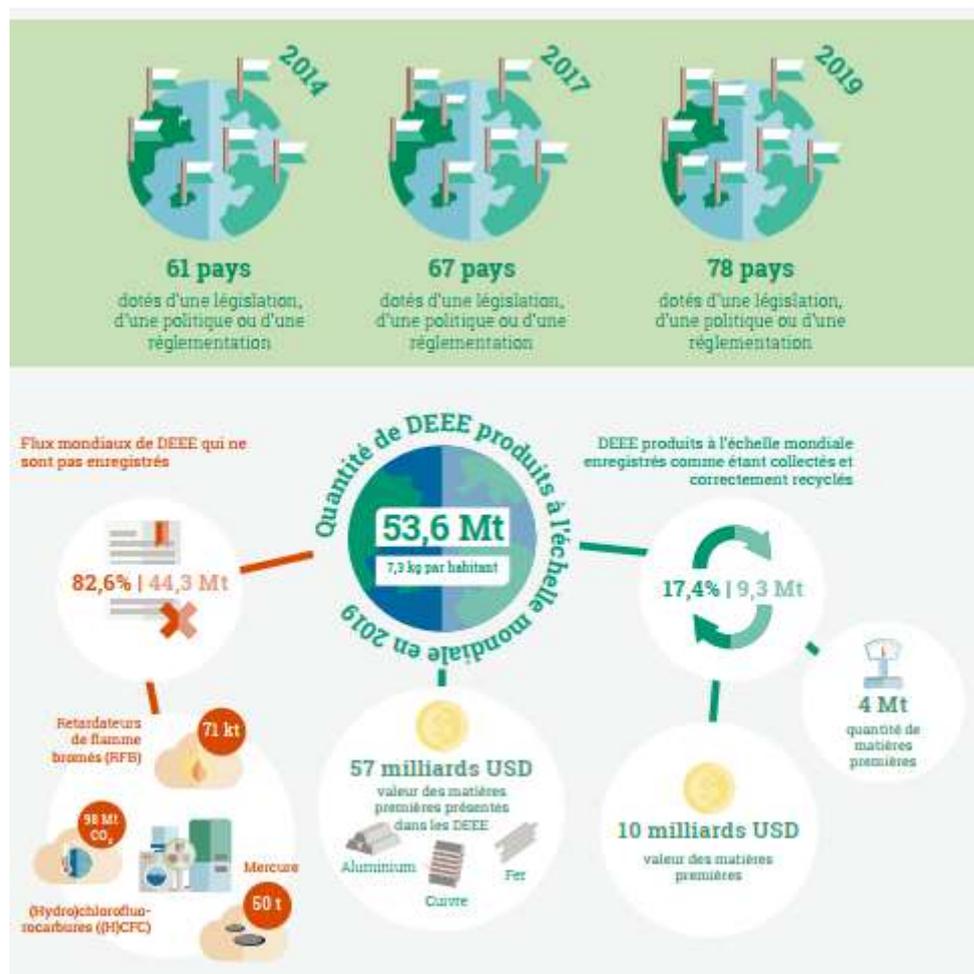


Figure I. 2 : Résumé analytique [14]

I.4.3. Gestion des déchets d'équipements électroniques et électriques (DEEE) en Algérie. Lois et procédure

En Algérie, la gestion des DEEE est régie par la loi n°0411 du 11 juin 2004 concernant la gestion et la valorisation des déchets.

La loi établit les principes de base pour la gestion des déchets électroniques et électroniques, imposant aux fabricants et importateurs d'équipements électriques et électroniques l'obligation de mettre en place des réseaux de collecte et de traitement de leurs déchets.

Les obligations des acteurs

- Les fabricants et les importateurs ont la responsabilité de collecter et de traiter leurs DEEE .Ils ont la possibilité d'envoyer ce message eux-mêmes à un organisme environnemental agréé par le ministère de l'Environnement.
- Les consommateurs doivent déposer leurs déchets électroménagers dans un point de collecte

Chapitre I : Généralité sur les déchets d'équipements électroniques et électriques

(déchetteries, magasins d'électroménager, etc.).

- Communautés locales: Elles ont la responsabilité de définir les règles concernant la collecte des DEEE sur leur territoire.
- La classification des types de matériaux et d'équipements est réalisée par le DEEE afin de simplifier leur utilisation.
- Le démontage consiste à séparer les matériaux en composants distincts.
- Collecte : Les déchets électroménagers peuvent être stockés dans des points de collecte désignés ou être collectés à domicile [15]

En Algérie, différentes ONG ont le droit de collecter les déchets écologiques et électroniques (DEEE) pour le compte des producteurs et des importateurs.

En 2019, on observe une exportation de 67 696,65 tonnes d'huiles usées et de déchets d'équipements électroniques et électriques dans quatre pays (Grèce, Inde, Turquie et France).

Les huiles usagées constituent le principal flux, représentant 67 666,66 tonnes (99,95%).

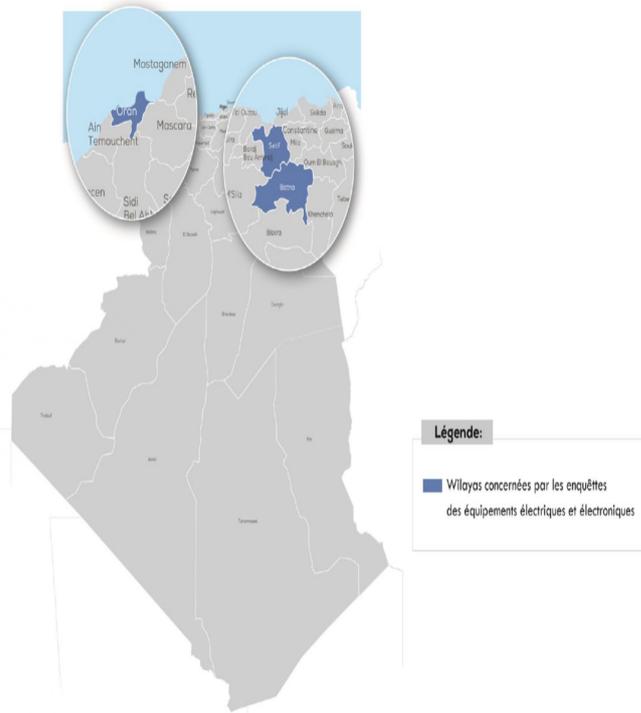
Le gouvernement doit établir la politique nationale en matière de gestion des DEEE et surveiller la mise en œuvre des réglementations en vigueur. [16]

Chapitre I : Généralité sur les déchets d'équipements électroniques et électriques

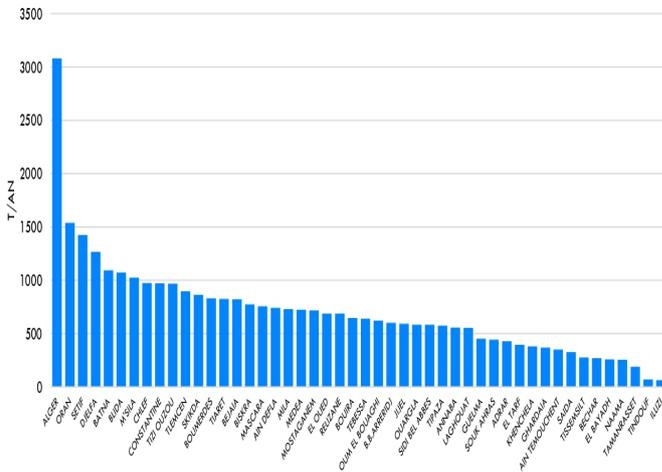
Fiche signalétique : Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (D3E)



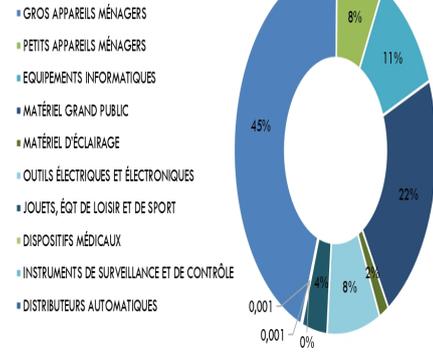
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Environnement et des Energies Renouvelables



Répartition spatiale de la quantité des D3E sur le territoire national (Exercice 2018)



Répartition de la quantité des Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (D3E) par catégorie



Ratio par catégorie de D3E

Catégorie de D3E	Ratio (Equipement/Hab/An)
01 Gros Appareils Ménagers	0,0388
02 Petits Appareils Ménagers	0,0725
03 Equipements Informatiques et de Télécommunications	0,0954
04 Matériel Grand Public	0,0936
05 Matériel d'Éclairage	0,3935
06 Outils Électriques et Électroniques	0,0147
07 Jouets, Équipements de Loisir et de Sport	0,0030
08 Dispositifs Médicaux	0,0113
09 Instruments de Surveillance et de Contrôle	0,0036
10 Distributeurs Automatiques	-

Evolution quantitative des Déchets d'Equipements Électrique et Electroniques (D3E) à l'échelle nationale

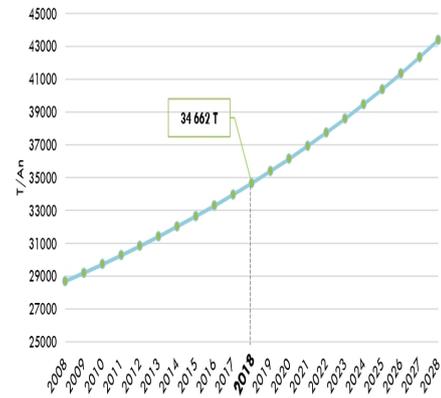


Figure I. 3 : Statistiques de l'agence nationale des déchets [16]

Conclusion

En résumé, il est essentiel de garantir une gestion durable des DEEE afin d'assurer un avenir sain et prospère. En participant activement à des initiatives collectives et multidimensionnelles, nous avons la possibilité de transformer ce défi en une occasion de construire un monde plus durable et plus respectueux de l'environnement pour les générations présentes et futures.

CHAPITRE II :
**RECYCLAGE DES DECHETS
D'EQUIPEMENTS ELECTRONIQUES ET
ELECTRIQUES (DEEE)**

Chapitre II: Recyclage des déchets d'équipements électroniques et électriques (DEEE)

II.1. Généralités

Notre société moderne génère une quantité croissante de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), communément appelés e-waste. Cette catégorie regroupe une large gamme d'appareils en fin de vie, tels que les ordinateurs, les téléphones portables, les téléviseurs, les réfrigérateurs, les climatiseurs, les jouets électroniques, etc.

La production mondiale de DEEE a connu une croissance exponentielle ces dernières années, atteignant 53,2 millions de tonnes métriques en 2019 et devrait atteindre 74,7 millions de tonnes métriques d'ici 2030. Cette augmentation s'explique par plusieurs facteurs, notamment l'obsolescence rapide des produits électroniques, l'augmentation des taux de pénétration des technologies numériques et l'absence de pratiques de gestion adéquates.

Si ces déchets ne sont pas gérés de manière responsable, ils peuvent avoir des impacts environnementaux et sanitaires dévastateurs. Les DEEE contiennent souvent des substances dangereuses telles que le plomb, le mercure, le cadmium, les retardateurs de flamme bromés et les phtalates. Lorsque ces substances toxiques s'infiltrent dans le sol et les eaux souterraines, elles peuvent contaminer l'environnement et menacer la santé des populations locales.

Face à cette situation alarmante, le recyclage des DEEE s'impose comme une solution indispensable pour réduire leur impact négatif et valoriser les ressources précieuses qu'ils contiennent.

II.2. La collecte

Afin de garantir une collecte efficace des déchets électriques et électroniques, diverses autres mesures peuvent être mises en œuvre :

- **Collecte en magasin** : Les distributeurs électriques et électroniques se chargent de restituer gratuitement aux consommateurs les anciennes applications, si elles sont de même type et fonction. Ce système favorise la disponibilité et prend en charge le retour des DEEE lors de l'achat de nouveaux équipements [17].
- **Déchetteries désignées** : Les déchetteries communales et les déchetteries privées permettent d'éliminer les DEEE. Cette solution constitue une alternative bon marché aux appareils anciens ou qui ne peuvent pas être retournés en magasin. [18].
- Ces stratégies ciblées permettent de toucher des publics éloignés des rassemblements réguliers et des rassemblements de citoyens. [19]

- **Service de livraison à domicile** : Certains groupes communautaires proposent des services de collecte à domicile des gros objets ménagers. Cette solution personnalisée est particulièrement utile pour les personnes âgées ou à mobilité réduite [20].

La publicité et la publicité sont importantes pour sensibiliser les gens à l'importance de l'organisation et des différentes options de collecte.

- **Publicité** : Publicité claire et éducation sur les enjeux environnementaux liés aux déchets électriques et électroniques et sur les mesures à prendre pour les services de collecte.
- **Informations disponibles** : Fournissant des informations faciles d'accès dans une collection, le service est disponible dans un format pratique.
- **Implication des organisations locales** : Coopération avec les autorités locales, les organisations et les entreprises dans l'organisation de sensibilisation et d'événements promouvant la collecte d'électricité et d'électronique gratuite.

En encourageant l'adoption de pratiques environnementales et en mettant en place un plan de collecte efficace, nous pouvons relever le grand défi de la gestion des déchets d'équipements électriques et électroniques et contribuer à la protection de notre environnement.

II.3. Démâtage (démontage)

Pour simplifier la gestion du flux DEEE, étapes différentes peuvent être prises pour séparer les EC des cartes électroniques. Ce processus peut être utilisé pour récupérer ou utiliser EC. Les performances du système de destruction dépendent de deux facteurs principaux : le pourcentage d'EC que le système peut récupérer des circuits imprimés (PCB) et l'état de l'EC après séparation. L'une des méthodes les plus simples et les plus courantes pour cette classification est la destruction mécanique, manuelle ou automatique. D'autres méthodes impliquent la dissolution ou la dissolution chimique du matériau commercial pour libérer la CE.

Un article [21] publié par le groupe en 2021 a identifié différentes méthodes de démontage/démontage des PCB. Voici une brève description des différentes méthodes qui y sont décrites.

- **Démantèlement mécanique**

La destruction mécanique des PCB se produit généralement de deux manières. Ancien manuel de transmission, généralement utilisé dans la section sur l'équipement. Cette solution est longue et fastidieuse, elle se concentre donc sur les composants haut de gamme du EC tels que les batteries, les boîtiers en cuivre, les condensateurs et les unités centrales de traitement (CPU) [22].

La deuxième méthode, plus spécifique, supprime l'EC à l'aide d'une lame sur la carte électronique. Cependant, ces méthodes sont faciles à utiliser et rapides, nécessitant des travailleurs solides, il est donc difficile de les créer et de les appliquer à grande échelle

- **Démantèlement thermique**

La destruction thermique de PCB peut être obtenue par traitement thermique selon méthodes différentes. Mais les principes de ces méthodes font toujours fondre le panneau EC séparé par soudure de traitement thermique. La première méthode de était plus sophistiquée et impliquait de chauffer avec des outils simples tels que des lampes à gaz, des phalanges ou des outils commerciaux rudimentaires [23]. Ces méthodes peuvent nuire, à travailleurs et à l'environnement en raison du manque de contrôle de la température et d'élimination des substances toxiques. Des méthodes plus avancées ont été utilisées dans de nombreuses industries utilisant des radiateurs infrarouges contrôlés pour chauffer les joints de soudure jusqu'au point de fusion. Les CE peuvent être séparées des feuilles vierges à l'aide de dispositifs robotiques, de brosses ou de la gravité [24]. Cependant, l'IR ne peut pas stocker uniquement la soudure, qui peut chauffer l'EC à différentes températures, ce qui rend difficile la récupération du . Le chauffage de l'air est un autre processus qui consiste à faire passer de l'air chaud autour du PCB pour dissoudre le matériau commercial et couper l'EC [25]. Bien que ce offre des coûts d'investissement inférieurs et des avantages de destruction plus élevés, la gestion de la chaleur est mauvaise et peut endommager l'EC. La méthode de chauffage par bain implique un contact direct avec de la soudure fondue pour faire fondre et solidifier la soudure sur les PCB, mais cette méthode est difficile à mettre en œuvre [26]. De plus, les travailleurs sont exposés au bain de métal toxique, ce qui rend le processus dangereux. Au lieu d'un bain de décomposition, de l'eau chaude peut également être utilisée pour dissoudre les PCB [27], [28]. Cela fournit une dispersion à haute efficacité et produit des déchets liquides qui nécessitent un traitement supplémentaire. Enfin, la centrifugation thermique est un nouveau processus dans lequel le PCB est chauffé et centrifugé pour récupérer à la fois le liquide de soudure et l'EC séparé de la carte

[29], [30]. Cette méthode peut augmenter la récupération de la production de soudure sans nécessiter beaucoup de chaleur. Le traitement thermique du est facile à utiliser en grande quantité et permet la destruction du en haute production. Malgré ces avantages, ces méthodes ne contrôlent pas bien la température appliquée et peuvent endommager le CE. De plus, ils polluent beaucoup car ils consomment beaucoup d'énergie pour atteindre la température nécessaire au ramollissement de la salive. De plus, ces procédés produisent des gaz et des déchets toxiques, alors même que de nouveaux procédés font leur apparition pour traiter les produits résultants et l'eau contaminée.

- **Décomposition chimique**

Pour résoudre le problème des procédés thermiques, des procédés chimiques ont été développés pour décomposer les PCB soudables, voire les métaux non soudables, et réduire l'EC. La dissolution de la soudure a été étudiée avec des solutions acides ou à base d'ammoniaque [31], [32]. L'utilisation de solutions acides, notamment H₂SO₄, s'est avérée économiquement réalisable. Une formulation améliorée contenant du H₂SO₄, du CuSO₄ et du NaCl a été proposée pour détruire les PCB en éliminant tous les métaux étrangers. Ces méthodes peuvent également être combinées avec des méthodes électrochimiques pour éliminer le cuivre dissous. Les fluides hydrothermaux et les fluides supercritiques ont été analysés pour la formation de PCB [33]. La recherche montre qu'en modifiant le processus, il est possible de trouver l'un des époxydes, des métaux à base de métaux ou métaux précieux dans l'eau. Ces méthodes restent cependant encore difficiles à transférer dans de nombreux établissements industriels. Une nouvelle méthode est le traitement époxy des PCB avec des solvants tels que le diméthylsulfoxyde (DMSO) ou l'acide acétique sous-critique [34]. Ce processus peut dissoudre l'époxy sur la carte et ainsi restaurer EC intact. Cependant, ces méthodes peuvent poser des problèmes d'évacuation de l'eau et de consommation d'énergie, tandis que le recyclage de l'eau reste difficile dans certains cas. Le procédé chimique est particulièrement utile en termes de dispersion des soudures et de respect de l'environnement, mais reste un défi en termes de coût et de dégradation du produit avant sa mise en œuvre industrielle.

II.4. Broyage

Désigne le processus de fractionnement, de concassage et de broyage dans le traitement des minéraux utilisés comme matières premières primaires. L'objectif est d'atteindre les propriétés souhaitées, c'est-à-dire que chaque élément est constitué d'un seul type. Dans le cadre des circuits imprimés, cela consiste à récupérer des rouleaux imprimés issus de DEEE, puis à les broyer et à les broyer pour former différentes pièces. Les outils les plus couramment utilisés pour le cassage (correspondant à la réduction de dimensions supérieures à 1 cm environ) et le meulage (inférieure à 1 cm environ) des rouleaux imprimés sont les couteaux rotatifs, les grattoirs et les broyeurs rotatifs en acier inoxydable. Ces matériaux reposent principalement sur des matériaux de découpe plus efficaces que l'écrasement ou l'impact [61]. La taille des particules à obtenir dépend de la méthode de sol : dans les procédés industriels utilisant le procédé pyrométallurgique, le diamètre moyen recherché est typiquement de 1 ou 2 cm [62]. En revanche, le traitement chimique atteint à lui seul 100 à 300 μm pour récupérer 97 % du cuivre [63]. Pour les procédés hydro métallurgiques, études ont été menées sur la gamme de tailles d'échantillons de 40 μm à 6 cm [64]. Il est nécessaire de trouver la bonne taille qui nous aidera à ne pas consommer trop d'énergie et en même temps à améliorer la façon dont les choses sont utilisées. Le broyage présente certains inconvénients : il provoque une perte de matière allant jusqu'à 25 % et de certaines substances volatiles en raison de la chaleur apportée [65]. De plus, elle est difficile à réaliser et nécessite souvent le retrait de pièces impossibles à meuler [66].

II.5. Différenciation

Pour fabriquer des produits facilement transformables et réduire les coûts d'opérations moindres, la différenciation doit être réduite au matériau dit « stérile ». Cette méthode de transformation est basée sur diverses propriétés physiques. Différentes méthodes peuvent être utilisées : séparation granulométrique (séparation des particules en fonction de leur taille), séparation densimétrique (basée sur la densité), séparation magnétique, flottation (séparation basée sur l'hydrophobie de chaque composant), tri (utilisation de caméras optiques pour mesurer couleur, etc). selon). Dans le domaine des cartes électroniques, la séparation se concentrera sur la séparation des

Chapitre II : Recyclage des déchets d'équipements électroniques et électriques (DEEE)

métaux ferreux, des métaux non ferreux et des métaux non ferreux. L'avantage de la séparation est de réduire les éventuels impacts environnementaux lors de l'intégration d'un composant non métallique. De nouvelles méthodes ont été développées pour évaluer ce rapport, principalement en séparant les plastiques pour les utiliser dans d'autres applications ou en les utilisant pour renforcer le béton [67]. Pièces récupérées, dont des métaux, seront traitées en métallurgie.

II.6. Séparation

. Les méthodes de tri physique ont été largement étudiées et le (Tableau II.1) présente quelques études.

Tableau II. 1 : Études portant sur les techniques de séparation physique appliquées aux cartes électroniques.

Type de séparation	Commentaires	Études
Granulométrie	Majorité de métaux précieux dans les particules fines (<75 µm)	[68]
Densimétrie	Méthode simple et peu consommatrice d'énergie mais puretés peu élevées et pertes	[69]
Magnétique	Retrait des métaux ferreux (83% du fer à 700 Gauss par exemple)	[70]
Courants de Foucault	Technologie mature, séparation de 90% d'Al mais implique une perte des précieux	[71]
Electrostatique	Séparation des métaux des autres matériaux	[72]

II.7. Nature et composition

Les DEEE constituent une composition de déchets très diversifiée et complexe. La composition du drapeau ne peut donc pas être déterminée. Ils sont généralement constitués de métaux ferreux et non ferreux (10 à 85 % en poids), de matériaux inertes comme le verre (sauf pour les tubes cathodiques), de bois, de matériaux (0 à 20 %) ou de plastique, voire de certains composants. . pouvant être dangereux pour la santé et l'environnement (piles et accumulateurs, transmission ou interrupteurs au mercure, etc.). En bref, les déchets peuvent être définis comme un mélange de métaux tels que le cuivre, l'aluminium et le fer qui est enduit, recouvert ou mélangé à divers types de plastique ou d'argile. Enfin, certaines particules, comme la carte électronique, contiennent des métaux

Chapitre II : Recyclage des déchets d'équipements électroniques et électriques (DEEE)

précieux, qui sont souvent rejetés dans l'air. Vous serez particulièrement intéressé par cette classe de déchets contenant de grandes quantités de métaux précieux. En fait, cette onde électronique est l'un des matériaux les plus recyclables car elle contient à la fois des métaux précieux (Pt, Pd, Rh, Au, Ag) et des métaux dont la sortie peut être dangereuse, tels que les métaux lourds présents dans l'environnement (Pb, Cd...). Les progrès des ordinateurs, de l'automatisation et du secteur audio en général permettent de recycler cette énorme quantité de déchets. Actuellement, seuls 10 % des déchets électroniques sont recyclés en Europe [1], car le coût du recyclage est souvent supérieur à la valeur de leur élimination.

La teneur en métaux non métalliques et en métaux précieux a diminué au fil du temps. Il y a trente ans, la part des métaux était d'environ 80 %, alors qu'aujourd'hui elle n'est plus que de 40 %, dont la part du cuivre (20 %), du fer (8 %), du nickel (2 %) et de l'étain (4 %), et du plomb (2%), aluminium (2%), zinc (1%). Les métaux précieux sont ajoutés en petites quantités : 0,1-0,2 % d'or, 0,2 % d'argent, 0,005 % de palladium, 0,001 % de platine, 0,00002 % de rhodium. Bien qu'ils soient rarement jetés, les métaux précieux servent toujours d'excuse pour recycler les ondes électroniques, car ils représentent la plus grande valeur économique.

La connaissance des principaux composants des déchets électroniques constitue la donnée de base pour établir les conditions physico-chimiques du recyclage. Les composants importants trouvés dans les lingots comprennent les connecteurs, les disques durs, les circuits intégrés, les transistors, les relais et les circuits de puissance et commutateurs à inductance résistive. L'or et le palladium peuvent être stockés dans une feuille de cuivre ou un stratifié, et l'or peut être utilisé pour fabriquer un bon fil de connexion, l'argent et l'or dans du nickel ou du métal, l'argent et le palladium sous forme multicouche, etc. Les métaux précieux sont également utilisés dans des créations en bois uniques. [60]

Tableau II. 2 : Classification des déchets de PCB (ADEME, 2008)

	Cartes pauvres	Cartes intermédiaires	Cartes riches
OR	1 à 50 g/t	150 g/t	>150 g/t
ARGENT	150 à 250 g/t	250 à 500 g/t	>500 g/t
CUIVRE	15%	15 à 20%	>20%

II.8. Technologie de recyclage des PCB

Le recyclage est la dernière option pour évaluer le produit en fin de vie, il s'agit de tout retirer et de tout recycler pour retrouver son état, ce qui rend le recyclage difficile et coûteux. Solution par rapport à la reconfiguration et à la réinitialisation d'autres options. La composition chimique des cartes électroniques est complexe et variable, qui rend le traitement métallique des cartes électroniques solide et doux. La technologie actuelle n'est pas optimisée pour éliminer ces problèmes. Ils provoquent généralement une récupération imparfaite des métaux et créent des effets environnementaux nocifs en raison de la présence de plastiques, de fibres de verre, d'aluminium, d'halogènes, de résines et d'autres métaux sensibles aux dommages lors de la réaction des métaux[73] ont décrit différentes options pour les moyens possibles de recycler les PCB, comme indiqué dans la (figure II.1). Montré sur la fig. Les PCB sont généralement dans leur emballage d'origine. Ils passent au premier niveau pour dissoudre et récupérer les PCB, et dans un deuxième temps, ils effectuent le traitement qui est appliqué à ces comprimés pour récupérer les métaux dans leur état. Il est important de se référer aux trois méthodes de traitement :

1. Traitement physique : Tout d'abord, la partie de la carte sera retirée pour être colorée, puis elle sera battue, et enfin, la partie sera nettoyée pour utiliser le métal. .

2. Traitement chimique des métaux : deux technologies possibles pour assurer la liaison des métaux. Soit la pyrométallurgie avec traitement thermique, soit l'hydrométallurgie avec traitement chimique.

3. Traitement électrochimique : Selon plusieurs facteurs (la technique choisie pour le traitement métallurgique, la qualité de la matière à traiter, le métal visé à récupérer) plusieurs procédés peuvent être appliqués pour assurer la purification et la récupération sélective des métaux précieux

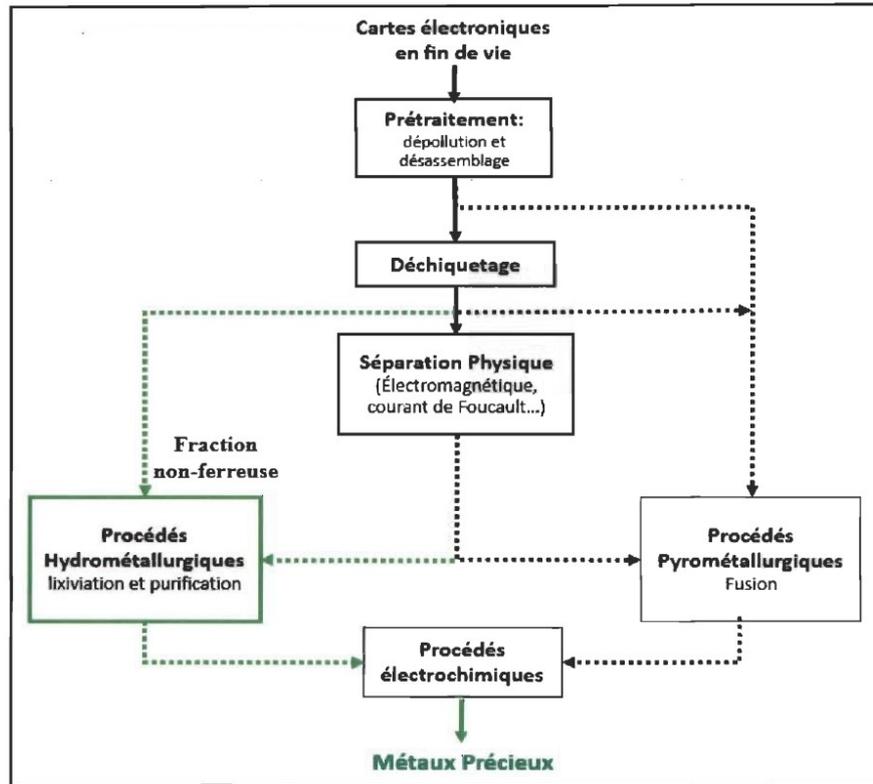


Figure II. 1 : Alternatives de recyclage des cartes électronique

II.8.1. Recyclage des métaux précieux par un processus de Pyrométallurgie

La pyrométallurgie est une technique couramment utilisée pour récupérer les métaux. Il s'agit d'un processus qui repose généralement sur un traitement thermique pour créer une réaction chimique permettant d'éliminer les matériaux indésirables tels que le plastique. Les principaux procédés de la pyrométallurgie sont les procédés de combustion (feu), de pyrolyse, de fusion par plasma, de réduction et de réaction à haute température [74].

II.8.2. Recyclage des métaux par un processus de l'Incinération

Le processus d'incinération consiste à chauffer des appareils électroniques déchetés à des températures élevées (environ 1 100 °C) dans un four. Les impuretés peuvent être éliminées de deux manières : soit par des réactions chimiques ou thermiques, soit par des scories de la surface du métal, soit par décantation des boues. Cependant, l'énergie et le gaz dus à la présence de résines, de plastiques et de PCB limitent la proportion de panneaux traités au feu à 10 % à la fois. Au-delà de cette limite, le système devient instable [73].

II.8.3. Recyclage des métaux précieux par un processus de Pyrolyse

La pyrolyse est un autre concept qui permet la création d'un bon produit de fer qui améliore le traitement et les fonderies de cuivre. Cette technologie est basée sur l'élimination du plastique et de la résine par vaporisation et traitement thermique. La pyrolyse est un processus qui augmente les performances des noyaux de cuivre. Ce procédé est utilisé uniquement par Boliden de Suède, qui mène des recherches, produit et traite le noyau et les métaux précieux à 300°C. Le but de ce traitement est de séparer la partie métallique de la partie organique et d'éliminer les substances toxiques. Effet du caoutchouc endommagé par le brome [73].

La première application pyrométallurgique du circuit imprimé était sur une base de cuivre, étant donné la teneur élevée de ces éléments dans le circuit imprimé. La solution technologique du noyau de cuivre se compose de deux processus : la fusion et l'électro raffinage. Les métaux rares sont souvent perdus dans leur ensemble, leur récupération n'est donc pas évidente.

II.8.4. Recyclage des métaux précieux par un processus de l'Hydrométallurgique

L'hydrométallurgie s'est fortement développée depuis le début du siècle et a souvent pris le pas sur des procédés pyrométallurgiques pour la production de nombreux métaux (Zn, Ni, Cu). L'hydrométallurgie consiste en une succession d'opérations chimiques et électrochimiques

caractérisées par la mise en solution d'un métal et son élaboration à partir de cette solution. Tout d'abord utilisée pour le traitement de minerais, elle est employée depuis une quinzaine d'années dans le traitement de déchets métalliques. Nous verrons tour à tour, les diverses étapes d'un traitement hydrométallurgique et les spécificités liées à la récupération de métaux précieux.

Quel que soit le métal (précieux ou non précieux) que l'on souhaite récupérer, l'hydrométallurgie nécessite une succession d'opérations chimiques. Elle comprend principalement les étapes décrites sur la (Figure II.2)

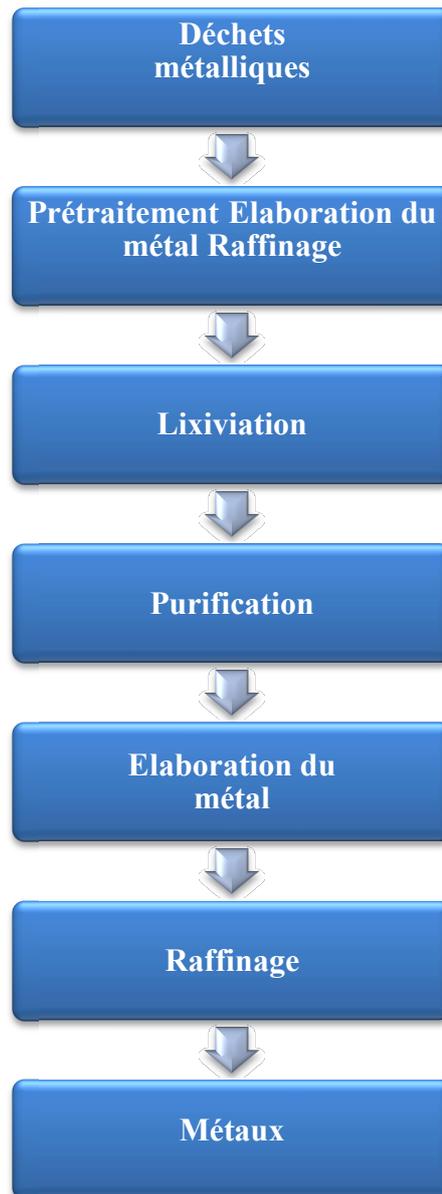


Figure II. 2 : Les différentes étapes pour le traitement de déchets par hydrométallurgie.

A ces opérations doivent s'ajouter l'élaboration du métal et le raffinage. Bien souvent, un raffinage est nécessaire afin de conditionner le métal sous une forme commercialisable (lingots...).

a. Prétraitement

Le prétraitement permet de retirer un certain nombre de métaux ou de matériaux susceptibles de ralentir ou de modifier les étapes de lixiviation et d'élaboration du métal à extraire. Divers types de traitement peuvent être effectués :

- Une séparation physique, durant laquelle le métal reste sous une forme chimique inchangée. Elle peut être réalisée par différentes méthodes telles que la densimétrie, la flottation ou la séparation magnétique
- Un grillage du solide afin d'obtenir des oxydes plus solubles, un lavage à l'eau permet d'éliminer les sels solubles dans la solution de lixiviation

b. Lixiviation

La différence majeure pour la récupération des métaux précieux résidera dans la nature de la solution lixiviante. La lixiviation consiste à mettre en solution, sous forme ionique, le ou les métaux recherchés. Le but est de déterminer le type de lixiviant optimal en termes de consommation et de coût de réactifs de solubilisation minimale d'impuretés, d'entretien du matériel et du coût de traitement des rejets. En fonction du métal à extraire et du solide à traiter (impuretés présentes), différentes solutions de lixiviation peuvent être employées. La plus courante pour les métaux précieux est la lixiviation cyanurée. Il a été trouvé que le taux de corrosion suivait l'ordre $Au > Ag > Pd > Pt$ [35]. Bien que les platinoïdes puissent passer en solution, le procédé vise avant tout l'extraction d'or. La lixiviation chlorurante [36] montre également un intérêt vis-à-vis de l'or, du platine et du palladium. D'autres systèmes ont été considérés tels que les procédés au thiosulfate ammoniacal [37], à la thiourée [38] ou à l'eau régale (mélange d'acide nitrique et d'acide chlorhydrique) [39]. Ces dernières ont montré des limitations.

Enfin, soulignons que, suite à la mise en solution des métaux, une séparation solide/liquide est indispensable pour séparer le résidu inerte de la solution de lixiviation. Trois techniques sont principalement mises en œuvre : la décantation, la filtration ou la centrifugation.

c. La purification

En raison de la rareté de la lixiviation totalement sélective, il est possible que la solution renferme des impuretés qui peuvent perturber la production du métal souhaité ou compromettre sa pureté. Il est donc essentiel d'extraire ces éléments potentiellement perturbateurs. Il s'agit de déplacer les impuretés de la solution vers une autre étape. Différentes méthodes ont été utilisées pour purifier les bains : cémentation électrochimique, adsorption sur des résines échangeuses d'ions, cristallisation (passage de la phase soluble à une phase solide) ou séparation électrolytique (réduction des ions métalliques) sont également des méthodes couramment utilisées pour purifier les bains. En général, on extrait les métaux

précieux de la solution en utilisant la méthode de cémentation [40] ou en adsorbant sur des résines échangeuses d'ions [41, 42].

Parfois, l'étape de purification coïncide avec l'étape d'élaboration du métal comme dans le cas de la cémentation de l'or par le zinc.

d. Elaboration du métal

Cette étape consiste à réduire les ions métalliques en solution jusqu'au métal. Différentes techniques sont employées telles que la cémentation, la précipitation ou en encore l'électrodéposition [43].

La technique employée sera conditionnée par des aspects économiques mais également par l'état final du composé métallique. L'électrodéposition sera préférée pour un métal massif, tandis que la précipitation sera mise en œuvre pour l'obtention d'un sel métallique.

Le processus de cémentation (utilisation de zinc principalement) a été utilisé dès 1890, pour récupérer l'or des solutions de cyanure.

Le procédé actuel mondial est le processus « Merrill-Crowe » [40], la réaction est rapide et complète. Cependant, le ciment contient du cuivre et des métaux nobles autres que l'or. En règle générale, une étape de fusion succède à la cémentation sur zinc, qui elle-même est précédée d'un lavage à l'acide pour extraire le zinc.

II.4.2. Comparaison entre la pyrométallurgie hydrométallurgie

Critères de comparaison	Sous-critère de comparaison	Les technologies de recyclage	
		Hydrométallurgie	Pyrométallurgie
Facteur économique	Coût d'investissement	Faible	Élevé
	Coût d'exploitation	Moyen	Moyen
	Consommation d'Énergie	Faible	Élevé
	Consommation de réactifs chimique	Élevé	Faible
Traitement des PCB	En Faible teneur d'or	Possible	Difficile
	En petit quantités	Possible	Difficile
	Taux de récupération	Moyen à Élevé	Moyen
Stabilité technique	Complexité	Élevé	Faible à Moyen
	Contrôle et flexibilité	Élevé	Faible

Impact Environnementaux	Déchets solide ultime	Faible	Moyen
	Déchets gazeux	Négligeable	Élevé
	Déchets liquide	Moyen	Négligeable

Figure II. 3 : Comparaison entre l'hydrométallurgie et la pyrométallurgie pour le recyclage des DEEE [66]

Chapitre II : Recyclage des déchets d'équipements électroniques et électriques (DEEE)

L'hydrométallurgie est une méthode efficace pour le recyclage des DEEE et la récupération de métaux précieux. Le choix de la méthode la plus appropriée dépend de plusieurs facteurs spécifiques à chaque cas. Des recherches et des évaluations approfondies sont nécessaires pour sélectionner la méthode optimale qui maximise la récupération des métaux précieux, minimise l'impact environnemental et assure une rentabilité économique.

CHAPITRE III :
MATERIAUX, PROTOCOLE
EXPERIMENTAL ET METHODES
D'ANALYSE

Chapitre III : Matériaux, protocole expérimental et méthode d'analyse

Ce chapitre a pour objectif de présenter les échantillons employés dans le cadre de cette étude ainsi que leurs provenances et de décrire les techniques expérimentales utilisées afin de caractériser les solutions préparées lors de la lixiviation.

III.1. Echantillonnage des cartes électronique

Notre choix d'échantillon est porté sur les cartes électroniques ou encore appelé PCB (Printed Circuit Board) qui est une plaque constituée d'un support pour un ensemble de composants électroniques afin de les connecter entre eux à l'aide d'un circuit imprimé. La structure de cette plaque est composée de plusieurs couches de cuivre séparées par un matériau isolant (généralement de la résine époxy). Une couche de vernis est appliquée sur le circuit imprimé afin de prévenir l'oxydation et les court-circuits potentiels.

Ce choix est justifié par:

- La présence d'une large gamme de métaux à savoir : L'aluminium (batteries), fer et cuivre (dans les transformateurs), acier inoxydable (dans les connecteurs), palladium et tantale (dans les condensateurs), or (dans les processeurs milieu de gamme), le nickel (dans les résistances) et l'argent le rendent économiquement attractif pour le recyclage des déchets électroniques.
- D'autres éléments se trouvent dans les cartes électroniques mais en petites quantités, comme les métaux des terres rares que sont le néodyme (Nd), le dysprosium (Dy), le lanthane (La), le scandium (Sc) et l'yttrium (Y).
- Une carte électronique contient environ 40 % de résine et de plastique, 30 % de fibres de verre et de céramique et 30 % de groupes de terres rares.

a. Récolte des déchets d'ordinateur

La récolte de nos échantillons a été effectuée auprès des entreprises et de plusieurs réparateurs pour obtenir divers composants électroniques d'ordinateurs et de téléviseurs et plus spécialement nous avons récolté des cartes mères. A la fin de la récolte, nous avons obtenu une dizaine de kilogrammes d'échantillon.



Figure III. 1 : Déchets récoltés (déchets d'ordinateur)

b. Démantèlement des déchets

Différentes techniques de démantèlement existent à des échelles industrielles : démantèlement physique, démantèlement par chaleur ou chimique.

Dans notre cas, les composants utiles sont récupérés par un démantèlement total du déchet (Figure III.2). Ce de séparer des composants non dangereux des composants à valoriser. Cette opération se fait manuellement sous hotte à l'aide d'un marteau piqueur puisque le démontage manuel permet une meilleure récupération de métaux valorisables.

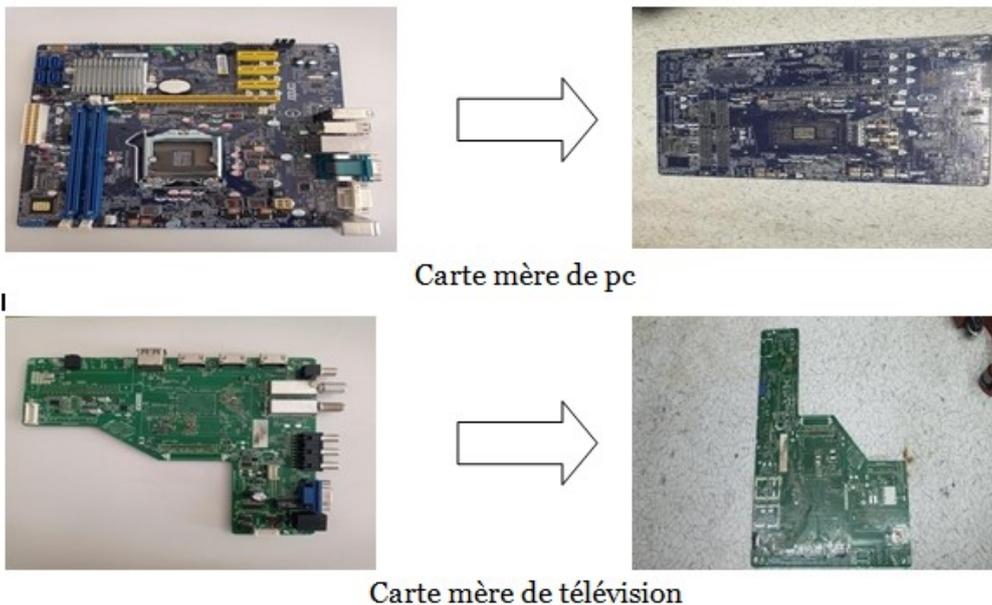


Figure III. 2: Démantèlement d'un déchet (une carte mère de pc et une carte mère de télévision)

Les échantillons sont ensuite placés dans un four à 200 °C pendant 10 minutes pour faire fondre les soudures.

A la fin de l'opération, nous avons obtenus les masses suivantes :

Tableau III. 1 : Poids des éléments récupérés

Echantillon	Poids
transformateur électrique	801.4 g
Cable	333.8g
RAM	84 g
Condensateurs chimiques	480.3 g
Condensateurs céramiques	270 g
Piles	128 g
PCB carte nu	1620 g
MLCC(Condensateurs céramiques multicouches)	48 g
Supports de processeur	558g
Bobines	270 g
Totale	4593.5 g

III.2. Préparation des échantillons

Pour pouvoir extraire les métaux précieux des DEEE, qui serviront à fabriquer de nouveaux Equipements électroniques. Nous avons pris 3 échantillons (Figures III.3-5) constitués de composants électronique et électrique. La masse de chaque échantillon est illustrée dans le tableau ci-dessous.

Tableau III. 2 : Caractéristiques des échantillons

Echantillon	Provenance de l'échantillon	Masse de l'échantillon
Ech1	Issu de circuits intégrés (CI)	134g
Ech2	Issu de transistor	72g
Ech3	Issu des cartes avec des connecteurs plaquent d'or	263 g

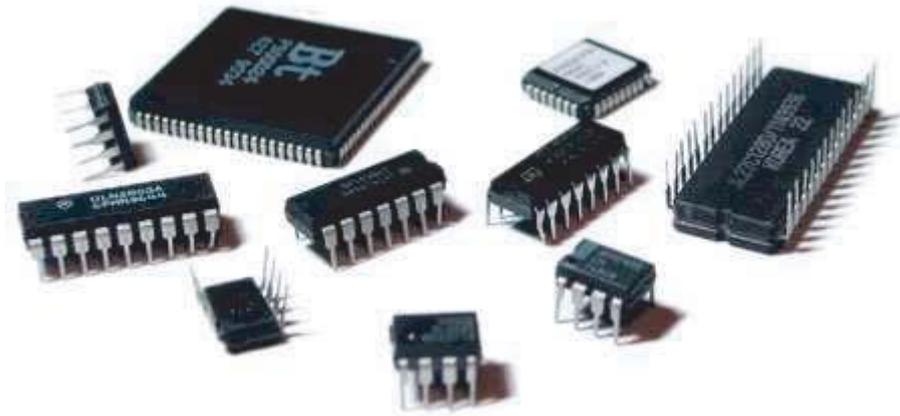


Figure III. 3 : Echantillon 01 issu des circuits intégrés (CI)
(Image représentatif)



Figure III. 4 : Echantillon 02 issu des transistors
(Image représentatif)



Figure III. 5 : Echantillon 03 issu des cartes avec des connecteurs en plaque d'or

III.3. Broyage des circuits intégrés (CI) et transistors

Ce prétraitement mécanique consiste à réduire la taille des CI par broyage puis à faire une classification granulométrique des poudres obtenues.

Il est important de rappeler que le broyage des circuits intégrés (CI) et transistors peut libérer des substances dangereuses qui peuvent polluer l'environnement. Pour cela, il est important de suivre les directives de sécurité appropriées pour manipuler et éliminer ces matériaux.

Voici les étapes à suivre pour broyer des CI et transistors avec un mortier et pilon :

Matériel :

- Mortier et pilon
- Gants de protection
- Lunettes de protection
- Masque respiratoire
- CI et transistors à broyer
- Sac en plastique réformable

Étapes suivies:

1. Porter des gants de protection, des lunettes de protection et un masque respiratoire. Ceci est essentiel pour éviter l'inhalation de poussière et de particules fines provenant des CI et transistors broyés.
2. Placer les CI et transistors dans le mortier. Commencez par de petites quantités et ajoutez-en plus si nécessaire.
3. Broyer les CI et transistors avec le pilon. Utilisez un mouvement circulaire pour broyer les matériaux en une poudre fine.
4. Arrêtez périodiquement pour secouer le mortier et redistribuer les morceaux. Cela permet de s'assurer que tous les CI et transistors sont broyés uniformément.
5. Une fois que les CI et transistors sont broyés en poudre fine, versez-les dans un sac en plastique réformable.



Figure III. 6 : Broyage des circuits intégrés (CI)

III.4. Extraction par voie humide (Lixiviation)

La lixiviation est une technique d'extraction des métaux qui consiste d'abord à solubiliser le métal pour permettre son ionisation. Le but de cette opération est de récupérer les métaux nobles comme l'or et l'argent.

1. Lixiviation avec l'acide nitrique

- Verser 60 ml d'acide nitrique concentré dans un bécher.
- Ajouter la poudre d'échantillon 01 pesée à l'acide nitrique
- Verser 40 ml d'acide nitrique concentré dans un autre bécher.
- Ajouter la poudre d'échantillon 01 pesée à l'acide nitrique.
- Chauffer le mélange à environ 80°C sous agitation constante (en utilisant un agitateur magnétique ou un barreau d'agitation) pendant 30 minutes.
- Laisser refroidir le mélange à température ambiante

❖ Filtration et séparation

- Filtrer le mélange à l'aide de papier filtre et d'un entonnoir dans une fiole jaugée de 200 ml.
- La partie solide on le grade pour la deuxième lixiviation
- En prend un échantillon 04 de 10ml pour analyse uv-visible

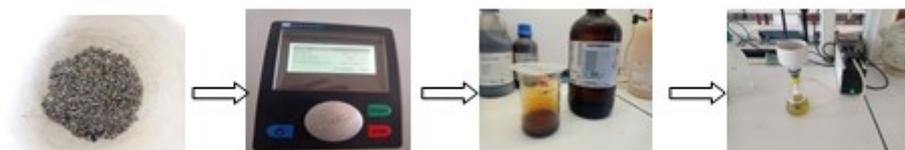


Figure III. 7 : Lixiviation avec l'acide nitrique

2. Lixiviation avec l'acide chlorhydrique (HCl)

- Verser 60 ml d'acide chlorhydrique (HCl) concentré dans un bécher.
- Ajouter la poudre d'échantillon 02 pesée à l'acide chlorhydrique
- Ajouter 10 ml d'acide nitrique concentré à l'acide nitrique
- Chauffer le mélange à environ 80°C sous agitation constante (en utilisant un agitateur magnétique ou un barreau d'agitation) pendant 30 minutes.
- Laisser refroidir le mélange à température ambiante

❖ Filtration et séparation

- Filtrer le mélange à l'aide de papier filtre et d'un entonnoir dans une fiole jaugée de 200 ml.
- En prend un échantillon 02 de 10ml pour analyse uv-visible

❖ Préparation de l'eau régale

- Mélanger 3 volumes d'acide nitrique concentré avec 1 volume d'acide chlorhydrique concentré dans un bécher.
- Laisser refroidir le mélange à température ambiante.



Figure III. 8 : Préparation de l'eau régale

3. Lixiviation avec l'eau régale

- Verser environ 70 ml d'eau régale préparée dans un bécher.
- Ajouter la poudre d'échantillon 03 pesée à l'eau régale.
- Chauffer le mélange à environ 80°C sous agitation constante (en utilisant un agitateur magnétique ou un barreau d'agitation) pendant 30 minutes.
- Laisser refroidir le mélange à température ambiante.

❖ Filtration et séparation

- Filtrer le mélange à l'aide de papier filtre et d'un entonnoir dans une fiole jaugée de 100 ml.
- En prend un échantillon 03 de 10ml pour analyse uv-visible
- Rincer le bécher et le papier filtre avec de l'eau distillée pour récupérer tout l'or dissous.
- Porter le volume de la solution dans la fiole jaugée à 100 ml avec de l'eau distillée.

❖ Précipitation avec le sulfate de fer

- Verser environ 10 ml d'une solution concentrée de clore d'étain (II) dans la solution d'or dans la fiole jaugée.
- Agiter le mélange pendant 15 minutes.
- Observer la formation d'un précipité noir rougeâtre métallique.
- Filtre et séché le précipité comme un échantillon 04

❖ Précautions de sécurité

- L'eau régale est un mélange d'acides forts (acide nitrique et acide chlorhydrique) et est très corrosive. Porter des lunettes de protection, des gants et une blouse de laboratoire lors de sa manipulation.
- Travailler dans un endroit bien ventilé.
- Éliminer les déchets conformément aux réglementations locales en matière de sécurité et d'environnement.



Figure III. 9 : Libération des gaz sous une haute au laboratoire

Remarques

- Ce protocole expérimental est une procédure de base et peut être adapté en fonction de la nature de l'échantillon

Le rapport acide/échantillon en gramme/millilitre (g/mL) pour la lixiviation de l'or avec l'eau régale dépend de plusieurs facteurs, tels que :

- **La nature de l'échantillon:** La quantité d'eau régale requise pour dissoudre efficacement l'or dépend de la composition de l'échantillon et de la teneur en or. Pour les minerais d'or, un rapport acide/échantillon de 1:1 à 2:1 (g/mL) est généralement utilisé. Pour les alliages d'or, un rapport de 0,5:1 à 1:1 (g/mL) peut être suffisant.
- **La concentration des acides:** Un mélange d'acide nitrique concentré (65%) et d'acide chlorhydrique concentré (37%) dans un rapport de 3:1 est généralement utilisé. Cependant, des concentrations plus ou moins élevées peuvent être employées en fonction de la nature de l'échantillon.

- **La température de réaction:** Des températures plus élevées favorisent la dissolution de l'or, ce qui peut permettre de réduire le rapport acide/échantillon.
- **Le temps de réaction:** Un temps de réaction plus long peut également permettre de réduire le rapport acide/échantillon.

En général, un rapport acide/échantillon de 1:1 (g/mL) est un bon point de départ pour la lixiviation de l'or avec un mélange d'acide nitrique concentré (65%) et d'acide chlorhydrique concentré (37%) à 80°C pendant 30 minutes. Ce rapport peut être ajusté en fonction des facteurs mentionnés ci-dessus.

Il est important de noter que l'utilisation d'un excès d'eau régale n'est pas recommandée. Cela peut entraîner une dissolution excessive d'autres métaux présents dans l'échantillon, compliquant la purification de l'or. De plus, un excès d'acide augmente la quantité de déchets dangereux à éliminer.

Voici quelques exemples de rapports acide/échantillon pour différents types d'échantillons :

- Minerai d'or à 10% d'or: 1:1 (g/mL)
- Alliage d'or à 50% d'or: 0,5:1 (g/mL)
- Déchets électroniques contenant de l'or: 1:2 (g/mL)

Il est important de réaliser des essais préliminaires pour déterminer le rapport acide/échantillon optimal pour votre échantillon spécifique.

En plus des informations ci-dessus, il est important de se familiariser avec les propriétés chimiques et les dangers potentiels de l'eau régale avant de commencer l'expérimentation.

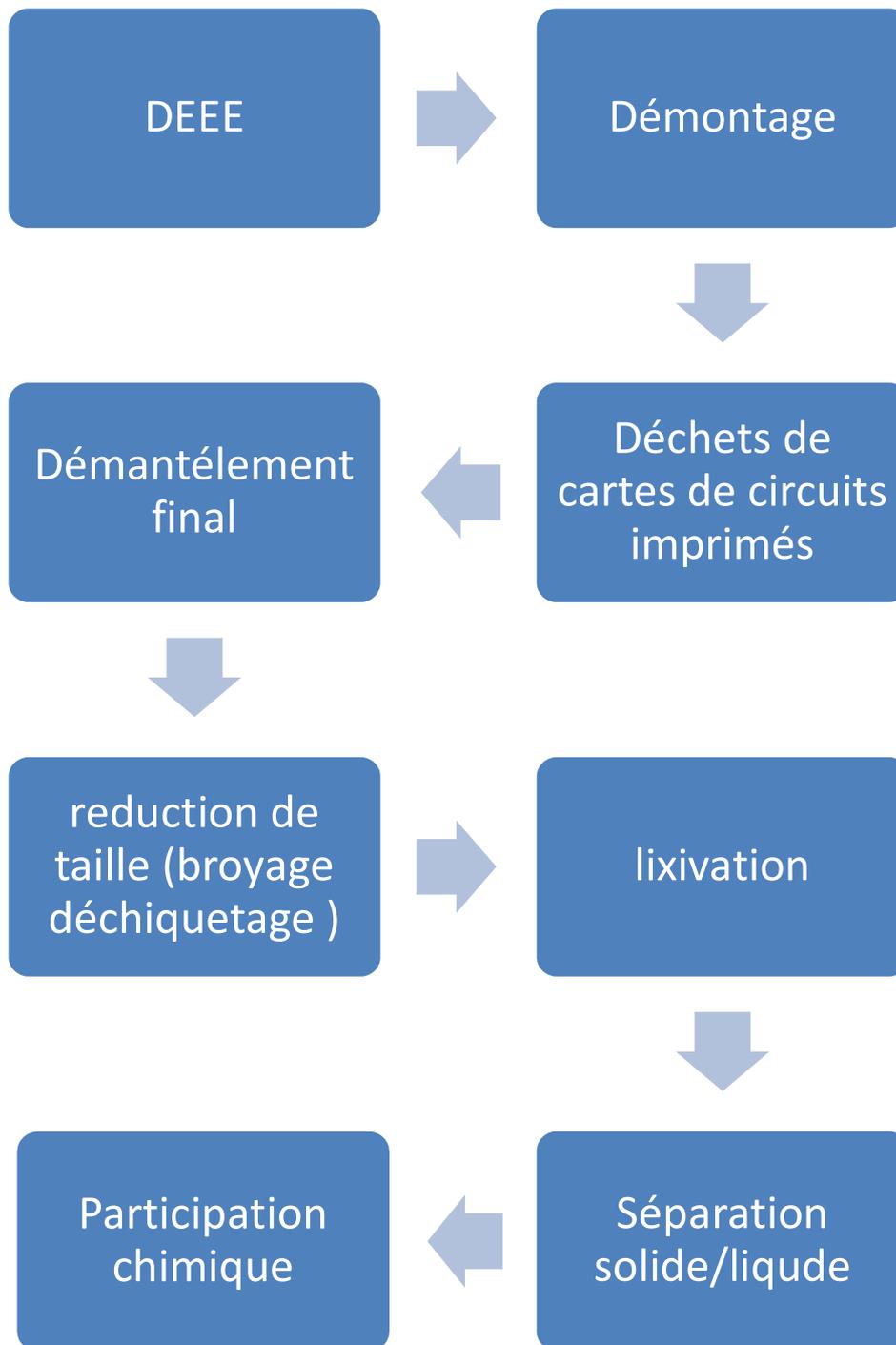


Figure III. 10 : Diagramme du procédé d'extraction des métaux dans les déchets de circuits imprimés par voie hydrométallurgique

III.5. Techniques de caractérisation

Pour caractériser les échantillons, deux techniques de caractérisations ont été employées : la diffraction des rayons X et l'UV-visible. Les analyses sont réalisées au niveau du laboratoire de Physico-Chimie des Matériaux et Catalyse. (LPCMC) de l'université de Béjaia.

III.5.1. Analyse par diffraction des rayons X [44]

Après leur élaboration, les échantillons sont caractérisés par diffraction des rayons X. Le diffractomètre est constitué d'un goniomètre horizontal, d'un porte-échantillon tournant et d'un tube à rayons X. Cette technique permet d'identifier les phases cristallines en présence dans le matériau et de déterminer leurs caractéristiques cristallographiques.

III.5.2. Principe de la diffraction des rayons X [44]

Un cristal est caractérisé par une répartition périodique des atomes dans l'espace autrement dit par un réseau ainsi que par sa structure cristalline. Lorsqu'un faisceau de rayons X qui est un rayonnement électromagnétique entre en contact avec le cristal, il y a interaction élastique entre le rayonnement incident et le nuage électronique de chacun des atomes.

La longueur d'onde des rayons X étant du même ordre de grandeur que la distance qui sépare les plans atomiques des réseaux cristallins, la structure du cristal diffractera un faisceau de rayons X de telle sorte que le rayonnement conserve sa cohérence, on parle de diffusion cohérente ou élastique.

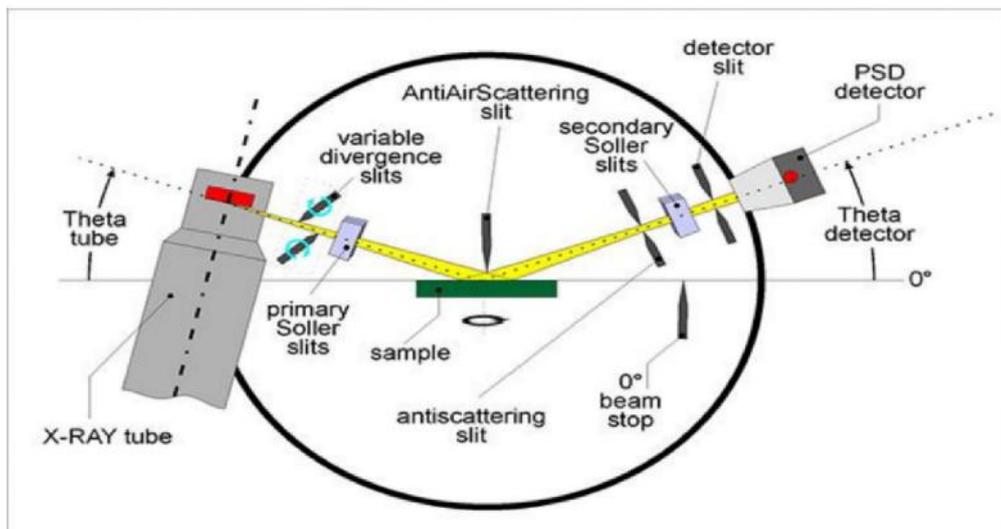


Figure III. 11 : Schéma d'un diffractomètre

La répartition des atomes (ou molécules) d'un cristal est faite suivant des familles de plans réticulaires appelées indices de Miller et notées (hkl). Chaque ensemble de plans parallèles se caractérise par une distance inter-réticulaire d_{hkl} entre chacun d'entre eux. L'onde plane incidente de vecteur d'onde k_0 fait avec les plans un angle θ , appelé angle de Bragg (voir Figure III.12).

Cette diffraction est d'autant plus intense que la famille de plans est « dense » c'est-à-dire riche en atomes. Un faisceau de rayons X incident de longueurs d'onde λ ne sera réfléchi par une famille de plans (hkl) que dans la mesure où il rencontre ces plans sous un certain angle θ dit angle de Bragg (Figure III.12) tel que :

$$2 d_{hkl} \sin \theta = n \lambda$$

Avec n , nombre entier, qui est l'ordre de diffraction.

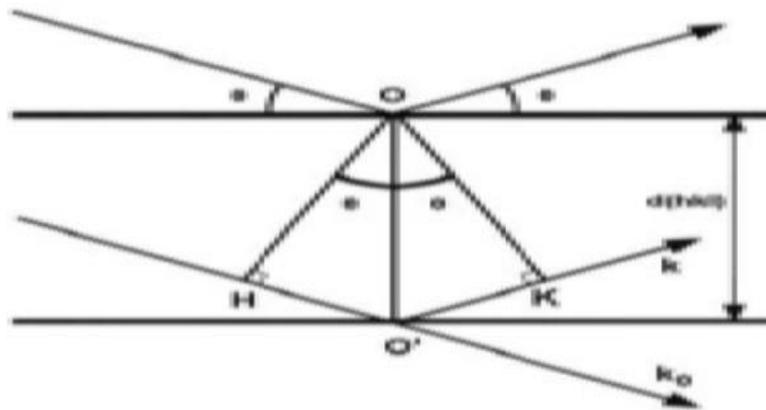


Figure III. 12 : Un faisceau de rayons X.

Un balayage d'angle de diffraction est obtenu à l'aide d'un goniomètre où l'échantillon plan effectue une rotation avec un mouvement uniforme de vitesse angulaire w .

En balayant le domaine angulaire, on obtient un spectre entier présentant des pics d'intensité caractéristiques des différents plans réticulaires si le matériau est cristallisé. Si le matériau est amorphe en revanche, on n'obtiendra aucun pic seulement un signal très large.

Les diffraction-grammes ainsi obtenus, à l'aide d'un logiciel sont interprétés. Les positions et les intensités des pics observées sont comparés aux fichiers de référence **PDF-ICDD** (Powder Diffraction File - International Center for Diffraction Data) pour l'identification des phases minéralogiques présentes. Et éventuellement l'utilisation de **RIR** (Reference Intensity Ratio) inclus dans le logiciel **High Score** plus du fichier PDF-ICDD permet l'estimation semi quantitative des phases correspondantes détectées quand celles-ci sont requises et/ou possibles.

III.5.3. Spectroscopie UV-visible

La spectroscopie UV-Visible est la plus ancienne et la plus utilisée des méthodes d'analyse dans les laboratoires. Elle permet notamment des applications quantitatives par application de la loi de Beer-Lambert. Cependant, elle ne fournit que peu d'informations structurales (Analyse qualitative) comparées aux autres méthodes spectroscopiques (IR, RMN et SM).

➤ Principe

Dans une molécule, les transitions électroniques UV-visibles mettent en jeu les énergies les plus importantes de la chimie (160 à 665 kJ·mol⁻¹). L'ordre de grandeur des énergies mises en jeu est celui des énergies de liaison des molécules et ces rayonnements peuvent parfois provoquer des ruptures de liaisons. Plus généralement, ils provoquent des transitions électroniques entre les différents niveaux d'énergie des molécules. L'absorption de photons se traduit par des transitions d'électrons engagés dans les orbitales moléculaires (les électrons des liaisons σ et π ainsi que les non liants n) de l'état fondamental et les niveaux non occupés des états excités (σ^* et π^*). Chaque transition est caractérisé à la fois par sa longueur d'onde λ_{\max} et par son coefficient d'absorption molaire: ϵ_{\max} à cette longueur d'onde.

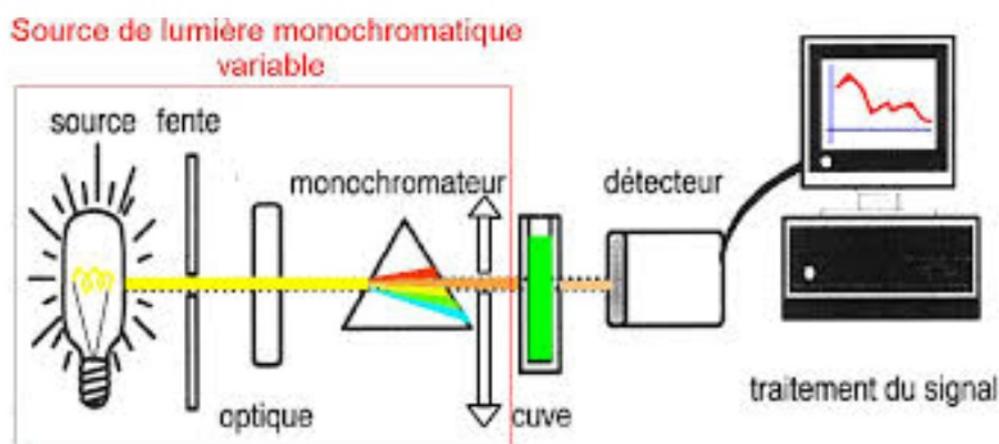


Figure III. 13 : Schéma simplifié le principe de l'UV-Visible.

Conclusion

Au cours de ce troisième chapitre, nous avons effectué une analyse instrumentale en utilisant des références concernant les équipements utilisés, les protocoles utilisés et la préparation des échantillons. Après avoir effectué cette analyse, nous avons obtenu des résultats qui seront lus et interprétés dans le quatrième chapitre.

CHAPITRE IV :
RESULTATS ET DISCUSSION

Chapitre IV : Résultats et discussions

L'objectif de ce travail est la valorisation des métaux nobles issus des déchets des cartes électroniques (déchets d'équipement électroniques et électriques). Ces métaux présentent une valeur économique, ils sont considérés comme source secondaires des métaux nobles après les minerais. Pour récupérer ces métaux, nous avons eu recours à une lixiviation en utilisant trois acides : l'eau régale, l'acide nitrique et l'acide chlorhydrique.

Le présent chapitre englobe les résultats de l'extraction, cette dernière est suivie par Uv-visible et par diffraction des rayons X.

IV.1. Résultat de la spectroscopie UV-visible

Les trois solutions de la figure (Figure 20) sont obtenues après une lixiviation des échantillons suivants :

Echantillon 1, issu de circuits intégrés (CI)

Echantillon 2, issu de transistors

Echantillon 3, issu des cartes avec des connecteurs plaque d'or



Figure IV. 1 : Solutions obtenues après lixiviation

Après lixiviation, nous avons analysé les trois solutions obtenues, les résultats sont montrés dans les figures suivantes :

❖ Spectre Uv-visible de l'échantillon 1 :

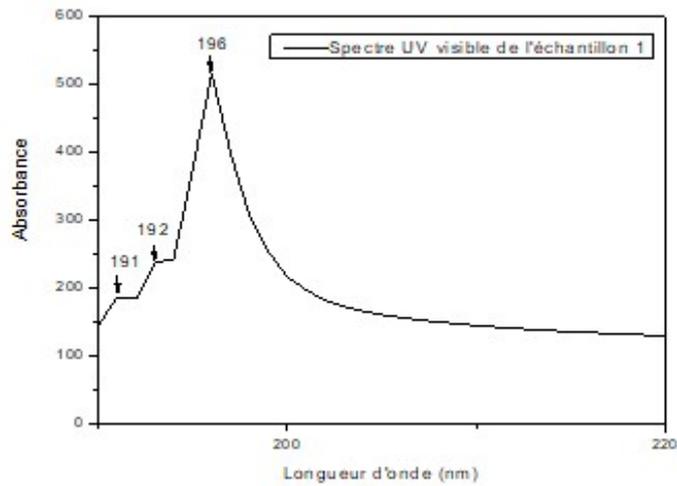


Figure IV. 2 : Spectre UV-visible de l'échantillon 01

❖ Spectre Uv-visible de l'échantillon 2 :

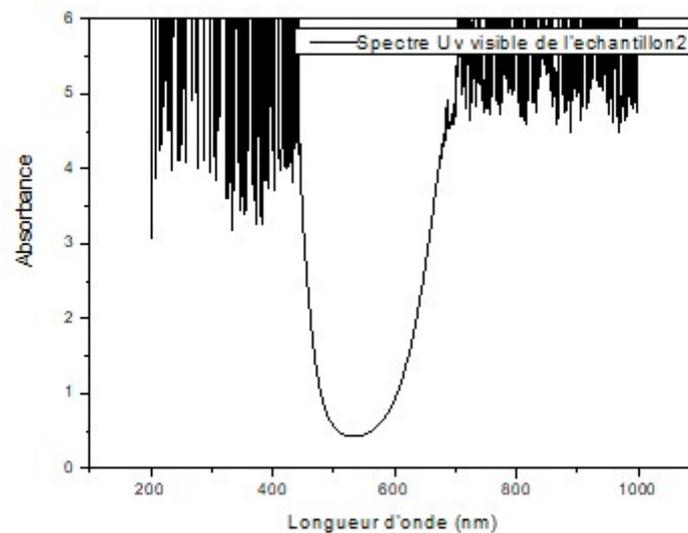


Figure IV. 3 : Spectre UV-visible de l'échantillon 02

❖ Spectre Uv-visible de l'échantillon 3 :

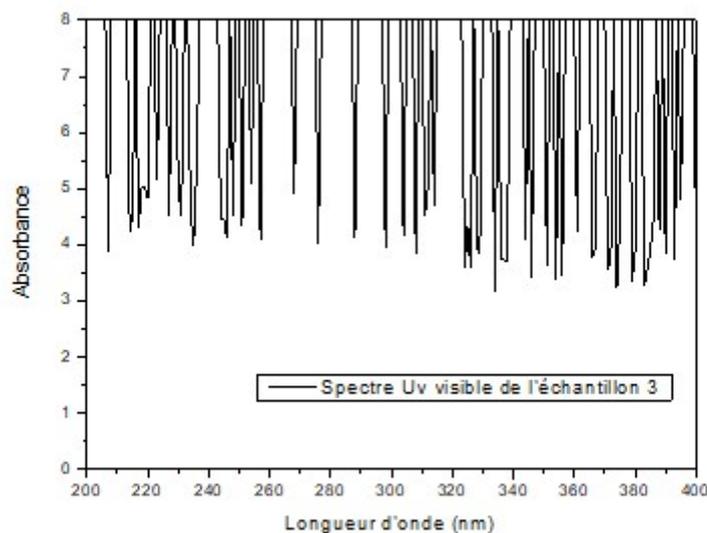


Figure IV. 4 : Spectre UV-visible de l'échantillon 03

En comparant les longueurs d'onde caractéristiques des échantillons avec ceux de la bibliographie, on conclut que :

- ❖ Pour la solution lixiviante de l'échantillon 1 issu de circuits intégrés (CI), trois bandes caractéristiques à 191, 192 et 196 nm correspondants aux éléments suivants

Eléments	Hg	Ag	Au	Pt	Ag
Longueur d'ondes caractéristiques (nm)	191	192	192	192	196
Reference	[50]	[50]	[50]	[49]	[46]

Tableau IV. 2 : Bandes d'absorption des solutions lixiviées

Pour la solution lixiviante de l'échantillon 2 issu de transistors, on remarque la présence de deux larges bandes d'absorbance, la première s'étale de 200-480 nm et la deuxième de 700 à 1000 nm. Cela correspond aux éléments illustrés dans le tableau ci-dessous

Tableau IV. 1 : Bandes d'absorption des solutions lixiviées

Eléments	Au	Ag	Pt	Pd	Ir	Rh	Sm	Eu	Gd	Yb
Longueur d'ondes caractéristiques (nm)	270	220	250	220	250	240	275, 402, 477	321, 394, 413	312, 362, 466	225, 328, 366
Reference	[50]	[50]	[50]	[49]	[46]	[49]	[48]	[45]	[47]	[46]

Il est important d'attribuer les larges bandes d'absorption à la concentration élevée des solutions.

Pour la solution lixivante de l'échantillon 3 issu des cartes avec des connecteurs plaquent d'or, nous avons remarqué la présence d'une large bande d'absorption située à des longueurs d'onde entre 200 et 400 nm. Ceci correspond aux éléments illustrés dans le (tableau 5).

IV.2. Résultats de la diffraction des rayons X

Suite à la lixiviation de l'échantillon 3, nous avons effectué une précipitation chimique du lixiviat en utilisant une solution de Chlorure d'étain SnCl_2 (II) dans le but de briser les liaisons chimiques pour obtenir le précipité, après le séchage, nous avons pu récupérer une fraction d'un poids de 0.8g, suite à ça, le passage à la DRX fut effectué dans le but de déterminer la composition minérale de la poudre les résultats sont présenté dans la figure (IV)

Les résultats de la diffraction des rayons X (DRX) pour l'échantillon 04

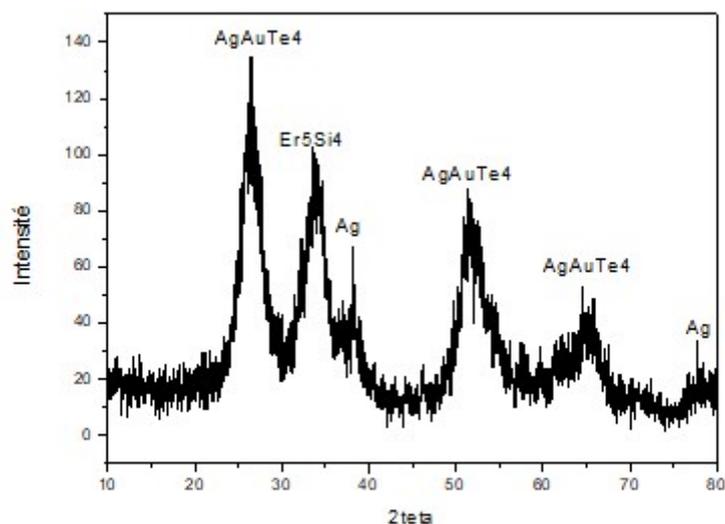


Figure IV. 5 : Diffractogramme des précipités de l'attaque par l'eau régale

Le diffractogramme des précipités présente des pics les plus correspondants à la phase cristalline Ag_3AuTe_2 (Petzit) en plus des cristaux d'argent. La présence de la phase Er_5Si_4 provient des composés électroniques.

Conclusion

Nos essais expérimentaux sur la valorisation des DEEE ont permis de constater que l'utilisation des acides (acide sulfurique, acide chlorique et l'eau régale) pour lixivier des échantillons issus de circuits intégrés (CI), de transistors et des cartes avec des connecteurs plaque d'or est efficace. Puisque les méthodes d'analyses (DRX et UV-visible) ont pu détecter la présence des métaux nobles comme : l'or (Au), l'argent (Ag), le palladium (Pd), le platine (Pt), l'iridium (Ir), de rhodium (Rh) et de samarium (Sm). Cependant, il est crucial de confirmer ces hypothèses par des analyses complémentaires, telles que la spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) ou d'autres techniques d'analyse élémentaire.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La récupération et le recyclage de ces métaux précieux à partir des DEEE sont essentiels pour assurer un approvisionnement durable en ressources critiques et réduire l'impact environnemental associé à l'extraction et à l'élimination des DEEE.

Cette thèse s'est concentrée sur l'exploration des techniques hydrométallurgiques comme approche prometteuse pour la récupération des métaux précieux à partir des DEEE.

Les conclusions majeures de cette thèse sont les suivantes : • Les techniques hydrométallurgiques offrent une approche prometteuse pour la récupération des métaux précieux à partir des DEEE, présentant des avantages tels que la sélectivité, le respect de l'environnement et la polyvalence.

- Des recherches et développements supplémentaires sont nécessaires pour optimiser les procédés hydrométallurgiques en termes de rendement, de sélectivité et d'impact environnemental, ainsi que pour explorer la récupération d'autres métaux précieux à partir des DEEE.

En conclusion, cette thèse apporte une contribution significative à la compréhension et au développement de techniques hydrométallurgiques efficaces et durables pour la récupération des métaux précieux à partir des DEEE.

Des politiques et des réglementations efficaces sont essentiels pour promouvoir l'adoption de pratiques durables de traitement des DEEE et encourager la récupération des métaux précieux à partir de ce flux de déchets.

Dans l'ensemble, cette thèse fournit un cadre solide pour la poursuite de la recherche et du développement dans le domaine de la récupération des métaux précieux à partir des DEEE..

Bibliographie

- [1] T. Cheisson, E.J. Schelter, Rare earth elements: Mendeleev's bane, modern marvels, Science 363 (2019) 489-493, <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aau7628>.
- [2] T. Zhong, J.M. Kindem, J.G. Bartholomew, J. Rochman, I. Craiciu, E. Miyazono, M. Bettinelli, E. Cavalli, V. Verma, S.W. Nam, Nanophotonic rare-earth quantum memory with optically controlled retrieval, Science 357 (2017) 1392-1395, <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.aan5959>.
- [3] R. Ryoo, J. Kim, C. Jo, S.W. Han, J.-C. Kim, H. Park, J. Han, H.S. Shin, J.W. Shin, Rare earth-platinum alloy nanoparticles in mesoporous zeolite for catalysis, Nature 585 (2020) 221-224, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2671-4>.
- [4] H. Wang, X. Wu, Y. Yang, M. Nishiura, Z. Hou, Co-syndiospecific Alternating Copolymerization of Functionalized Propylenes and Styrene by Rare-Earth Catalysts, Angew. Chem. Int. Ed. 132 (2020) 7240-7244, <https://doi.org/10.1002/anie.201915760>.
- [5] The State Council Information Office of the People's Republic of China, Situation and Policies of China's Rare Earth Industry, Beijing, 2010.
- [6] U.S. Government Accountability Office, Rare earth materials in the defense supply chain, Washington, D.C., 2010.
- [7] European Commission, Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on Defining Critical Raw Materials, Brussels, Belgium, 2018.
- [8] Global Industry Analysts Inc, Rare Earth Elements - Global Market Trajectory & Analytics, 2021
- [9] Philippe Pichat. La gestion des déchets. Ed Flammarion 1995
- [10] Tristan Turlan. LES DÉCHETS Collecte. Traitement. Tri. Recyclage. ED Dunod 2015

- [11] La loi N° 01-19 du 12 décembre 2001 , Journal Officiel Algérie.
- [12]Echosciences est un réseau social dédié aux acteurs et amateurs de culture scientifique sur les territoires
<https://www.echosciences-grenoble.fr>
- [13] Directive 2012/19/EU on waste electrical and electronic equipment (WEEE)
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019>
- [14]Suivi des déchets d'équipements électriques et électroniques a l'échelle mondiale pour 2020 page 15.16.17.18
 Auteurs: Vanessa Forti, Cornelis Peter Baldé, RuedigerKuehr et Garam Bel
 Contributions: S. Adrian, M. Brune Drisse, Y. Cheng, L. Devia, O. Deubzer, F. Goldizen, J. Gorman, S. Herat, S. Honda, G. Iattoni, W. Jingwei, L. Jinhui, D.S. Khetriwal, J. Linnell, F. Magalini, I.C. Nnororm, P. Onianwa, D. Ott, A. Ramola, U. Silva, R. Stillhart, D. Tillekeratne, V. Van Straalen, M. Wagner, T. Yamamoto et X. Zeng
- [15] Ministère de l'Environnement et des Energies Renouvelables:<https://www.me.gov.dz/fr/>
- [16]Agence Nationale des Déchets : <https://and.dz/>
- [17].Source : https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000006417930.
- [18].Source :<https://www.ecologic-france.com/citoyens/ou-deposer-mes-dechets.html>.
- [19]Source : <https://teleservices.paris.fr/ramen/>
- [20]Source : <https://www.ecosystem.eco/>
- [21] A. A. Maurice, K. N. Dinh, N. M. Charpentier, A. Brambilla, and J. C. P. Gabriel, “Dismantling of printed circuit boards enabling electronic components sorting and their subsequent treatment open improved elemental sustainabilityopportunities,” Sustain., vol. 13, no. 18, 2021, doi: 10.3390/su131810357.
- [22] C. Yang, Q. Tan, L. Liu, Q. Dong, and J. Li, “Recycling Tin from Electronic Waste: A Problem That Needs More Attention,” ACS Sustain. Chem. Eng., vol. 5, no. 11, pp. 9586–9598, Nov. 2017, doi: 10.1021/acssuschemeng.7b02903.
- [23] D. Fang, G. Li, J. Liu, and Y. Tan, “Printed Circuit Board Disassembling Machine,” Chinese Pat. CN105, vol. 818, 2017.

- [24] L. Rocchetti, A. Amato, and F. Beolchini, "Printed circuit board recycling: A patent review," *J. Clean. Prod.*, vol. 178, pp. 814–832, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.076.
- [25] H. Duan, K. Hou, J. Li, and X. Zhu, "Examining the technology acceptance for dismantling of waste printed circuit boards in light of recycling and environmental concerns," *J. Environ. Manage.*, vol. 92, no. 3, pp. 392–399, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.jenvman.2010.10.057.
- [26] J. Wang and Z. Xu, "Disconnecting, resource recovery, and pollution control," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49, no. 2, pp. 721–733, 2015, doi: 10.1021/es504833y.
- [27] X. Zeng, J. Li, H. Xie, and L. Liu, "A novel dismantling process of waste printed circuit boards using water-soluble ionic liquid," *Chemosphere*, vol. 93, no. 7, pp. 1288–1294, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.06.063.
- [28] P. Zhu, Y. Chen, L. Y. Wang, and M. Zhou, "Treatment of waste printed circuit board by green solvent using ionic liquid," *Waste Manag.*, vol. 32, no. 10, pp. 1914–1918, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.wasman.2012.05.025.
- [29] S. Yi, B. Zhang, and Y. Yuan, "A Kind of Recovery Method of Waste Printed Circuit Board Metals Resources," *Chinese Pat. CN10*, vol. 6834, 2019.180
- [30] L. Meng, Y. Zhong, L. Guo, Z. Wang, K. Chen, and Z. Guo, "High-temperature centrifugal separation of Cu from waste printed circuit boards," *J. Clean. Prod.*, vol. 199, pp. 831–839, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.07.129.
- [31] X. Zhang et al., "Selective Desoldering Separation of Tin–Lead Alloy for Dismantling of Electronic Components from Printed Circuit Boards," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 3, no. 8, pp. 1696–1700, Aug. 2015, doi:10.1021/acssuschemeng.5b00136.
- [32] K. Koyama, M. Tanaka, and J. Lee, "Copper Leaching Behavior from Waste Printed Circuit Board in Ammoniacal Alkaline Solution," *Mater. Trans.*, vol. 47, no. 7, pp. 1788–1792, 2006, doi: 10.2320/matertrans.47.1788.
- [33] K. Li and Z. Xu, "A review of current progress of supercritical fluid technologies for e-waste treatment," *J. Clean. Prod.*, vol. 227, pp. 794–809, Aug. 2019, doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.104.
- [34] M. Xing et al, "Swelling-enhanced catalytic degradation of brominated epoxy resin in waste printed circuit boards by subcritical acetic acid under mild conditions," *Waste Manag.*, vol. 102, pp. 464–473, 2020, doi: 10.1016/j.wasman.2019.11.011.

- [35] R. S. Stojanovic and A. M. Bond, *Analytical Chemistry* 1993, 65, 56-64.
- [36] V. M. Hultgren, A. W. A. Mariotti, A. M. Bond and A. G. Wedd, *Analytical Chemistry* 2002, 74, 3151-3156.
- [37] E. I. Rogers, D. S. Silvester, S. E. W. Jones, L. Aldous, C. Hardacre, A. J. Russell, S. G. Davies and R. G. Compton, *Journal of Physical Chemistry C* 2007, 111, 13957-13966.
- [38] A. Saheb, J. Janata and M. Josowicz, *Electroanalysis* 2007, 19, 1222-1222.
- [39] G. A. Snook, A. S. Best, A. G. Pandolfo and A. F. Hollenkamp, *Electrochemistry Communications* 2006, 8, 1405-1411.
- [40] Tom Welton, *Angewandte Chemie International Edition* 2008, 47, 4468.
- [41] K. Matsumoto, R. Hagiwara and Y. Ito, *Electrochemical and Solid State Letters* 2004, 7, E41-E44.
- [42] V. V. Pavlishchuk and A. W. Addison, *Inorganica Chimica Acta* 2000, 298, 97-102.
- [43] J.-P. Diard, B. Le-Gorrec and C. Montella, *Cinétique électrochimique*, Hermann, Paris, 1996, p.199-309.
- [44] J. Protas Septembre 1999 : diffraction des rayonnements introduction aux concepts et méthodes, Belgique, p 8, 11, 181,229 ;
- [45] "Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths" par K. A. Gschneidner, Jr., and L. Eyring, 1978.
- [46] "Luminescence of Gadolinium-Activated Phosphors" par M. V. Phosphor, et al., 2004.
- [47] "Spectroscopic Properties of Rare Earth Elements" par B. R. Judd, 1962.[48]
- [48] "Optical Spectra of Lanthanides (RE³⁺) in Doped Yttrium Aluminum Garnet (YAG) Crystals" par Kamal A. Ali, et al., 2016.
- [49] "Yb³⁺-Doped Luminescent Materials: Materials, Properties, and Applications" par M.G. Brik, et al., 2018.
- [50] Pour les Métaux Nobles : "Handbook of Inorganic Chemistry" par B.R. Triggs (Elsevier, 2006)
- [60] J. O. M. Bockris and A. K. N. Reddy in *Modern Electrochemistry, Vol. 1* (Ed. A. Plenum/Rosetta), Plenum Press, New York, 1970, pp. 513-622.

- [61] Wang, H., Gu, G., Qi, Y., 2005. Crushing performance and resource characteristic of printed circuit board scrap, *J. Cent. South Univ. Technol.*, 12(5), 552-555.
- [62] Yuan, C. Y., Zhang, H. C., McKenna, G., Korzeniewski, C., Li, J., 2007. Experimental studies on cryogenic recycling of printed circuit board, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 34, 657–666.
- [63] Zhang, S., Forssberg, E., 1999. Intelligent Liberation and classification of electronic scrap, *Powder Technology*, 105, 295–301.
- [64] Govender, E., Harrison, S.T.L., Bryan, C.G., 2012. Modification of the ferric chloride assay for the spectrophotometric determination of ferric and total iron in acidic solutions containing high concentrations of copper, *Minerals Engineering*, 35, 46–48
- [65] Yamane, L.H., Tavares de Moraes, V., Espinosa, D.C.R., Tenório, J.A.S., 2011. Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers, *Waste Management*, 31, 2553-2558
- [66] Song, Q., Wang, Z., Li, J., Duan, H., Yu, D. and Zeng, X. (2017). Characterizing the transboundary movements of UEEE/WEEE: Is Macau a regional transfer center? *Journal of Cleaner Production* 157, 243-253.
- [67] WRAP (2012). Market Flows of Electronic Products & WEEE Materials, A model to estimate EEE products placed on the market and coming to the end of useful life. Summary data findings for 2009-2020., *Waste & Resources Action Programme (WRAP)* 55
- [68] Y. J. Park, and D. J. Fray, “Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards,”

Journal of Hazardous Materials, vol. 164, no. 2–3, pp. 1152-1158, 5/30/, 2009

[69] R. Benrabbah, “Development of plasma processes for the elaboration and characterization of

photovoltaic silicon : deposit of thin layers épitaxiées of silicon by PECVD : measure of the purity of the silicon in the solid state (20°C) and liquid (1414°C) by LIBS,” Université Pierre et

Marie Curie - Paris VI, 2015

[70] V. Goodship, and A. Stevels, Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook:

Elsevier, 2012

[71] V. Kogan, "Recovery of precious metals from electronic scrap by hydrometallurgical processing," Google Patents, 2006

[72] P. Christian, “Métallurgie et recyclage du niobium et du tantale,” Techniques de l'ingénieur

Métallurgie extractive, vol. base documentaire : TIB369DUO, no. ref. article : m2365, 2009.

Innovating e-waste management: From macroscopic to microscopic scales. The Science of total environment 575

[73] Step Initiative (2014). Solving the E-Waste Problem (Step) White Paper, One Global Definition of E-waste. Bonn, Germany.

[74] Ghosh, S. K., Zheng, L., Awasthi, A. K., Liubarskaia, M.A., Ogola, J.S. and Tavares, A.N. (2017). Waste electrical and electronic equipment management and Basel Convention compliance in Brazil, Russia, India, China and South Africa (BRICS) nations. Waste Management & Research 34, 693-707.