



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Electromécanique

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique
Spécialité : Electromécanique Industrielle

Thème

**Étude expérimentale d'un séparateur semi
industriel destiné aux traitements des déchets
d'équipements électronique (DEE)**

Présenté et soutenu publiquement par :

Bouchelarem Laeticia Imen et Meguenni Belkacem

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Haimour Rachida	MCB	IMSI/Univ-Oran2	Présidente
Mimouni Chahinez	MCB	IMSI/Univ-Oran2	Encadrante
Labair Hakima	MCB	IMSI/Univ-Oran2	Examinatrice

Année 2022/2023

Remerciement

Au début, nous exprimons notre gratitude envers le divin pour nous avoir fourni le courage, le bien-être et l'endurance nécessaires pour supporter la période prolongée de nos recherches. Nous sommes ravis d'écrire ces humbles mots d'appréciation, de reconnaître et de remercier ceux qui nous ont apporté leur soutien indéfectible tout au long de notre mémoire.

D'une façon spéciale, Nous exprimons notre profonde gratitude à Mme Mimouni Chahinez pour avoir accepté de nous superviser et pour nous avoir fourni des conseils précieux, des encouragements et de son temps tout au long de ce projet. Son soutien, son professionnalisme et ses excellentes conditions de travail ont été déterminants dans la réussite de notre mémoire.

On tient également à remercier les membres de jury, d'avoir accepté d'examiner notre mémoire.

Nos remerciements et notre reconnaissance à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie ; merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

A nos frères et sœurs, amis et tous ceux qui ont partagé avec nous des moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail, ils nous ont chaleureusement supporté et encouragé tout au long de notre parcours.

A nos familles, nos proches et à ceux qui nous donnent l'amour et la vivacité

Mes professeurs qui doivent voir dans ce travail la fertilité d'un savoir bien acquis.

A tous nos amis qui ont été près de nous à qui nous souhaitons plus de succès.

Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

MEGUENNI Belkacem

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Chers Papa Mansour et Maman Farida,

En cette étape cruciale de la finalisation de mon mémoire, je tiens à vous exprimer ma gratitude la plus sincère pour votre soutien, votre amour et votre dévouement inconditionnels. Je souhaite vous remercier pour votre constante présence à mes côtés. Depuis mes premiers pas dans l'éducation jusqu'à ce moment important de ma vie, vous avez été mes plus grands supporters. Vous m'avez enseigné les valeurs de l'effort, de la discipline et de l'intégrité, qui ont façonné ma vision du monde et m'ont aidée à devenir la personne que je suis aujourd'hui. Je suis fière et honorée de pouvoir partager cette réalisation avec vous, car elle est le reflet de l'éducation et des valeurs que vous m'avez transmises.

Merci du fond du cœur pour tout ce que vous avez fait et continuez de faire pour moi.

Je vous aime de tout mon être.

À ma merveilleuse sœur Lyria,

Tu es ma complice, ma confidente et ma meilleure amie. Tu as toujours cru en moi, m'encourageant à poursuivre mes rêves et à viser l'excellence. Merci d'être là pour moi, Que notre relation continue à grandir et à s'épanouir, car tu es une source constante de bonheur. Je te chéris plus que les mots ne pourront jamais l'exprimer.

À mes chers frères Nisou et Minou ,

Que notre complicité continue à grandir, que nos rires résonnent et que nos souvenirs se multiplient. Vous êtes des sources d'inspiration et de joie dans ma vie. Je vous aime profondément et je suis reconnaissante de vous avoir comme frères.

À mes chères tantes Fatima zohra , Salima et Noura ,

Merci d'avoir toujours été là pour moi, de m'écouter, de me conseiller et de m'encourager dans mes projets. Je suis honorée d'avoir des tantes aussi exceptionnelles dans ma vie. Avec tout mon amour.

A ma grand-mère, mes oncles et leurs femmes, mes cousins et cousines, tonton Nadir .

À la mémoire de mes grands-pères et ma grande mère,

*A toute la famille **Bouchelarem** et **Haddad***

*À mon binôme d'exception Kacimo,
tu es un véritable roc sur lequel je peux compter. Nos efforts conjoints sont une force
imparable et je suis honorée de partager ce voyage avec toi.*

*À mes chers amis,
Romaïssa, Khadidja , Hanane , Rofaida , Wafaa , Kheira , Sahla , Lalou , magha ,Yassine ,
Abdenmour. À travers les hauts et les bas, les rires et les larmes, les secrets confiés et les
moments précieux, vous avez façonné ma vie de manière indélébile. Chacun de vous apporte
une couleur unique à mon cercle d'amitié. Que nos aventures se multiplient, que nos rires
retentissent et que notre amitié perdure pour toujours. Je suis reconnaissante de chaque
instant partagé avec vous.
Avec tout mon amour et mon amitié*

LAETICIA IMEN

Résumé

Ce travail présente une étude expérimentale d'un séparateur semi-industriel utilisé spécifiquement pour le traitement des déchets d'équipements électroniques (DEEE). L'objectif de cette étude est d'évaluer la capacité de ce séparateur à réaliser une séparation efficace des matériaux valorisables présents dans les DEEE, tout en étant économiquement viable et écologiquement durable. Cela contribue ainsi au recyclage et à la gestion durable de ces déchets. L'importance de cette étude réside dans la nécessité de traiter les DEEE de manière appropriée, car ils contiennent souvent des matériaux précieux tels que les métaux non ferreux, qui peuvent être récupérés et recyclés. En évaluant la capacité de ce séparateur semi-industriel à séparer et à récupérer efficacement ces matériaux valorisables, vous contribuez à la mise en place de solutions durables pour la gestion des DEEE.

Mots clés : Déchets, déchets d'équipements électroniques, séparateur, courant de Foucault, recyclage

Abstract

This work presents an experimental study of a semi-industrial separator specifically used for the treatment of electronic equipment waste. The objective of this study is to evaluate the capacity of this separator to achieve an efficient separation of valuable materials present in electronic equipment waste, while being economically viable and environmentally sustainable. This contributes to recycling and sustainable management of such waste.

The significance of this study lies in the necessity to appropriately treat electronic equipment waste, as it often contains precious materials such as non-ferrous metals that can be recovered and recycled. By evaluating the capacity of this semi-industrial separator to effectively separate and recover these valuable materials, you contribute to the establishment of sustainable solutions for electronic equipment waste management.

Keywords: Waste, waste electronic equipment, separator, eddy current, recycling

ملخص

هذا العمل يقدم دراسة تجريبية لفصل شبه صناعي يستخدم بشكل خاص في معالجة نفايات أجهزة الإلكترونيات. الهدف من هذه الدراسة هو تقييم قدرة هذا الفاصل على تحقيق فصل فعال للمواد القيمة الموجودة في نفايات أجهزة الإلكترونيات، مع الحفاظ على الاقتصاد والاستدامة البيئية. وبذلك يسهم في إعادة التدوير وإدارة النفايات بشكل مستدام. تكمن أهمية هذه الدراسة في الحاجة إلى معالجة نفايات أجهزة الإلكترونيات بشكل مناسب، حيث غالباً ما تحتوي على مواد ثمينة مثل المعادن غير الحديدية التي يمكن استردادها وإعادة تدويرها. من خلال تقييم قدرة هذا الفاصل شبه الصناعي على فصل واسترداد هذه المواد القيمة بشكل فعال، فإنك تساهم في إيجاد حلول مستدامة لإدارة نفايات أجهزة الإلكترونيات. **الكلمات المفتاحية:** نفايات، نفايات الأجهزة الإلكترونية، فاصل، تيار إيدي، إعادة تدوير

Sommaire

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

CHAPITRE I : Traitement des Déchets industriels

I.1 Introduction	3
I.2 Définition des déchets	3
I.2.1 Définition juridique	3
I.2.2 Définition environnementale	3
I.2.3 Définition économique	4
I.3. classification des déchets	4
I.3.1 selon leur origine	4
I.3.2 selon la nature du déchet	5
I.4 Impact des déchets	6
I.4.1 Impacts sur la santé humaine	6
I.4.2 Impacts sur l'environnement	7
I.5 Définition des déchets d'équipements électriques et électroniques	7
I.6 classification des DEEE	7
I.6.1 Le classement des EEE jusqu'à 2018	7
I.6.2 Le classement des EEE en cours à ce jour	8
I.7. Composants et substances dangereuses dans les déchets électroniques	9
I.7.1 composants des DEEE	9
I.7.2 Les substances dangereuses des composants électroniques	11
I.8 recyclage des DEEE.....	12
I.9 Exemples de déchets électroniques recyclables	13
I.9.1 Recyclage des cartes de circuits imprimés	13
I.10 Conclusion	19

CHAPITRE II : Séparation électrostatique et magnétique

II.1 Introduction	20
II.2 Installation des séparateurs électrostatique	20
II.2.1 Séparation électrostatique des DEEE	20
II.2.2 La charge électrique	21
II.2.3 Le champ électrique	21
II.2.4 La force électrique	22
II.2.5 Loi de coulomb	22
II.3 Installations de séparation électrostatique	22
II.3.1 Dispositifs de séparateur tribo électrostatiques	22
a) Séparateur tribo-électrique à tapis roulant	22
b) Séparateur tribo-électrique à chute libre	23
c) Séparateur tribo-électrostatique à tambour	24
II.3.2 Séparateurs tribo-Aero-électrostatique	25
a) Séparateur tribo-Aero-électrostatique à électrodes verticales	25
b) Séparateur tribo-Aero-électrostatique à disques tournants	26
c) Séparateur tribo-Aero-électrostatique à deux bandes transporteuses	27
d) Séparateur tribo-Aero-électrostatique à deux étages	28
II.3.3 La séparation magnétique	29
II.4 Application des Courants de Foucault	31
II.5 Théorème et lois fondamentales du magnétisme	32
II.6 Propriétés et comportement électromagnétique des matériaux	33
II.6.1 Propriétés magnétiques	33
II.7 Séparation par courants Foucault	36
II.7.1 L'usage du séparateur à courants de Foucault	37
II.7.2 Fonctionnement de séparateur	38
II.8 Conclusion	39

CHAPITRE III : Étude expérimentale d'un séparateur semi-industriel pour le traitement des DEE

III.1 Introduction	40
III.2 Description du dispositif	40
III.3 Mélange utilisé dans les essais expérimentaux	45

III.4 Broyeur	46
III.5 Tamiseur	46
III.6 Spectrométrie de fluorescence X.....	47
a) Spectromètre à Micro fluorescence X compact de type M4 TORNADO	47
b) Principe de fonctionnement.....	48
c) Rayons X et fluorescence	48
III.7 Conclusion	49

CHAPITRES IV : Résultats expérimentaux et discussion

IV.1 Introduction	50
IV.2 Analyse par spectrométrie de fluorescence	50
a) Préparation de l'échantillon :	50
b) Spectromètre de fluorescence :	50
c) Acquisition des spectres de fluorescence :	50
d) Résultats et discussion.....	50
IV .3 Simulation numérique de la performance du tri des DEEE du séparateur à courant de Foucault.....	54
IV.4 Conclusion	57
Conclusion générale	58

Liste des figures

Figure I.1: Déchets ménagère et assimilé.....	4
Figure I.2: Déchets inerte	6
Figure I.3 : Classification des DEEE	9
Figure I.4 : une carte de circuits imprimés	14
Figure I.5 : La structure du PCB simple face	15
Figure I.6 :La structure du PCB double face.....	15
Figure I.7 : La structure du PCB multicouches	16
Figure II.1 : Installation utilisé dans la séparation électrostatique	20
Figure II.2 champ électrique	21
Figure II.3 La loi de coulomb.....	22
Figure II.4 Représentation schématique d'un séparateur triboélectrique à tapis roulant	23
Figure II.5 Séparateur a chute libre	24
Figure II.6 Schéma du séparateur	24
FigureII.7 Schéma du séparateur tribo-électrostatique à tambour	25
Figure II.8 Schéma du séparateur tribo-Aero-électrostatique à électrodes verticales.....	26
FigureII.9 Représentation schématique d'un séparateur tribo-Aero-électrostatique à disques tournants	27
Figure II. 10 Représentation schématique d'un séparateur tribo-Aero-électrostatique à deux bandes transporteuses	28
Figure II. 11 Représentation schématique d'un séparateur tribo-Aero-électrostatique à deux étages	29
Figure II.12 La séparation magnétique	30
Figure II.13 Champ magnétique crée par un courant.....	32
Figure II.14 Moments magnétiques atomiques orbital et de spin.	33
Figure II.15 Perméabilité relative μ_r en fonction de B pour trois matériaux courants	35
Figure II.16 Schématisation de la structure en domaines d'un matériau ferrimagnétique ..	36
Figure II.17 Séparateur à courant de Foucault	36

Figure II.18 Séparation des différentes particules avec un séparateur à courant de Foucault	38
Figure III.1 Photographie d'une alimentation PSY-90K-2	41
Figure III.2 Photographie d'un moteur triphasé d'entraînement.....	42
Figure III.3 Photographie du support de base	42
Figure III.4 Photographie du convoyeur transporteur	43
Figure III.5 Photographie du collecteur	44
Figure III.6 Photographie tambour à aimants permanents logé dans un cylindre creux.....	44
Figure III.7 Photographie 3D du tambour à aimants permanents.....	45
Figure III. 8 Photographie du mélange granulaire	45
Figure III.9 Le Broyeur	46
Figure III.10 Photographie du tamiseur FRITSCH.....	46
Figure III.11 Spectromètre à Micro fluorescence X compact de type M4 TORNADO	47
Figure IV .1 Tableau périodique des éléments chimiques.....	51
Figure IV .2 Spectre de fluorescence X d'un échantillon du produit séparé et collecté au Coté droite du collecteur	52
Figures IV.3 Spectre de fluorescence X d'un échantillon du produit séparé et collecté au Coté droite du collecteur	53
Figures IV.4 Images X numérique du cuivre, brome, zinc et fer (haute résolution 1200x1200)	54
Figure IV .5 Programme écrit sous Matlab avec exécution	57

Liste des tableaux

Tableau I.1 Les substances dangereuses des composants électroniques	11
Tableau II.1 Susceptibilité des matériaux diamagnétique.....	34
Tableau II.2 Susceptibilité des matériaux paramagnétique	35
Tableau IV.1 Caractéristiques du Spectre (1) de rayons X à dispersion d'énergie (EDX)...	51
Tableau IV.2 Caractéristiques du Spectre (2) de rayons X à dispersion d'énergie (EDX)...	53
Tableau IV.3 Données de calcul d'une particule d'aluminium prises de la littérature.....	55

Liste des abréviations et Nomenclatures

DEEE: Déchets d'équipements électrique et électronique .

DMA : Déchets ménagers et assimilés.

DI : Déchets industriels.

MTH : Maladies à transmission hydrique .

EEE : Equipement électrique et électronique .

CM : Centimètre .

Ni-CD : Nickel-Cadmium.

NiMeH : Nickel Hydrure Métallique .

PCB : Printed Circuit Board.

TBBPA : Tetrabromobisphenol A .

PBDE : Polybromodiphényléthers.

CRT : Ecran à Tubes Cathodiques.

LCD : Ecrans à Cristaux Liquides.

PVC :Polyvinylchloride .

BFR : Retardateur de flamme bromé.

CFC : Chlorofluorocarbure.

CI : Carte imprimé.

CE : Commission Européenne.

HT : Haute tension .

CC : Courant continue.

f.é.m. : Force électromotrice .

DEE : Déchets d'équipements électrique .

V : Vitesse .

H : Champ magnétique .

μ : Perméabilité.

Φ : Flux.

I : Courant.

N : Nombre de spires.

l : Longueur .

R : Résistance .

B : Induction magnétique.

M : Vecteur d'aimentation.

X : Susceptibilité magnétique.

Si : Silicium.

Cu : Cuivre.
Pb :Plomb.
Al : Aluminium.
Pt : Platine.
Kg : Kilogramme.
KW: Kilowatt.
3D : Trois dimensions .
tr : Tour .
min : minute .
g : gramme.
U : Uranium.
Be : Béryllium.
2D : deux dimensions .
MeV : mégaélectronvolt.
eV : électronvolt.
h : constante de Planck.
c : vitesse de la lumière.
 λ : longueur d'onde .
j : joule.
S : seconde.
EL : Elément .
AN : Numéro atomique .
C : Concentration .
Rh : Rhodium .
KV : Kilovolt.
DC : Courant direct .
C : Coulomb.
q : Charge électrique .
F : Force électrique .
r : Distance .
K : Constante électrostatique .

Introduction générale

Au cours des dernières décennies, la croissance exponentielle de la consommation mondiale a engendré une problématique environnementale majeure : la gestion des déchets électroniques, également connus sous le nom de DEEE (Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques). Les DEEE comprennent une vaste gamme d'appareils électriques et électroniques en fin de vie, tels que les téléphones portables, les ordinateurs, les téléviseurs, les réfrigérateurs, les machines à laver, etc. Ces déchets contiennent des substances toxiques et des matériaux précieux tels que le cuivre et l'argent qui nécessitent une manipulation spécifique afin de minimiser les impacts environnementaux et de récupérer les ressources précieuses.

Le traitement des DEEE implique plusieurs étapes, dont une étape cruciale est la séparation des différents matériaux constituant les appareils électroniques. Traditionnellement, cette séparation est réalisée à l'aide de méthodes mécaniques, telles que le tri manuel ou l'utilisation de techniques de séparation par gravité. Cependant, ces méthodes présentent des limitations en termes d'efficacité et de récupération des matériaux précieux.

Afin de surmonter ces défis, de nouvelles technologies émergent pour le traitement des DEEE.

L'une de ces technologies prometteuses est l'utilisation de séparateurs à courants de Foucault. Les séparateurs à courants de Foucault exploitent les principes de l'induction électromagnétique pour séparer les matériaux conducteurs des matériaux non conducteurs. Lorsque les déchets électroniques sont soumis à un champ magnétique variable, des courants de Foucault sont induits dans les matériaux conducteurs, créant un champ magnétique supplémentaire qui s'oppose au champ magnétique externe. Cela génère une force répulsive qui éjecte les matériaux conducteurs, permettant ainsi leur séparation des autres matériaux.

L'objectif principal de ce travail est d'évaluer son efficacité, sa faisabilité et son potentiel en tant que solution de traitement des DEEE, contribuant ainsi à la réduction de l'impact environnemental de ces déchets tout en favorisant la valorisation des matériaux qu'ils contiennent. Le mémoire comporte quatre chapitres qui se présentent comme suit :

Le premier chapitre représente des généralités sur les déchets, leurs impacts et la dangerosité des DEEE .

Le deuxième chapitre est consacré pour l'installation des différents dispositifs de séparation électrostatique, théorème et lois fondamentales du magnétisme et l'application de courant de Foucault.

Le troisième chapitre est dédié à l'étude, la description du dispositif utilisé et la présentation des expériences réalisées sur les cartes électroniques.

Le quatrième chapitre présente les résultats expérimentaux et la récupération des métaux telle que le Cuivre et le Zinc avec une explication détaillée pour orienter les décisions de gestion des déchets électroniques et contribuer à l'amélioration des pratiques de recyclage et de valorisation de ces déchets.

Le manuscrit est clôturé avec une conclusion générale.

Chapitre I : Traitement des déchets industriels

Chapitre I : Traitement des déchets Industriels

I.1 Introduction

Le traitement des DEEE est devenu un défi majeur pour les gouvernements, les industries et les chercheurs du monde entier. Les méthodes traditionnelles de traitement, telles que l'enfouissement ou l'incinération, ont des impacts négatifs sur l'environnement et la santé humaine, en raison des substances nocives qui sont libérées dans l'atmosphère ou le sol. De plus, ces méthodes ne permettent pas la récupération des matériaux précieux contenus dans les DEEE.

Il est donc nécessaire de développer de nouvelles approches de traitement qui peuvent surmonter ces limites. Les méthodes de traitement avancées telles que la séparation électrostatique, la pyrolyse, la valorisation énergétique et la récupération des métaux précieux peuvent permettre la récupération des matériaux précieux, réduire les impacts environnementaux et contribuer à la transition vers une économie circulaire.

I.2 Définition des déchets

I.2.1 Définition juridique

La loi n°01-19 du 12 décembre 2001, publiée au journal officiel de la république algérienne n°77, définit les déchets 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 » [1].

I.2.2 Définition environnementale

Du point de vue environnemental, un déchet peut constituer une menace s'il entre en contact direct ou indirect avec l'environnement. Ce contact peut être direct, par exemple lorsqu'un déchet est simplement abandonné, ou indirect, par exemple lorsque le déchet est traité de manière inappropriée [2] .

I.2.3 Définition économique

Sur le plan économique, les déchets désignent tout matériau ou objet qui n'a aucune valeur ou qui a une valeur négative pour son possesseur à un moment et à un endroit donné. Cependant, il est essentiel de noter que cette définition n'englobe pas les déchets recyclables, qui peuvent avoir une faible valeur économique [2].

I.3. Classification des déchets

I.3.1 Selon leur origine

a. Les déchets ménagers et assimilés (DMA)

Les déchets ménagers et assimilés sont les déchets produits par les ménages, les commerçants, les artisans, et même les entreprises et industries quand ils ne présentent pas de caractère dangereux ou polluant : Papiers, cartons, bois, verre, textiles, emballages. Ces déchets sont collectés par la commune s'ils peuvent être éliminés sans sujétions techniques particulières et sans risques pour les personnes ou l'environnement [3].



Figure I.1: Déchets ménagère et assimilé [4]

b. Les déchets industriels (DI)

On distingue deux types de déchets produits par les entreprises. Le premier type est constitué des déchets industriels non dangereux ou banals, qui peuvent être assimilés aux déchets ménagers. Le deuxième type est constitué des déchets industriels dangereux ou spéciaux, qui ne peuvent pas être éliminés dans les installations de stockage qui reçoivent d'autres types de déchets en raison de leurs propriétés dangereuses [3].

c. Les déchets agricoles

Ce sont les déchets issus de l'activité agricole. Il s'agit essentiellement de déchets organiques comme des déjections des animaux, les déchets de culture [3].

d. Les déchets d'activité de soins de santé

Ce sont les déchets issus des hôpitaux et les autres établissements de soins, les laboratoires et les centres de recherches, les morgues et les centres d'autopsie, les banques de sang et les services de collecte de sang [3].

I.3.2 selon la nature du déchet**a. Les déchets dangereux**

Les déchets sont considérés comme dangereux s'ils présentent une ou plusieurs des propriétés suivantes : Explosif, comburant, inflammable, irritant, nocif, toxique, cancérigène, corrosif, infectieux, toxique pour la reproduction, mutagène, écotoxique [3].

b. Les déchets toxiques en petites quantités

Ce sont des déchets dangereux produits en petites quantités par les ménages, les commerçants (Garage, coiffeurs, laboratoires de photos, imprimeries, laboratoires de recherches...). Il peut s'agir de déchets banals souillés (chiffons, cartons,...), piles, résidus de peinture, etc [3].

c. Les déchets non dangereux

Les déchets non dangereux sont les déchets qui ne présentent aucune des caractéristiques relatives à la dangerosité mentionnée auparavant (toxique, explosif, corrosif, ...). Ce sont les déchets banals des entreprises, commerçants, et artisans (papiers, cartons, bois, textiles, ...) et les déchets ménagers [3].

d. Les déchets inertes

Sont des solides minéraux qui ne subissent aucune transformation physique, chimique ou biologique importante : Pavés, gravats, carrelage. Ils proviennent des chantiers du bâtiment et travaux publics, mais aussi des mines et des carrières [3].



Figure I.2: Déchets inerte [5]

e. Les déchets ultimes

Un déchet ultime, résultant ou non du traitement d'un déchet, n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux [3].

I.4 Impact des déchets

I.4.1 Impacts sur la santé humaine

En ce qui concerne les conditions médicales associées aux facteurs environnementaux positifs et aux maladies propres à la gestion des déchets (comme les agents de nettoyage et la récupération), il convient de noter ce qui suit :

- Les deux formes d'hépatite sont épidémiques et sériques.
- Tétanos.
- La prévalence de la tuberculose.
- Divers impacts des substances radioactives.
- Maladies contractées par contact avec la peau ou les muqueuses.

Les conséquences des décharges non réglementées sur la santé publique :

- Une augmentation des maladies infectieuses et parasitaires, telles que la MTH virale causée par les modifications des ressources en eau, les hépatites infectieuses et les maladies parasitaires cutanées, a été observée.
- L'élevage de rongeurs, qui sont à l'origine de la peste.
- La présence rampante de chiens errants constitue une menace importante de zoonoses, comme la rage, et de parasitoses, liées aux tiques du chien.
- Augmentation des porteurs nuisibles tels que les mouches et les moustiques.

I.4.2 Impacts sur l'environnement

Les effets environnementaux des déchets solides sont assez graves et peuvent être observés à travers :

-Conditions atmosphériques modifiées

-Des polluants chimiques peuvent altérer les sols et les paysages.

-Les infiltrations et les eaux usées constituent une source de pollution pour les ressources en eau, en affectant la qualité des eaux souterraines et des cours d'eau.

I.5 Définition des déchets d'équipements électriques et électroniques

Ces équipements électrique et électroniques sont des appareils qui fonctionnent avec une prise électrique, un accumulateur ou Une pile ; ils deviennent un déchet dès qu'ils sont hors d'usage, ou obsolète, ou même lorsque le coût de réparation est trop élevé, lorsqu'une de ses pièces est défectueuse, ou enfin lorsqu'il est remplacé par un équipement plus récent [6].

L'article R. 543-172. du Code de l'environnement définit les EEE (équipements électriques et électroniques) comme « les équipements fonctionnant grâce à des courants électriques ou à des champs électromagnétiques, ainsi que les équipements de production, de transfert et de mesure de ces courants et champs, conçus pour être utilisés à une tension ne dépassant pas 1 000 volts en courant alternatif et 1 500 volts en courant continu » [7].

I.6 Classification des DEEE

I.6.1 Le classement des EEE jusqu'à 2018

Ce classement n'est plus en vigueur depuis le 14 août 2018. Désormais, le classement détaillé plus haut doit être utilisé, qui prend en compte les équipements électriques et électroniques répartis en 10 catégories [8]:

1. Gros électroménager
2. Petit électroménager
3. Matériel informatique et télécommunications
4. Équipements grand public et panneaux photovoltaïques
5. Matériel d'éclairage
6. Outils électriques et électroniques (à l'exception des gros outils industriels fixes)
7. Jouets, équipements de loisirs et de sport
8. Dispositifs médicaux (à l'exception de tous les produits implantés et infectés)
9. Instruments de surveillance et de contrôle
10. Distributeurs automatiques.

I.6.2 Le classement des EEE en cours à ce jour

Actuellement, il existe six catégories dans lesquelles les équipements électriques et électroniques peuvent être classés (voir la figure I.3) [8]:

1. Équipement d'échange de température.
2. Écrans, moniteurs et équipements contenant des écrans ayant une surface supérieure à 100 cm².
3. Les lampes.
4. Gros équipement (toute dimension externe supérieure à 50 cm), y compris, mais sans s'y limiter : Appareils ménagers; équipements informatiques et de télécommunications; équipement grand public; luminaires; matériel reproduisant le son ou les images, matériel musical; outils électriques et électroniques; jouets, équipements de loisirs et de sport; Équipement médical; instruments de surveillance et de contrôle; distributeurs automatiques; équipement pour la génération de courants électriques.
5. Petit équipement (pas de dimension extérieure supérieure à 50 cm), y compris, mais sans s'y limiter : Appareils ménagers ; équipement grand public ; luminaires ; matériel reproduisant le son ou les images, matériel musical ; outils électriques et électroniques ; jouets, équipements de loisirs et de sport ; Équipement médical ; instruments de surveillance et de contrôle ; distributeurs automatiques ; équipement pour la génération de courants électriques.
6. Petit matériel informatique et de télécommunication (pas de dimension extérieure supérieure à 50 cm).



Figure I.3 : Classification des DEEE [9]

I.7. Composants et substances dangereuses dans les déchets électroniques

I.7.1 composants des DEEE

Voici quelques éléments standards qui composent les appareils électriques :

a. Composants contenant du mercure

L'élément polyvalent, Mercure, trouve sa place dans une gamme de produits. Il est utilisé dans les relais utilisés dans les cartes de circuits imprimés de télécommunications et les cuisinières électriques, ainsi que dans les commutateurs de plusieurs produits de consommation tels que les appareils électroménagers, les radiateurs, les fours, les systèmes de traitement de l'air, les systèmes de sécurité, les niveleurs et les pompes. De plus, il est utilisé dans les batteries et les lampes à décharge de gaz qui offrent un rétro éclairage pour les écrans à cristaux liquides de divers appareils électroniques, notamment les téléviseurs à écran plat, les appareils photo, les caméscopes, les ordinateurs et les caisses enregistreuses [10].

b. Batteries

D'un point de vue environnemental, les piles contenant du mercure et les piles rechargeables contenant du cadmium, du plomb et du lithium sont préoccupantes.

Les batteries rechargeables comprennent les batteries au nickel-cadmium (Ni-Cd), au nickel-hydrure métallique (Ni-MeH), au lithium-ion et au plomb-acide et sont couramment utilisées dans les ordinateurs portables (notebook/laptop), les téléphones portables, les caméras vidéo, les outils électriques portables [10].

c. Cartes de circuits imprimés (PCB)

Les BPC contiennent un certain nombre de substances préoccupantes. Il s'agit du plomb (dans les soudures), de l'antimoine (dans les soudures), du béryllium (dans les connecteurs), du cadmium (dans les contacts et les interrupteurs), des retardateurs de flamme bromés (dans les plastiques), etc. Les retardateurs de flamme utilisés dans les PCB sont le TBBPA et les PBDE. Outre les substances dangereuses, les PCB contiennent une quantité importante de cuivre et de précieuses concentrations d'or, d'argent et de palladium. Des dispositifs à semi-conducteurs individuels, tels que des relais et des commutateurs au mercure, des condensateurs et des diodes électroluminescentes, peuvent également être présents dans les PCB, c'est-à-dire fixés aux cartes [10].

d. Tubes à rayons cathodiques (CRT)

Les anciens ordinateurs de bureau et téléviseurs à tube cathodique (CRT) contiennent la plus grande quantité de substances préoccupantes parmi tous les types d'appareils électroniques. En effet, un CRT polychrome plus ancien peut contenir jusqu'à 2 à 3 kg de plomb, alors qu'un plus récent ne contient généralement pas plus de 1 kg de plomb.

Le panneau CRT contient également des luminophores fluorescents composés de cadmium, de zinc et de métaux des terres rares. De plus, le canon à électrons du CRT contient une petite plaque getter, qui pèse environ 1 à 2 g, cadre compris, et qui contient des composés de baryum et de baryum [10].

e. Écrans à cristaux liquides (LCD)

Les écrans LCD sont utilisés dans une grande variété d'applications. Des cristaux liquides sont incrustés entre de fines couches de verre et des éléments de commande électriques. Un écran de téléphone portable peut contenir environ 0,5 mg de cristaux liquides, un écran d'ordinateur portable environ 0,5 g. Les cristaux liquides disponibles dans le commerce sont des mélanges de 10 à 20 substances, qui appartiennent aux groupes des phénylcyclohexanes substitués, des alkyl benzènes et des cyclohexylbenzènes. Environ 250 substances sont utilisées pour formuler plus d'un millier de cristaux liquides commercialisés. Les substances contiennent de l'oxygène, du fluor, de l'hydrogène et du carbone. Les cristaux liquides sont soupçonnés d'être dangereux, mais les études sur leur toxicité sont rares. Jusqu'à présent, les études menées n'ont pas trouvé potentiel cancérigène et toxicité aiguë par voie orale, bien que quelques substances aient montré des propriétés corrosives, irritantes ou sensibilisantes pour la peau [10].

f. plastique

Plastiques contenant des retardateurs de flamme bromés (BFR, dans diverses pièces en plastique) et plastiques en chlorure de polyvinyle (PVC, dans l'isolation des fils)[10].

I.7.2 Les substances dangereuses des composants électroniques

Des matières dangereuses, telles que des métaux lourds (mercure, cadmium, plomb, etc.), des retardateurs de flamme (pentabromophénol, PBDE, TBBPA, etc.) et d'autres substances toxiques, sont souvent présentes dans les équipements électriques et électroniques. Par conséquent, ces déchets sont classés comme dangereux et, s'ils sont éliminés de manière inappropriée, peuvent avoir de graves conséquences pour le bien-être humain et environnemental. La plupart des substances nocives se trouvent dans l'électronique.

Sur la base du tableau I.1, les éléments suivants sont jugés les plus dangereux :

Tableau I.1: Les substances dangereuses des composants électroniques [11]

Sources	Composants	Substances dangereuses
Téléviseurs,moniteurs	Tubes cathodiques	Métaux lourds(baryum, plomb, cadmium)
Presque tous les équipements électroniques	Circuits imprimés	Métaux lourds (plomb, étain, mercure, béryllium, cadmium)
Appareils portables	Piles	Métaux lourds(mercure, cadmium, lithium, plomb)
Afficheurs à cristaux liquides LCD	Lampes à cathodes	Mercure, cadmium
Tubes au néon	Lampes au néon	Mercure
Revêtements isolants, boîtiers, circuits imprimés	Plastique	Biphényles poly chlorés, ignifugeants bromés, dioxines, hydrocarbures poly-aromatique
Diodes électroluminescentes	Lampes témoins	Gallium, arsénium
Détecteurs de fumée	Capteurs	Éléments radioactifs
Climatiseurs	Unité de refroidissement	CFC
Photocopieurs	Tambour	Sulfure de zinc

I.8 recyclage des DEEE

Le recyclage des DEEE (Déchets d'Équipements Electriques et Electroniques) comprend plusieurs étapes importantes pour garantir une gestion responsable de ces déchets. Voici les principales étapes du recyclage des DEEE.

1. Collecte

La collecte des déchets englobe toutes les étapes qui consistent à rassembler les déchets depuis leur lieu de production, puis à les transporter vers des installations de traitement spécifiques [12].

2. Tri

Les DEEE sont triés en fonction de leur catégorie et de leur état (usagé, réparable, etc.). Les pièces qui peuvent être réutilisées sont séparées des déchets et mises de côté pour être réparées ou vendues. Les déchets restants sont ensuite acheminés vers une installation de traitement [10].

3. Démantèlement

Le but du démantèlement est de retirer les éléments qui contiennent des substances dangereuses, tels que les écrans cathodiques, les piles et les lampes à décharge, afin d'obtenir des sous-ensembles ou des pièces qui peuvent être valorisés de manière optimale sur le plan matériel.

Les composants extraits sont généralement :

- les cartes électroniques pour leur contenu en métaux précieux.
- les tubes cathodiques et autres éléments dangereux.
- les boîtiers en plastique destinés à être valorisés dans les filières plastiques.
- les pièces métalliques contenant du fer, du cuivre et de l'aluminium, présents dans les câbles, les bobinages et les coffrets [12].

4. Le broyage

Le broyage est une étape clé dans le processus de recyclage des DEEE, car il permet de réduire la taille des déchets. Son objectif est de fragmenter des matières solides de taille donnée en morceaux plus petits [12].

5. La séparation

Dans le processus de recyclage des DEEE, la séparation des différents métaux est une étape essentielle. Elle permet de trier et de séparer les métaux présents dans les déchets. Plusieurs techniques sont utilisées à cet effet.

-La séparation magnétique est employée pour séparer les substances métalliques en grande quantité à partir du flux de matières déjà broyées.

-La séparation par courant de Foucault est une méthode de tri utilisée pour les métaux non ferreux. Cette technique utilise le courant de Foucault pour repousser les matériaux non métalliques du convoyeur et les séparer des métaux.

-La flottaison est une autre technique utilisée pour trier les déchets en fonction de leur densité. Cette méthode est employée pour séparer les plastiques en se basant sur la différence de masse volumique entre les déchets et le liquide dans lequel ils sont plongés [12].

I.9 Exemples de déchets électroniques recyclables

I.9.1 Recyclage des cartes de circuits imprimés

a. Présentation des cartes de circuits imprimés

Les cartes de circuits imprimés (PCB) sont utilisées pour supporter mécaniquement et connecter électriquement des composants électroniques à l'aide de voies conductrices, de pistes ou de traces de signal gravées à partir de feuilles de cuivre laminées sur un substrat non conducteur, utilisées dans la fabrication de machines de bureau et d'ordinateurs, ainsi que dans la communication, l'équipement de contrôle et de divertissement à domicile. Les PCB sont une partie essentielle de presque tous les équipements électriques et électroniques et ont révolutionné l'industrie électronique. La création de motifs de circuit est réalisée à l'aide de méthodes additives et soustractives. Le circuit conducteur est généralement en cuivre, bien que l'aluminium, le nickel, le chrome et d'autres métaux soient parfois utilisés. Les PCB sont la plate-forme sur laquelle les composants microélectroniques tels que les puces semi-conductrices et les condensateurs sont montés [13].

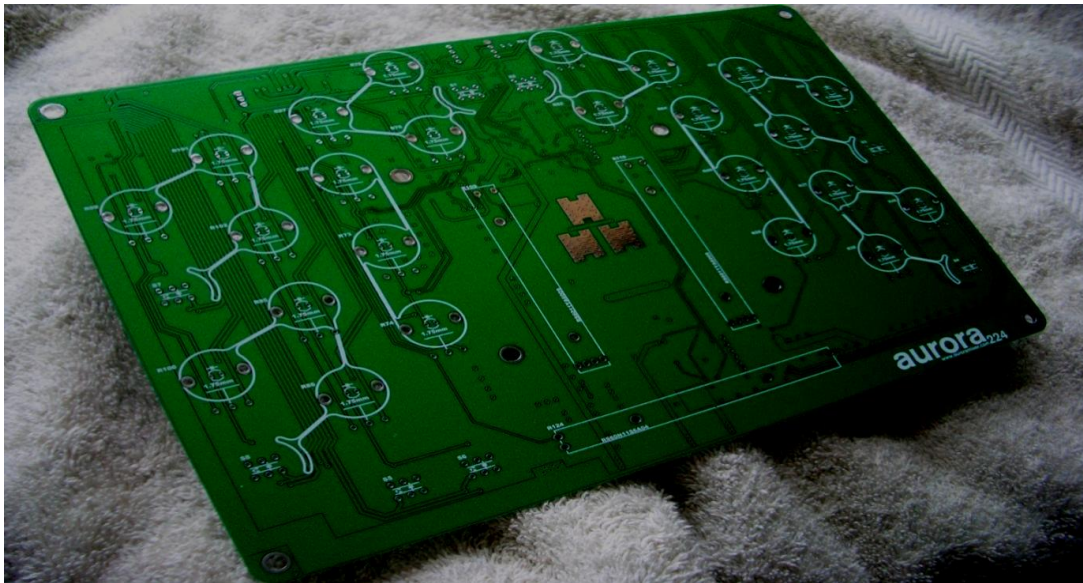


Figure I.4 : une carte de circuits imprimés[14].

b. Les constituants d'une carte de circuits imprimés

Le circuit imprimé est composé de plusieurs couches de cuivre qui sont séparées par un matériau isolant. Ce matériau est généralement constitué de résine époxy renforcée avec des fibres de verre et rendu ignifuge grâce à l'ajout de composés organo-bromés et de trioxyde d'antimoine. Ce processus de fabrication en plusieurs étapes crée une mille-feuille qui permet le bon fonctionnement du circuit imprimé [15].

Après la fabrication du circuit imprimé, les couches de cuivre sont gravées en utilisant un processus de lixiviation chimique pour créer un réseau de pistes et de pastilles. Les pastilles sont ensuite perforées pour permettre une connexion électrique soit entre les différents composants soudés sur la carte, soit entre les différentes couches de cuivre superposées. Afin de prévenir l'oxydation, une fine couche de palladium est déposée dans les trous et une couche d'or est ajoutée sur les parties en cuivre qui serviront de contacts lors de l'installation de la carte dans l'équipement électronique final. Le palladium est un métal platinoïde stratégique et est donc utilisé avec parcimonie. Ce processus de fabrication en plusieurs étapes assure le bon fonctionnement et la durabilité de la carte de circuit imprimé [15].

c. Les types de circuits imprimés

On trouve 3 grands types de circuits imprimés :

• Les circuits simple face

Une seule face de cuivre est déposée sur un support isolant (coté soudure) [16]. Ces circuits "simple face" ne conviennent que pour des schémas ne nécessitant que peu d'interconnexions électrique entre les composants [17].



Figure I.5 : La structure du PCB simple face[18]

• Les circuits double face

Cette fois, le support isolant est pris entre deux couches de cuivre (côté composant en haut et côté soudure en bas). Cette disposition autorise les pistes de potentiel différent, à se croiser sur les faces opposées ce qui permet d'augmenter la densité de composants sur la carte ou même de disposer des composants sur les deux faces du CI[16].



Figure I.6 : La structure du PCB double face[18]

• Les circuits multicouches

Cette fois, on réalise un empilage de couches électriques séparées par un isolant très fin. On réalise classiquement jusqu'à 16 couches électriques (parfois 22 dans certaines applications spéciales), toutes parfaitement superposées entre elles et communiquant par des vias ou des trous métallisés [16].

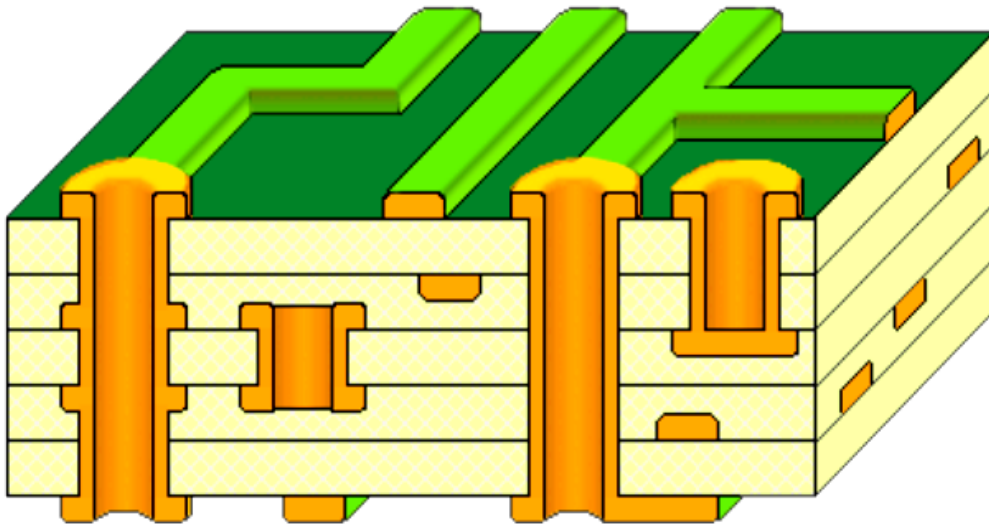


Figure I.7 : La structure du PCB multicouches[19]

d. Le montage des composants électroniques

Les composants électroniques sont alors soudés par des « pattes » dans les trous de la carte électronique avec un alliage à base d'étain. La soudure classique s'effectuait avec un alliage plomb-étain, qui devrait aujourd'hui être théoriquement remplacé par des alliages étain-argent cuivre afin de se conformer à la directive européenne 2002/95/CE bannissant l'usage du plomb.

Les composants électroniques d'une carte électronique recouvrent donc une large gamme de métaux : aluminium (dans les radiateurs), fer et cuivre (dans les transformateurs), acier inox (dans les éléments de connexion) palladium et tantale (dans les condensateurs), or (dans les microprocesseurs et dans les dépôts de surface des connexions), nickel (dans les résistances), etc. En outre, des plastiques thermo-formables, des résines, des vernis, des électrolytes chimiques et des céramiques complètent ce très large inventaire.

Dans une carte électronique, le poids des composants dépasse souvent celui du circuit imprimé. Actuellement, une carte électronique contient environ 40 % de résine et de plastique, 30 % de fibres de verre + céramique et 30 % de métaux [15].

e. recyclage des cartes de circuits imprimés

- **La collecte et le démantèlement des cartes électroniques usagées**

Le processus de démantèlement implique généralement une opération de fragmentation ou, dans certains cas, un simple démontage suivi d'un tri sélectif. Pendant cette opération, les différents matériaux tels que les ferrailles, l'aluminium, les plastiques, les batteries et les cartes électroniques sont séparés. Cependant, ce processus n'est pas infaillible : une partie des cartes peut être perdue et celles qui sont récupérées peuvent être contaminées par des débris de l'appareil d'origine, notamment des plastiques, ou même parfois par des corps étrangers [15].

- **L'extraction des métaux**

La composition chimique des cartes électroniques est extrêmement complexe et variable, ce qui rend le traitement métallurgique de ces dernières particulièrement difficile. Les technologies actuelles ne parviennent à résoudre ce problème que partiellement, avec des taux de récupération des métaux souvent insuffisants, voir des impacts environnementaux négatifs dans certains cas. Cette situation s'explique principalement par la présence sur les cartes de divers éléments, tels que des plastiques et des résines qui posent des problèmes lorsqu'on utilise des fours de pyrométallurgie, des fibres de verre et d'aluminium qui rendent les scories difficiles à fondre, des halogènes tels que le brome et le chlore qui sont fortement oxydants et ont tendance à former des sels métalliques lorsqu'ils se combinent avec les métaux que l'on souhaite extraire, ainsi que divers métaux qui sont antagonistes sur le plan métallurgique [15].

- **Les séparations physiques**

Broyage et séparation gravimétrique

Il est tentant de chercher des moyens de traiter les déchets électroniques en évitant les difficultés liées aux matières organiques et aux fibres de verre. Une méthode consiste à réaliser des broyages successifs et des séparations par densité pour récupérer une fraction polymétallique. Les entreprises du Sud-est asiatique ont développé des capacités pour effectuer ce type de traitement principalement en raison de réglementations interdisant l'exportation de ces matières sans prétraitement préalable. Cependant, cette méthode économique présente des inconvénients tels qu'une récupération insuffisante des métaux (environ 80 %) et la production d'un déchet ultime polluant, appelé fraction légère, contenant des résines phénoliques, des plastiques bromés et chlorés, des électrolytes et des métaux lourds résiduels.

La fraction métallique ainsi récupérée doit être encore traitée car elle contient également de la résine et des plastiques, bien que dans une proportion inférieure à 10 %. Des broyeurs et des appareils de séparation gravimétrique spécifiques pour les cartes électroniques sont même vendus en ligne en provenance de Chine.

La méthode de séparation mécanique, issue des techniques minières, est l'objet de nombreuses recherches. En broyant la matière plus finement (moins de 100 μ), les métaux peuvent être libérés de la résine époxy et la teneur en métal peut alors atteindre 90 %. Cependant, le traitement des résidus légers est un enjeu primordial pour l'environnement. Des solutions possibles pour leur valorisation énergétique et la récupération du brome par distillation sont envisageables [15].

- **Démontage et tri des composants**

Pour s'affranchir du caractère antagoniste des métaux, un tri des composants électroniques peut s'avérer prometteur. Le principe consiste à dessouder les composants, puis à les trier. Cette opération peut être réalisée manuellement en trempant la carte dans un bain de plomb en fusion et en la secouant vigoureusement ! Cette opération est pratiquée en Chine. Les composants sont ensuite triés à la main (ce qui demande une certaine patience) ! C'est ainsi que les condensateurs au tantale sont récupérés Hong Kong, avant d'être envoyés en Australie pour être traités [15].

- **la pyrolyse**

La pyrolyse est la décomposition chimique de matières organiques par chauffage en l'absence d'oxygène ou de tout autre réactif. Pyrolyse des matières organiques contenues dans les déchets de PCB conduit à la formation de gaz, d'huiles et de charbons qui peuvent être, utilisés comme matières premières chimiques ou comme carburants. À l'heure actuelle, il existe des études pilotes sur la récupération des métaux des déchets de PCB par pyrolyse en Chine. Un nouveau procédé de « séparation centrifuge + pyrolyse sous vide » pour la récupération de la soudure et des matériaux organiques des déchets de PCB a été étudié et développé [13].

- **La pyrométallurgie**

La pyrométallurgie est une technologie traditionnelle de récupération des métaux non ferreux ainsi que des métaux précieux des déchets de PCB. La pyrométallurgie comprend

l'incinération, la fusion dans un four à arc plasma ou un haut fourneau, le décrassage, le frittage, la fusion et les réactions en phase gazeuse à haute température [13].

- **L'hydrométallurgie**

L'hydrométallurgie est une autre technologie traditionnelle de récupération des métaux précieux à partir des déchets de PCB. Les principales étapes de l'hydrométallurgie consistent en une série de lixiviation acides ou caustiques (lixiviation au cyanure, lixiviation aux halogénures, lixiviation à la thio-urée, lixiviation au thiosulfate, etc.) des matériaux solides. Les solutions sont ensuite soumises à des procédures de séparation et de purification telles que la précipitation des impuretés, l'extraction par solvant, l'adsorption et l'échange d'ions pour isoler et concentrer les métaux d'intérêt. Par conséquent, les solutions sont traitées par un processus d'électro raffinage, de réduction chimique ou de cristallisation pour la récupération du métal [13].

I.10 Conclusion

Le traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) est une étape essentielle pour gérer de manière responsable les déchets électroniques. Il nécessite la mise en place de réglementations rigoureuses, de systèmes de collecte efficaces, de techniques de traitement appropriées, de programmes de sensibilisation et de collaborations entre les acteurs concernés. En adoptant ces mesures, nous pouvons réduire les impacts environnementaux, promouvoir le recyclage des matériaux précieux et contribuer à la construction d'une économie circulaire. Le traitement adéquat des DEEE est une nécessité pour préserver notre environnement et les ressources naturelles, tout en favorisant un développement durable pour les générations futures.

CHAPITRE II : Séparation électrostatique et magnétique

CHAPITRE II Séparation électrostatique et magnétique

II.1 Introduction

La séparation électrostatique s'est imposée comme la solution privilégiée. Le bon recyclage des déchets est crucial, et c'est la catégorie la plus importante qui nécessite un tri sélectif. Les particules dans les mélanges granulaires sont isolées par des forces électriques qui agissent sur elles. Il existe de nombreuses installations conçues à des fins de séparation électrostatique. Matériaux isolants aux propriétés granulaires qui acquièrent une charge par effet triboélectrique.

II.2 Installation des séparateurs électrostatique

II.2.1 Séparation électrostatique des DEEE

À l'heure actuelle, lorsqu'il s'agit de trier et de catégoriser des mélanges granulaires en fonction de leur conductivité électrique, les procédés de séparation électrostatique sont jugés les plus préférables. Pour exécuter cette méthode, des particules chargées ou polarisées sont placées sous un champ électrique intense créé entre deux électrodes chargées à haute tension. La tension des sources impliquées dans ce type de processus varie de 10 à 100 kV DC [20].

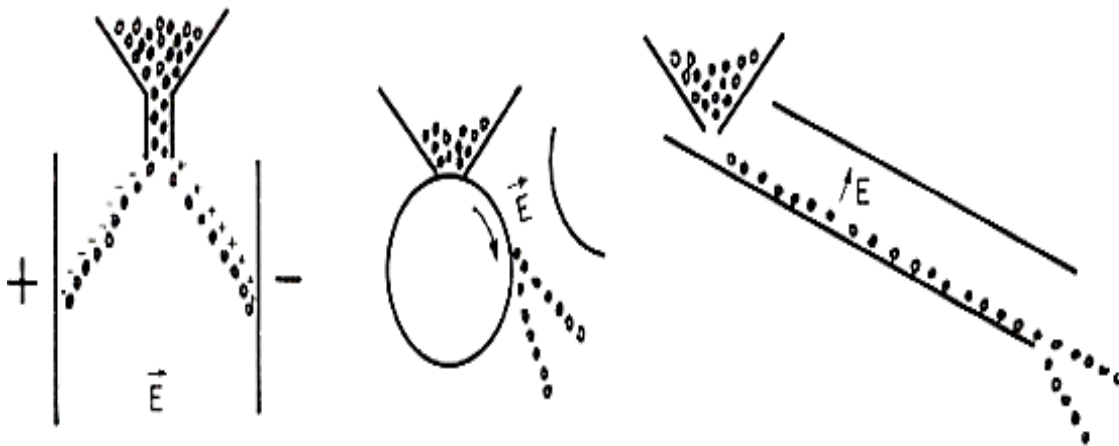


Figure II.1 : Installation utilisée dans la séparation électrostatique; de gauche à droite : -a- chute libre ; -b- cylindre tournant ; c- plaque inclinée

La figure II.1 présente des installations qui s'appuient sur des techniques éprouvées dans le domaine de la séparation électrostatique. Grâce aux trois configurations différentes présentées à la figure II.1, on est capable de réguler les forces électriques et mécaniques exercées sur les particules d'un mélange granulaire, augmentant ainsi la distance entre les points de collecte des particules aux propriétés variables. Typiquement, ces types d'installations sont

utilisés pour séparer des mélanges marqués comme : Conducteur/Conducteur ; Conducteur/Isolateur ; et Isolateur/Isolateur [20].

II.2.2 La charge électrique

La charge électrique est la propriété de la matière qui produit les phénomènes d'électricité et de magnétisme. L'unité utilisée pour mesurer la charge électrique est le coulomb (symbole : C). Toutes les particules qui possèdent une charge électrique peuvent subir des forces électriques et peuvent subir également des forces magnétiques si elles sont en mouvement.

Notation mathématique : charge = q

Unité (coulomb) : $[q] = C$ [21]

II.2.3 Le champ électrique

Est la région de l'espace dans laquelle la force électrique d'un corps chargé agit sur d'autres corps chargés environnants. Un corps (particule ou objet) chargé électriquement peut exercer à distance une force (d'attraction ou de répulsion) sur un autre corps chargé. L'espace dans lequel la force s'exerce se nomme le champ électrique. Pour représenter schématiquement le champ électrique, on trace des lignes de champ autour du corps chargé. Par convention, le champ électrique s'éloigne de la charge positive alors qu'il se dirige en direction de la charge négative. Ainsi, le champ électrique se déplace toujours de la charge positive vers la charge négative. Le champ électrique de deux charges de même signe s'oppose, c'est-à-dire qu'il s'oriente dans des directions opposées, alors que celui de deux charges opposées s'attire [22].

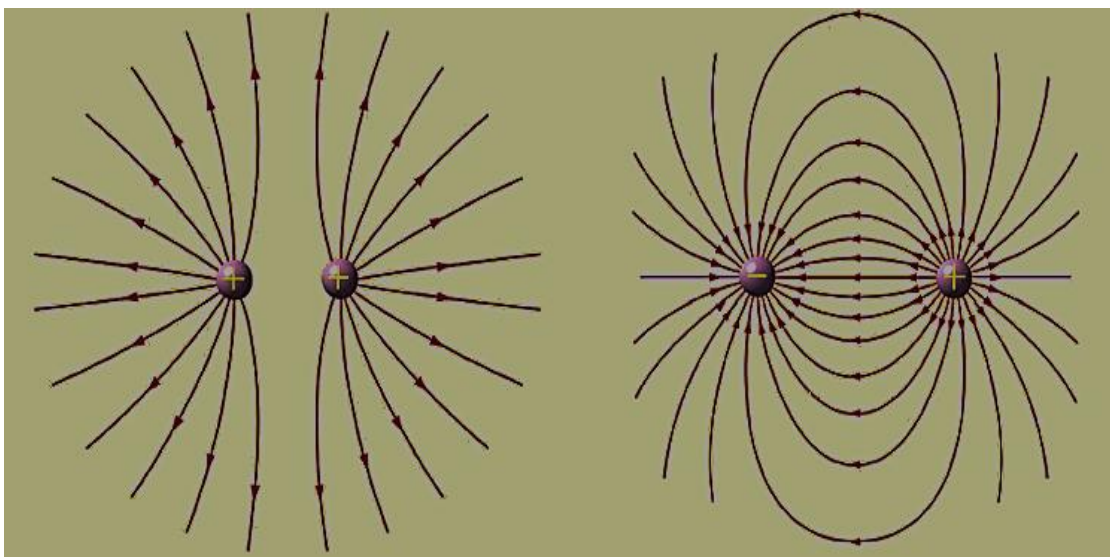


Figure II.2 champ électrique [22]

II.2.4 La force électrique

C'est la force de l'interaction électrique entre deux particules chargées électriquement. Elle est nommée d'après le physicien français Charles-Augustin Coulomb qui l'a énoncée en 1851 et elle forme la base de l'électrostatique.

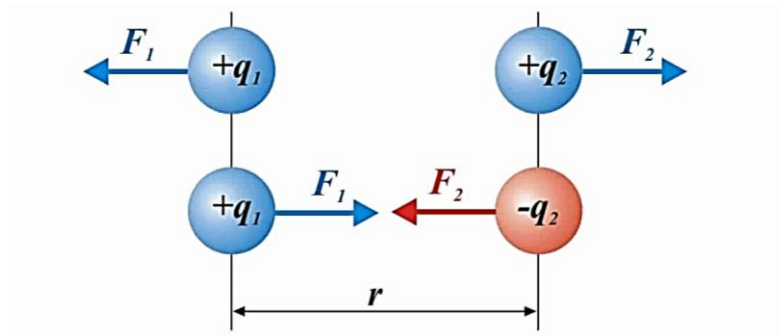


Figure II.3 : La loi de coulomb [22]

II.2.5 Loi de coulomb

$$\mathbf{F} = k \cdot (\mathbf{q}_1 \cdot \mathbf{q}_2) / r^2 \quad (\text{II.1})$$

- \mathbf{F} est la force électrique
- \mathbf{q}_1 et \mathbf{q}_2 sont les valeurs des charges
- \mathbf{r} est la distance entre les charges
- Et \mathbf{k} est une constante de proportionnalité appelée constante électrostatique

II.3 Installations de séparation électrostatique

II.3.1 Dispositifs de séparateur tribo électrostatiques

En étudiant les nombreux travaux techniques et scientifiques publiés ces dernières décennies, il est possible de constater la grande diversité des installations conçues pour la séparation tribo-électrostatique de mélanges granulaires isolants. Cependant, tous ces dispositifs ont en commun la nécessité de procéder à deux étapes successives : d'abord, le chargement triboélectrique des matériaux, puis leur séparation.

a) Séparateur tribo-électrique à tapis roulant

Un séparateur triboélectrique, communément appelé tapis roulant, est un dispositif qui sépare les particules en fonction de leurs propriétés triboélectriques. L'appareil utilise l'électricité statique pour séparer les particules par leurs différences distinctes.

Pour lancer le processus, les particules sont chargées sur un tapis roulant où elles sont ensuite frottées contre la surface du tapis. Ce frottement génère une charge électrique à la surface des particules. L'étape suivante consiste à séparer les particules en fonction de leur charge positive ou négative, différente de celle du tapis roulant.

Ensuite, un champ électrique est appliqué aux particules à l'aide d'un réseau d'électrodes. Les particules chargées sont attirées vers une électrode positive ou négative, en fonction de leur charge électrique.

Une fois que les particules sont attirées vers leur électrode respective, elles sont collectées dans des bacs ou des trémies séparées, où elles peuvent être récupérées pour une utilisation ultérieure.

Le fonctionnement de séparateur triboélectrique à tapis roulant est décrit par le schéma de la Figure II.4. [33]

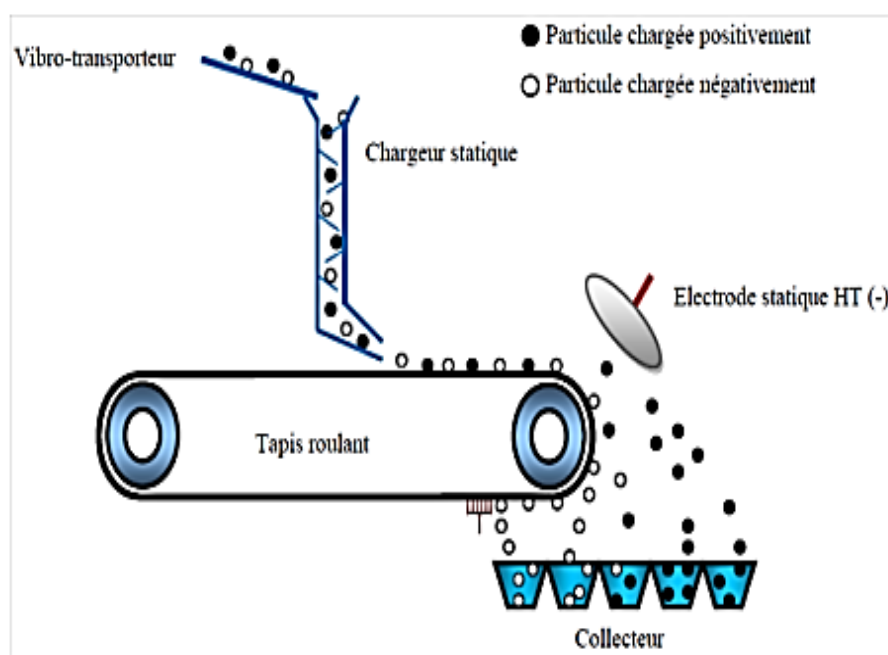


Figure II.4 : Représentation schématique d'un séparateur triboélectrique à tapis roulant [33]

b) Séparateur tribo-électrique à chute libre

Les deux illustrations représentent un séparateur électrostatique à chute libre, où les constituants d'un mélange granulaire sont chargés à l'aide d'un dispositif triboélectrique. Un produit reçoit une charge positive, tandis que l'autre est chargé négativement. Le mélange chargé tombe ensuite dans une zone inter-électrodes, où un champ électrique robuste est formé

par des électrodes haute tension de polarités opposées. Les particules chargées sont ensuite déviées et attirées vers l'électrode électriquement opposée [33].



Figure II.5: Séparateur à chute libre

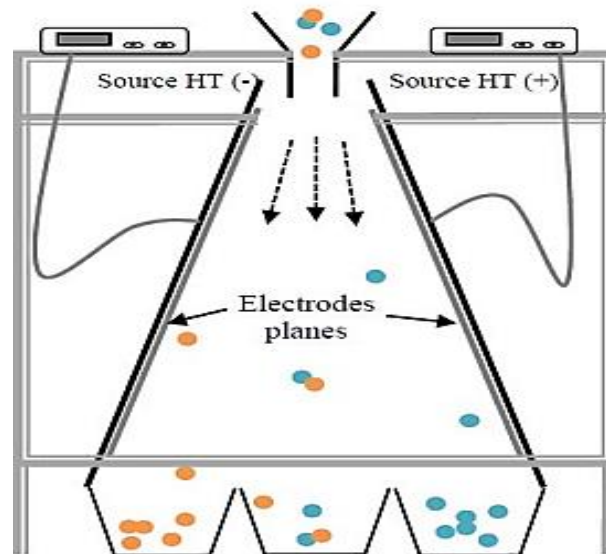


Figure II.6 : Schéma du séparateur [24]

c) Séparateur tribo-électrostatique à tambour

L'installation fonctionne en chargeant des particules et en les dirigeant vers une électrode cylindrique rotative mise à la terre. La force d'image électrique fait adhérer les particules à la surface de l'électrode. Un champ électrique est généré entre le tambour et une électrode connectée à une haute tension négative. Les particules chargées positivement sont

alors attirées vers l'électrode HT, les obligeant à modifier leur trajectoire et à atterrir dans le réservoir A. Les particules chargées négativement, en revanche, sont repoussées de l'électrode HT et restent attachées à l'électrode cylindrique. Ces particules sont retirées de l'électrode à l'aide d'un balai et recueillies dans le bac B [23].

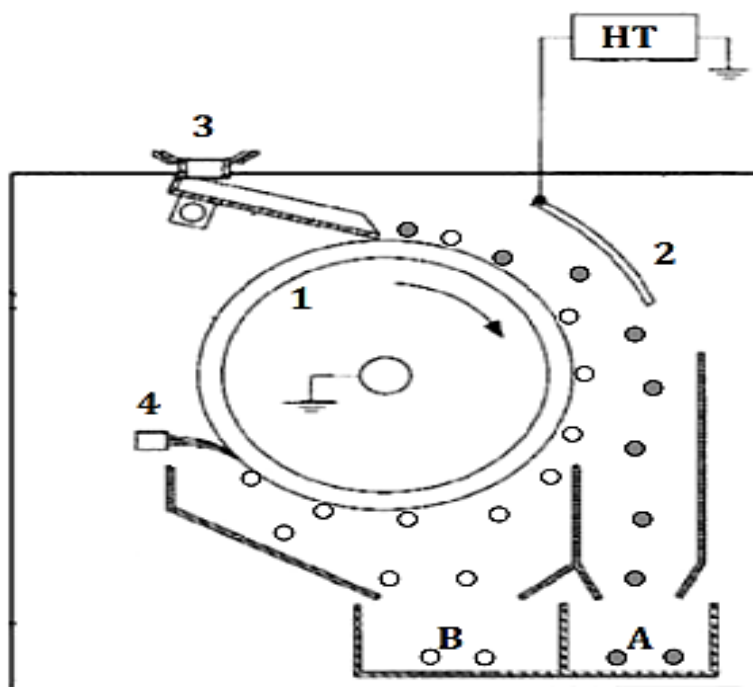


Figure II.7 : Schéma du séparateur tribo-électrostatique à tambour

(1) Electrode cylindrique reliée à la terre,
(2) Electrode HT, (3) Vibro-transporteur, (4) Brosse.

II.3.2 Séparateurs tribo-Aero-électrostatique

Dans ces séparateurs, le chargement et la séparation sont combinées en une seule opération. Les granules sont chargés et séparés simultanément.

a) Séparateur tribo-Aero-électrostatique à électrodes verticales

Cet appareil innovant exécute à la fois les fonctions de chargement et de séparation. Les granules sont chargés et séparés en même temps, ce qui offre un double avantage. La zone active du séparateur retient les particules moins chargées jusqu'à ce qu'elles acquièrent une charge adéquate pour conduire les forces électriques à l'électrode de polarité opposée. C'est une solution avantageuse [33].

Enfermé dans un isolateur rectangulaire, le dispositif comporte deux électrodes verticales reliées à des alimentations CC haute tension de polarités opposées. Pour réaliser la

fluidisation, un ventilateur à vitesse variable injecte de l'air. Les électrodes attirent les particules de charges opposées et dévient celles de charges identiques vers les collecteurs. [31].

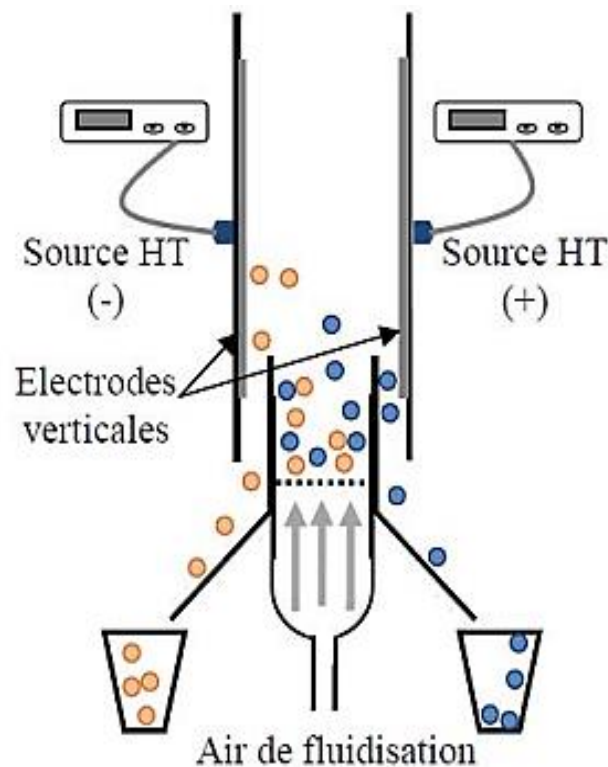


Figure II.8: Schéma du séparateur tribo-Aero-électrostatique à électrodes verticales [24]

b) Séparateur tribo-Aero-électrostatique à disques tournants

C'est une installation adaptée particulièrement à la séparation des particules fines de plastique. Deux disques métalliques sont montés sur le même arbre (Figure II.9), entraîné par un moteur électrique, afin de les tourner dans un mélange de particules fluidisé. Les deux disques qui sont alimentés par deux sources de haute tension de polarités opposées, soulèvent les particules chargées. Des balais sont utilisés pour récupérer les particules collées aux disques [33,24, 25].

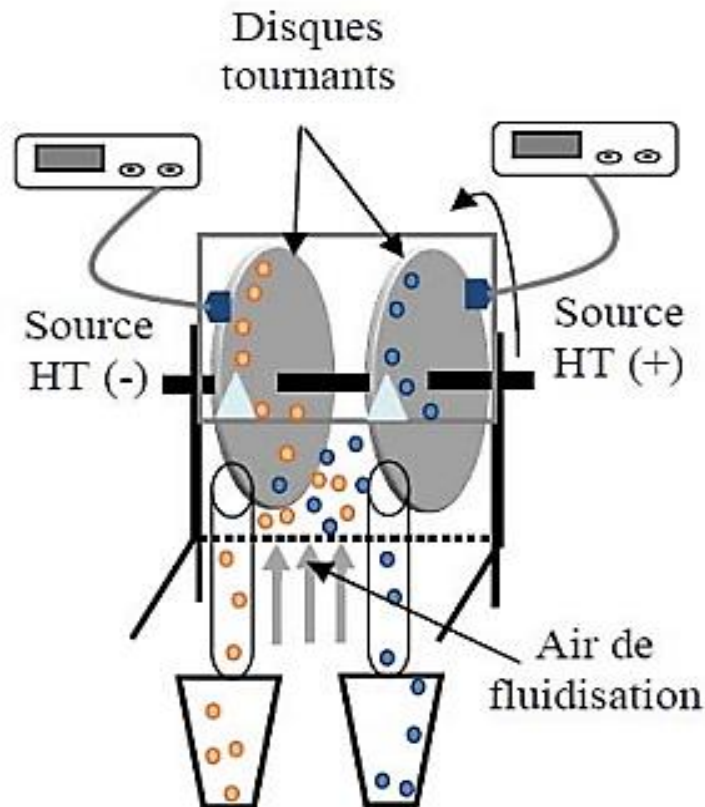


Figure II.9: Représentation schématique d'un séparateur tribo-Aéro-électrostatique à disques tournants [24].

c) Séparateur tribo-Aéro-électrostatique à deux bandes transporteuses

Dans un modèle de laboratoire du séparateur tribo-Aéro-électrostatique, des matériaux isolants granulaires sont combinés et introduits. Un diffuseur et un filtre sont utilisés pour l'admission et l'évacuation de l'air comprimé, qui est utilisé avec un gradient de pression négatif dans une direction verticale. Ces granules, une fois à l'intérieur de la chambre de séparation, forment un lit fluidisé.

Pour optimiser l'électrification des granules par effet tribo-électrique, le débit d'air de fluidisation est régulé par un régulateur de pression. Ceci assure le fonctionnement du lit fluidisé en régime d'ébullition, favorisant les collisions entre granules. La force de Coulomb propulse ensuite chaque granule chargé positivement ou négativement dans le champ électrique horizontal entre deux électrodes métalliques de type tapis roulant. Ces électrodes reçoivent une haute tension continue et réglable des générateurs, attirant les granules de charge opposée. En conséquence, les granules adhèrent aux surfaces des électrodes et sont collectés par le collecteur de produit [26].

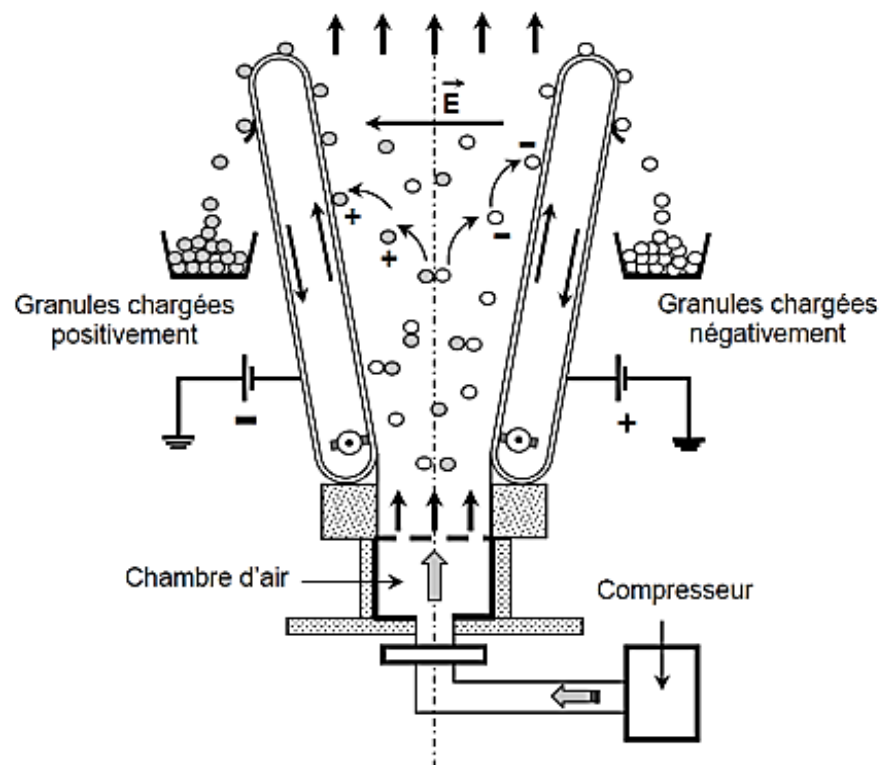


Figure II.10: Représentation schématique d'un séparateur tribo-Aéro-électrostatique à deux bandes transporteuses [26]

d) Séparateur tribo-Aéro-électrostatique à deux étages

L'installation est composée de deux étages superposés, détachables, attachés à un même support vertical (Figure II.11). Le séparateur tribo-Aéro-électrostatique, situé à l'étage supérieur, est une enceinte parallélépipédique. Les parois latérales, opaques, ont des électrodes en aluminium collées sur leurs surfaces internes. Ces électrodes sont connectées à deux alimentations haute tension continue variable de polarités différentes, afin de créer un champ électrique suffisamment fort pour attirer les granules chargés et contrôler ainsi leurs trajectoires. La charge des granules se produit par effet triboélectrique dans le lit fluidisé créé à l'intérieur de cette enceinte. L'air de fluidisation est fourni par une soufflante à débit variable.

Le diffuseur d'air (une plaque perforée située à l'extrémité inférieure de l'étage supérieur de l'installation) assure l'uniformité de la fluidisation du lit de granules. Ceux-ci sont introduits dans l'enceinte de séparation par un entonnoir, alimenté par un vibro transporteur à débit ajustable. Sous l'action combinée des forces électriques, aérodynamiques et gravitationnelles, ils se séparent essentiellement en fonction de la polarité de leur charge et sortent par le bas de

cette enceinte. Deux chambres dirigent les deux flux de granules ainsi créés vers l'étage inférieur de l'installation, composé de deux séparateurs électrostatiques à chute libre. Les électrodes de ces séparateurs sont collées sur quatre plaques isolantes en plexiglas. Les deux plaques centrales sont connectées à la terre, tandis que les deux électrodes extérieures, connectées à des alimentations haute tension de polarités opposées. La récupération des produits séparés est faite dans deux collecteurs identiques, comportant chacun dix compartiments [28,27].

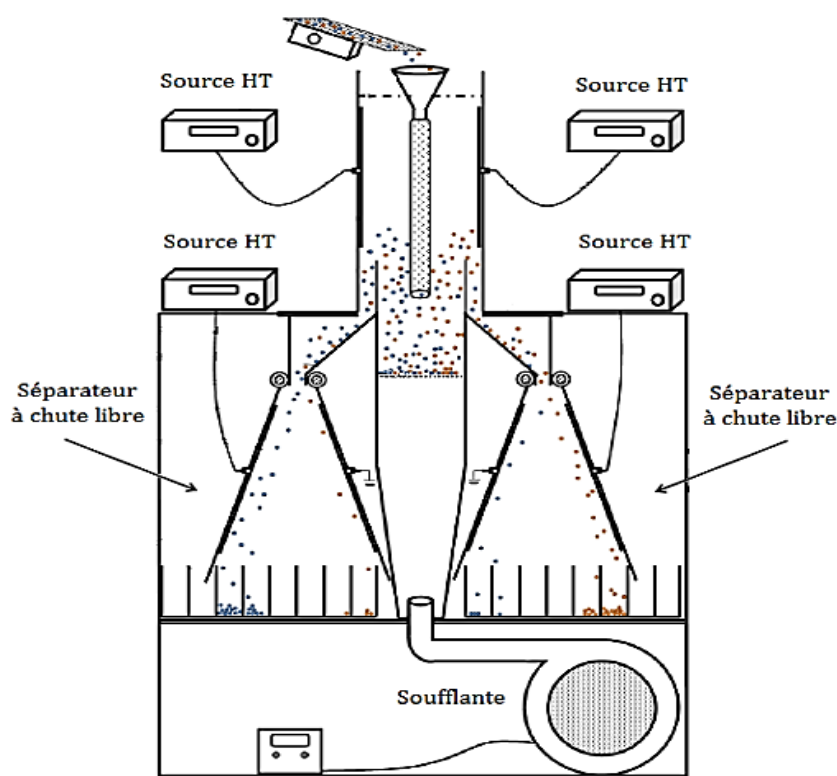


Figure II.11 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-Aero-électrostatique à deux étages [29]

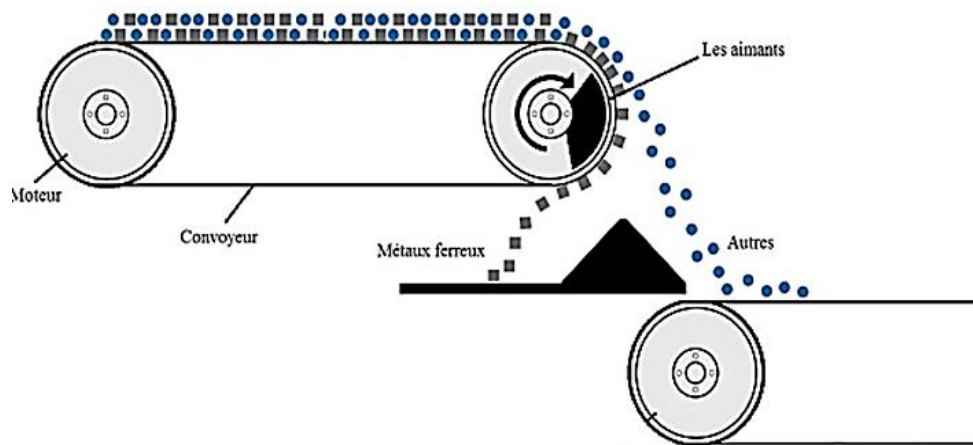
II.3.3 La séparation magnétique

On utilise la séparation magnétique lorsqu'il faut séparer des métaux ferreux d'autres matériaux. Le procédé repose sur l'utilisation d'aimants permanents et d'électro-aimants. Le séparateur est composé d'un segment magnétique (des aimants) immobile autour duquel tourne un rouleau en acier inoxydable. L'aimant attire les particules de métal ferromagnétiques, les particules métalliques capturées vont emporter vers le dessous du tambour jusqu'à ce qu'elles soient en dehors du champ magnétique [30].

La séparation magnétique comporte certaines limitations. Elle ne peut séparer le fer et l'acier du nickel ou des aciers inoxydables magnétiques. En outre, les pièces composites qui contiennent du fer sont collectées et peuvent alors contaminer la fonte. On peut utiliser le triage à la main conjointement avec la séparation magnétique pour éviter que cela se produise.

Principaux avantages :

- Augmentation du degré d'élimination du fer ;
- Purification matière très fine ;
- Systèmes à très faible encombrement idéals ;
- Pour des installations où des séparateurs classiques ne peuvent être installés faute d'espace [30].



Figurai.12:La séparation magnétique

II.3.3.1 Le tambour : un organe de forme cylindrique pour entraîner le tapis. Ce tambour est relié avec une poulie de courroie pour la transmission de rotation du moteur.

II.3.3.2 Le tambour magnétique : est le tambour positionné à la fin du séparateur et équipé par un ensemble d'aimants à l'intérieur pour qu'il sépare de manière continue les particules ferromagnétiques à partir du flux de la matière.

II.3.3.3 Le tapis : le tapis est le dispositif de transport permettant le déplacement continu de la matière, elle est constituée essentiellement d'une bande en matière souple entraînée par un tambour motorisé.

II.3.3.4 La courroie : est l'organe responsable de la transmission du mouvement à partir du moteur vers le tambour récepteur pour faire tourner le tapis, la courroie présente une grande souplesse de conception.

II.3.3.5 Le châssis : le châssis ou la table joue le rôle du support pour les tambours du convoyeur, les moteurs et les bacs de tri. Dans le séparateur magnétique le bac est placé au-dessous de la table car les particules vont tomber lorsqu'ils seront loin du champ magnétique [32].

II.4 Application des Courants de Foucault

On appelle courant de Foucault le courant créé par le déplacement ou le changement du champ magnétique (courant d'induction) dans une masse métallique. Lorsqu'un conducteur (cuivre, fer, etc.) subit des variations de flux magnétique soit parce que ce conducteur est en mouvement relatif par rapport au champ, soit parce que le champ est variable avec le temps il apparaît une f.é.m. d'induction au sein du conducteur. Cette f.é.m. met en mouvement les électrons mobiles du conducteur créant ainsi un courant électrique que l'on désigne par « courant de Foucault ». L'intensité du courant est proportionnelle à la variation du flux magnétique en fonction du temps.

Les courants de Foucault ont des parcours compliqués au sein de la matière où aucun fil ne les guide. On sait toutefois qu'ils forment des lacets et des boucles, d'où leur autre nom de « courants tourbillonnaires ». Les courants de Foucault se manifestent chaque fois qu'un matériau conducteur est en mouvement relatif au sein d'un champ magnétique : ils sont induits par le déplacement. Nombre de dispositifs industriels utilisent cette induction pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique, puis éventuellement en chaleur.

Tous exploitent le principe que Léon Foucault mit en œuvre dans une expérience de 1855 lorsqu'il fait tourner un disque de cuivre dans l'entrefer d'un aimant. Puisqu'il y a mouvement relatif conducteur champ, il y a variation de flux magnétique. Par conséquent un tel disque est parcouru de courants de Foucault. Ces courants induits chauffent la matière qu'ils traversent par effet Joule, car les électrons qui les composent choquent sans cesse les autres charges électriques présentes dans le matériau et leur transfèrent une partie de leur énergie, qui est ainsi transformée en chaleur. Cette énergie provient de la seule source d'énergie présente : l'opérateur actionnant le disque. C'est pourquoi Foucault peinait à actionner la manivelle ! Si le mouvement de rotation n'est pas entretenu, toute l'énergie mécanique initiale du disque se transforme en chaleur, et le disque arrête de tourner [34].

II.5 Théorème et lois fondamentales du magnétisme [35]

II.5.1 Champ et induction magnétique

Si une charge électrique q est en mouvement avec une vitesse $\mathbf{V_D}$ elle va créer un **champ magnétique \mathbf{H}** , auquel correspond une **induction magnétique \mathbf{B}** :

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (\mathbf{H} \text{ en A.m, } \mathbf{B} \text{ en Tesla}) \quad (\text{II.2})$$

μ : est une autre caractéristique du milieu : sa **perméabilité magnétique**.

Pour le vide, et, en pratique, pour l'air : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$

Si la charge q arrive dans ce champ magnétique avec une vitesse $\mathbf{V_D}$, elle se trouve soumise à une force dirigée perpendiculairement à $\mathbf{V_D}$ et à \mathbf{B} suivant la règle dite des trois doigts ou du bonhomme d'Ampère :

$$\mathbf{F} = q \mathbf{V_D} \mathbf{B} \quad (\text{II.3})$$

Cette loi porte le nom de force de Lorentz

II.5.2 Loi de Faraday-Lenz

Tout circuit soumis à une variation de flux, voit apparaître une force électromotrice (tension) et elle que :

$$\mathbf{e} = -d\Phi/dt \quad (\text{II.4})$$

Où Φ : est le flux total du champ magnétique à travers le circuit.

Le sens du courant induit est tel que le champ magnétique qu'il crée tend à s'opposer à la variation du flux qui lui a donné naissance

II.5.3 Les Courants de Foucault

Si nous avons un courant alternatif $\mathbf{I(t)}$ parcourant un solénoïde de longueur \mathbf{l} comportant \mathbf{N} spires, ce courant donne naissance à une induction magnétique en son centre :

$$\mathbf{B}_0 = \mu_0 \frac{N}{l} \mathbf{I(t)} \quad (\text{II.5})$$

Si on place un cylindre métallique de perméabilité magnétique $\mathbf{\mu_r}$ et de résistance \mathbf{R} suivant l'axe du solénoïde, on a :

$$\mathbf{B}_0 = \mu_0 \mu_r \frac{N}{l} \mathbf{I(t)} \quad (\text{II.6})$$

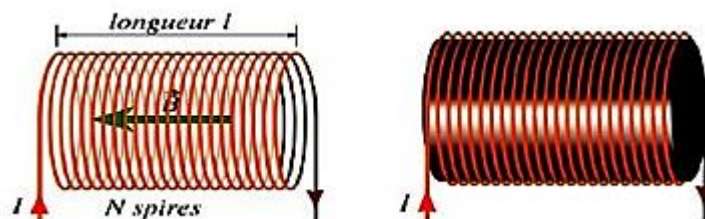


Figure II.13: Champ magnétique créée par un courant

Cette magnétique variable provoque une variation du flux :

$$\Phi = NBS \quad (\text{II.7})$$

La loi de Lenz dit qu'un fém. apparaît où $\mathcal{E} = -d\Phi/d(t)$ qui entraîne le passage de courants induits $I(t)$ i d'intensité :

$$I(t) = \mathcal{E}/R \quad (\text{II.8})$$

Ces courants sont appelés courants de Foucault. Ils créent un champ magnétique qui s'oppose au champ magnétique inducteur. D'où a un instant donné :



Ces courants sont concentrés sur la surface et provoquent un chauffage superficiel de la pièce : c'est le principe de chauffage par induction.

II.6 Propriétés et comportement électromagnétique des matériaux [36]

II.6.1 Propriétés magnétiques

Les propriétés magnétiques d'un matériau Sont attribuables au spin des électrons et au moment orbital autour du noyau. Une charge électrique en mouvement engendre un champ magnétique autour d'elle même, les électrons qui tournent sur eux-mêmes (spin) et autour du noyau (orbite) forment de petits dipôles magnétiques. Ces dipôles peuvent réagir à l'application d'un champ magnétique extérieur.

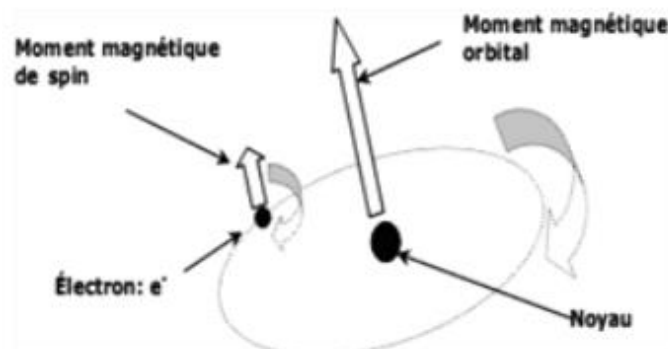


Figure II.14: Moments magnétiques atomiques orbital et de spin.

La réponse d'un matériau à l'application d'un champ magnétique extérieur H est caractérisée par l'induction magnétique B , laquelle représente l'intensité du champ magnétique à l'intérieur du matériau. Dans le vide, le champ d'induction B et H sont colinéaires et liés par la relation :

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (\text{II.9})$$

Avec μ_0 la perméabilité magnétique du vide.

Au sein d'un matériau aimanté, le champ d'excitation \mathbf{H} est toujours donnée par le théorème d'Ampère. Sous le champ d'excitation, il va se produire une influence du milieu qui va se superposer au champ d'excitation pour produire le champ d'induction.

On définit cette réaction à l'aide du vecteur d'aimantation \mathbf{M} :

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M} \quad (\text{II.10})$$

Cette aimantation M est proportionnelle au champ d'excitation et peut se mettre sous la forme

$$\mathbf{M} = \mathbf{X} \mathbf{H} \quad (\text{II.11})$$

Où \mathbf{X} est la susceptibilité magnétique du matériau. Ainsi, le champ d'induction résultant peut s'écrire sous la forme,

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (\text{II.12})$$

Avec μ_r la perméabilité relative du matériau et $\mu_r = 1 + \mathbf{X}$

a) Matériaux diamagnétiques

Le milieu diamagnétique est caractérisé par une susceptibilité magnétique relative \mathbf{X} faible de valeur négative (de l'ordre de -10^{-9} à -10^{-5}). Le champ d'aimantation \mathbf{M} est donc pratiquement nul. \mathbf{H} et \mathbf{M} sont de sens contraire. Ce type de matériau ne présente pas d'intérêt du point de vue magnétique.

Tableau II.1: Susceptibilité des matériaux diamagnétique.

Matériau	Susceptibilité χ
Hydrogène (1 atm.)	$-2.1 \cdot 10^{-9}$
Azote (1 atm)	$-5.0 \cdot 10^{-9}$
Sodium	$-2.4 \cdot 10^{-6}$
Silicium (Si)	$-1.2 \cdot 10^{-6}$
Cuivre (Cu)	$-1.08 \cdot 10^{-6}$
Plomb (Pb)	$-1.4 \cdot 10^{-6}$
Bismuth	$-1.7 \cdot 10^{-5}$
Diamant	$-2.2 \cdot 10^{-5}$

b) Matériaux paramagnétiques

Le paramagnétisme est caractérisé par une susceptibilité relative χ positive de faible valeur (de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-6}). \mathbf{H} et \mathbf{M} sont de sens identique. La polarisation qui résulte d'un champ magnétique est négligeable.

Tableau II.2 : Susceptibilité des matériaux paramagnétique.

Matériau	Susceptibilité χ
Magnésium	$1.2 \cdot 10^{-5}$
Aluminium (Al)	$3 \cdot 10^{-5}$
Tungstène (W)	$6.8 \cdot 10^{-6}$
Titane	$7.1 \cdot 10^{-5}$
Platine (Pt)	$3.0 \cdot 10^{-4}$
Oxygène (1 atm.)	$2.1 \cdot 10^{-6}$

c) Matériaux ferromagnétiques

Les substances ferromagnétiques possèdent un fort moment magnétique. Les moments magnétiques de leurs atomes sont ordonnés en petites zones uniformément magnétisées, appelées domaines de Weiss. En l'absence d'un champ magnétique extérieur, chaque domaine présente une orientation aléatoire. En revanche il suffit d'appliquer un champ magnétique faible pour réorganiser ces moments et les orienter tous dans le sens de l'induction créée par le champ. Si l'on supprime le champ extérieur, le matériau reste aimanté dans la direction et le sens du champ précédemment appliqué.

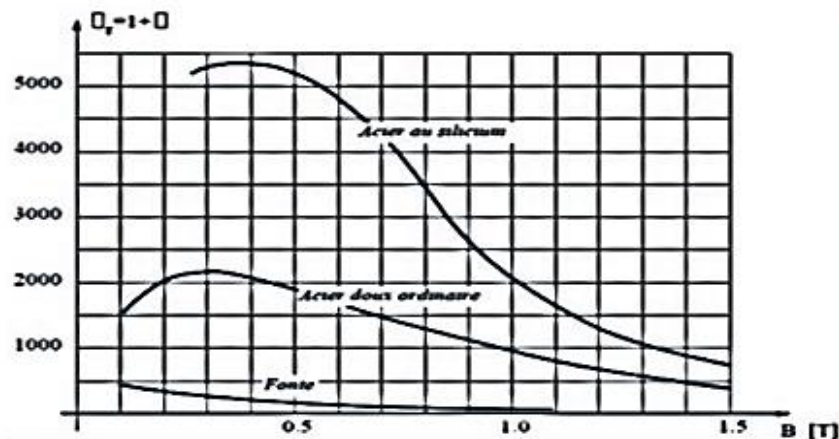


Figure II.15: Perméabilité relative U_r en fonction de \mathbf{B} pour trois matériaux courants

Il est à noter que la valeur de la susceptibilité χ dépend à la fois de la température mais surtout de la valeur du champ d'excitation qui est appliquée au matériau. Cela implique que la relation entre \mathbf{B} et \mathbf{H} peut non linéaire $\mathbf{B} = \mu(\mathbf{H}) \cdot \mathbf{H}$

d) Matériaux ferrimagnétiques

Sa structure cristalline est composée de deux structures de réseaux ayant des moments de modules différents et avec des orientations antiparallèles. Aussi, ce matériau présente une aimantation globale non nulle même en l'absence d'un champ magnétique extérieur.

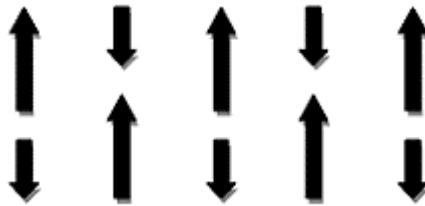


Figure II.16 : Schématisation de la structure en domaines d'un matériau ferrimagnétique

e) Matériaux antiferromagnétiques

Dans ce genre de matériaux, les atomes ont un moment magnétique permanent. Cependant les moments atomiques ont un couplage antiparallèle, ce qui donne une aimantation globale nulle en l'absence du champ extérieur. L'augmentation de la température favorise l'aimantation en fragilisant le couplage entre les moments magnétiques, mais à partir d'une certaine température dite de Néel, l'agitation thermique annule le couplage entre les moments, d'où un comportement paramagnétique de ce matériau à partir de cette température.

II.7 Séparation par courants Foucault

Un séparateur à courant de Foucault est une machine de tri employée pour séparer l'emballage métalliques non-ferreux (aluminium, zinc, cuivre,) des autres emballages, y compris ceux ferromagnétique [37].



Figure II.17: Séparateur à courant de Foucault

Les courants de Foucault – Eddy current en anglais – sont les courants créés par un champ magnétique alternatif, sur un matériau conducteur de courant. Toute variation de flux magnétique traversant une masse métallique produit des courants de Foucault. Ces courants électriques peuvent être induits volontairement ou non.

Dans le cas d'un champ magnétique variable dans une plaque de métal – ferreux ou non ferreux – le phénomène est naturel. En revanche, le champ magnétique est induit artificiellement en présence du champ variable d'une bobine électrique. Ces courants créent un effet Joule et provoquent un échauffement de la masse conduisant le courant. Ils peuvent également être utilisés comme force de freinage lorsqu'ils provoquent l'apparition de forces de Laplace, si la variation de flux résulte d'un déplacement du milieu devant un champ magnétique constant.

II.7.1 L'usage du séparateur à courants de Foucault

Globalement, le séparateur de métaux non ferreux sert à recycler des matériaux très divers comme le verre, plastique, caoutchouc, sable en fonderies d'aluminium, câbles broyés, lignes de broyage d'automobiles, ordures ménagères, mâchefers...

Il peut également retirer des particules ferreuses ou faiblement magnétiques, comme par exemple dans l'inox, le verre armé, etc. Voici quelques exemples de traitements :

- Traitement du bois façonné et des meubles : extraction des charnières en cuivre, des clous, vis, poignées, etc. ;
- Récupération des huisseries, poignées et mécanismes de fermeture des portes et fenêtres ;
- Tri des métaux non-ferreux dans les résidus après incinération des déchets ;
- Traitement des ordures ménagères et récupération des parties métalliques, provenant du matériel électronique et des canettes, entre autres ;
- Élimination des éléments non ferreux du verre broyé, plastique, polyéthylène, PVC, caoutchouc, etc.
- Séparation des capsules en aluminium dans l'industrie du recyclage du verre ou de Nespresso ;
- Recyclage des carcasses automobiles et récupération de l'aluminium et de ses dérivés dans les broyats [38]

II.7.2 Fonctionnement de séparateur [38]

Les résidus à traiter sont préalablement concassés. La plupart du temps, ils contiennent encore des particules de fer qu'il convient d'éliminer, avant le passage dans le séparateur à courants de Foucault. À cette fin, ils sont traités par une machine Over band ou un tambour magnétique, qui va attirer les particules d'acier, et les évacuer.

C'est ensuite qu'intervient le séparateur à courant de Foucault qui permet de séparer les métaux non ferreux de toute autre matière.

Le séparateur à courant de Foucault a pour fonction d'acheminer les matières à traiter en vrac sur sa bande de transport. L'appareil est pourvu en bout d'un tambour rotatif magnétique multipolaire, muni d'aimants permanents néodyme à haute rémanence. Le tout étant entraîné à vitesse élevée, le champ magnétique induit des courants de Foucault dans les métaux non ferreux conducteurs.

Ces courants créent leur propre champ magnétique qui va s'opposer à celui de la roue polaire. Ainsi, les résidus inertes poursuivent leur cheminement sur la bande de transport à tasseaux, alors que les résidus non ferreux sont catapultés par la force de répulsion et recueillis dans un réceptacle à part. Un déflecteur est placé à cet endroit pour séparer les deux trajectoires. Il est réglable en fonction des pièces et matériaux à traiter.

En d'autres termes, les métaux non ferreux, parcourus par un courant électrique, deviennent le temps d'une fraction de seconde, des électro-aimants avec leur propre force électromagnétique. C'est la raison pour laquelle les métaux non ferreux, grâce à la vitesse de la bande du convoyeur qui les transporte, combinée à la répulsion magnétique, empruntent une trajectoire différente des résidus inertes.

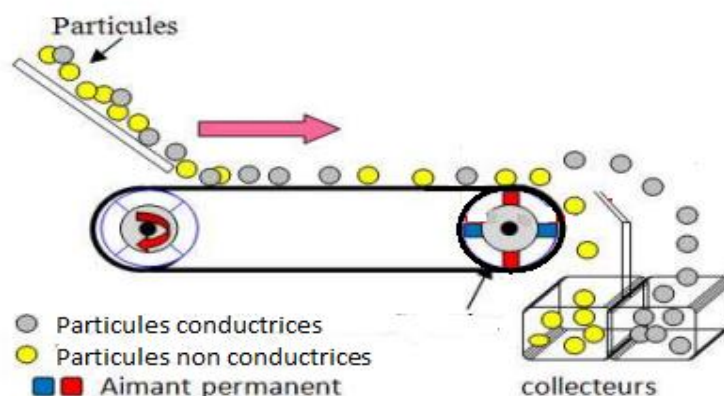


Figure II.18 Séparation des différentes particules avec un séparateur à courants de Foucault [39]

II.8 Conclusion

En conclusion, les séparateurs électrostatiques jouent un rôle essentiel dans le traitement et le recyclage des déchets électriques et électroniques. Leur utilisation permet de séparer efficacement les différents composants de ces déchets en fonction de leurs propriétés électrostatiques, ce qui facilite la récupération de matériaux précieux et favorise le recyclage des ressources.

Les séparateurs électrostatiques offrent plusieurs avantages, tels que la possibilité de récupérer des métaux précieux, des plastiques de haute qualité et des composants électroniques réutilisables. De plus, ils sont respectueux de l'environnement, car ils ne nécessitent pas l'utilisation de produits chimiques ou de substances dangereuses.

CHAPITRE III :
Étude expérimentale d'un séparateur
semi-industriel pour le traitement des
DEE

CHAPITRE III Étude expérimentale d'un séparateur semi-industriel pour le traitement des DEE

III.1 Introduction

La séparation basée sur les courants de Foucault représente une méthode hautement efficace pour extraire des métaux non ferreux tels que l'aluminium et le cuivre à partir de déchets industriels ou municipaux.

Dans ce chapitre, nous présenterons la procédure expérimentale pour la séparation des déchets provenant d'équipements électriques et électroniques en utilisant un séparateur électrostatique à courants de Foucault. Le séparateur utilisé est un dispositif fondamental pour la séparation, qui exploite les forces gravitationnelles et électriques de manière conjointe pour séparer les déchets issus d'équipements électriques et électroniques.

III.2 Description du dispositif

Le séparateur magnétique à tambour rotatif pèse environ 350 kg et de dimensions 180cm*50cm*120cm. Il est constitué d'une structure à quatre pivots supportant un panneau électrique triphasé, un tambour rotatif magnétique à huit pôles entraînés par un moteur électrique triphasé à l'aide d'une courroie.

Le dispositif comprend aussi un autre moteur électrique monophasé, type motoréducteur, qui sert à entraîner le tapis convoyeur pour transporter le mélange de particules à séparer. Ces derniers sont propulsés pour être récupérés dans un collecteur situé au bord du séparateur.

Pratiquement la conception de notre système de séparation est basée sur l'optimisation de la configuration suivante :

- Alimentation variable triphasée.
- Un moteur électrique triphasé.
- Un convoyeur transporteur de particule.
- Un moteur réducteur pour l'entraînement du convoyeur.
- Un châssis en acier dur qui porte le système.
- Collecteur réservé aux différents types de particules à récupérer.
- Tambour rotatif à aimants permanents.

a) Alimentation

La figure III.1 ci-dessous présente le panneau de commande de la source triphasée utilisée, qui est une source de tension variable servant à alimenter les deux moteurs électriques en même temps, et assurer la protection du de tous les risques.



Figure III.1 : Photographie d'une alimentation PSY-90K-2.

b) Moteur d'entraînement

Un moteur triphasé d'une puissance de 5.5 kW est monté sur un châssis utilisé pour l'entraînement du tambour rotatif. La transmission du mouvement mécanique du moteur électrique au réacteur magnétique est effectuée par une courroie trapézoïdale avec deux poulies de modèles : une poulie simple est fixée sur le moteur électrique triphasé et la deuxième est une poulie à roue mobile placée sur le tambour rotatif.

Ce type de montage permet de varier la vitesse du réacteur indépendamment de la vitesse du tapis du convoyeur, celui-ci peut atteindre une vitesse de 3000 tr/min, pour obtenir une grande fréquence d'alternance des pôles magnétiques et ainsi augmenter l'induction de courant de Foucault.

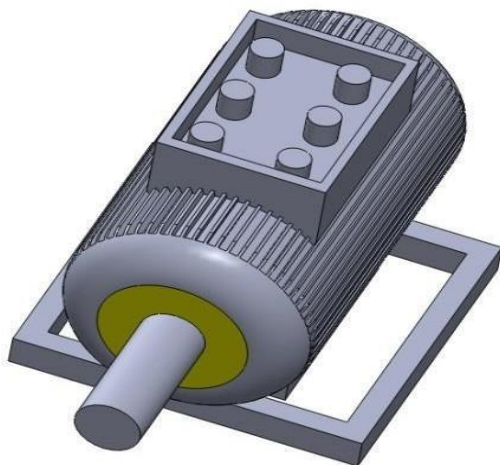


Figure III.2 : Photographie d'un moteur triphasé d'entrainement.

c) Support de base

Le système repose sur un châssis métallique à quatre pivots portant les moteurs d'entrainements et la bande transporteuse. Cette dernière est posée sur des rouleaux de renvoi logés entre les deux brins de la bande, fixés sur les deux extrémités du châssis métallique. Le bâti de la bande est muni de deux tendeurs positionnés aux deux extrémités du châssis permettant d'ajuster le tapis convoyeur lors du fonctionnement. Ce dernier est entrainé par un motoréducteur de petite vitesse placé sur la partie transversale du tapis. Une poutre traversant le châssis latéralement portant au centre un moteur asynchrone triphasé, permet ainsi d'assurer une stabilité du système.

Pour réduire les contraintes mécaniques du châssis lorsqu'il est en vibration sous l'effet de la grande vitesse de rotation du tambour à aimants, nous avons assuré l'équilibre de l'ensemble châssis-rotor-rouleau par un contre poids.

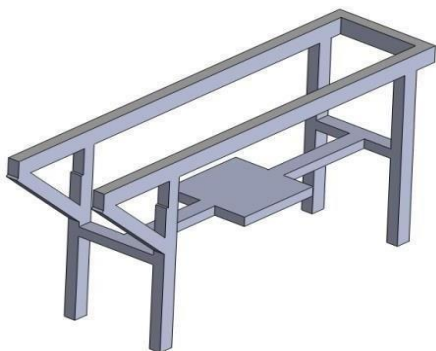


Figure III.3: Photographie du support de base

d) Convoyeur transporteur (Tapis roulant)

Le convoyeur est un dispositif de transport ou de manutention appelé également convoyeur à bande ou bande transporteuse, permettant le déplacement continu de particules à séparer.

Il est constitué d'une bande sans fin en matériau souple non magnétique d'une épaisseur très faible pour ne pas affecter de manière appréciable les performances du tambour rotatif. A cause de sa faible épaisseur, cette bande s'use et se détériore rapidement et il est nécessaire de la changer fréquemment.

La bande est entraînée et supportée par des poulies fixées sur le support du châssis, elle comporte un brin inférieur et un brin supérieur, qui supporte et entraîne les particules en vue de la séparation.

Le dispositif pour tendre la bande est constitué par deux tendeurs mécaniques fixés en parallèle sur le support de base aptes à exercer sur les deux extrémités du rouleau de renvoi des forces égales, tendant à écarter celui-ci du rotor [40].

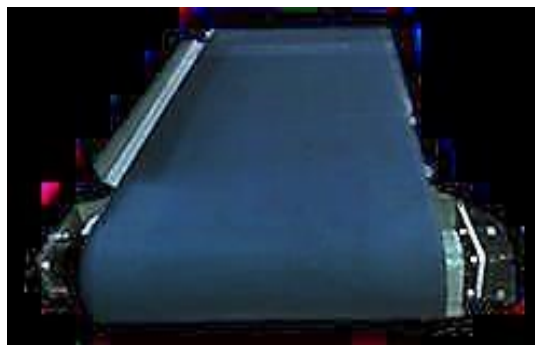


Figure III.4: Photographie du convoyeur transporteur.

e) Collecteur de récupération

C'est la dernière étape de la séparation, sa position est en aval du séparateur. Il se compose de compartiments identiques pour analyser les performances de séparation.

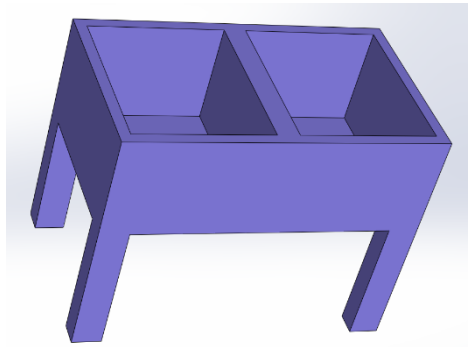


Figure III.5: Photographie du collecteur

f) Tambour rotatif

Le tambour rotatif est un rotor magnétique multipolaire en acier dur (Figure III.6), qui est entraîné à grande vitesse, de manière à générer un champ magnétique alternatif qui tourne beaucoup plus vite que le tambour de convoyeur. Le mélange est balayé par ce champ magnétique variable qui induit des courants de Foucault dans les particules conductrices du mélange.

Les particules les plus conductrices sont le siège des courants de Foucault plus intenses et font l'objet de l'éjection la plus importante, si bien que leurs trajectoires de sortie sont les plus déviées dans le sens de rotation de tapis. Les particules pas ou peu conductrices chutent de la bande convoyeuse sans s'écarter beaucoup de celle-ci [41].

Le rotor magnétique doit être le plus près de la bande convoyeuse et donc du tambour de tapis, alors qu'il tourne à une vitesse bien plus élevée que ce tambour de tapis.



Figure III.6: Photographie tambour à aimants permanents logé dans un cylindre creux.

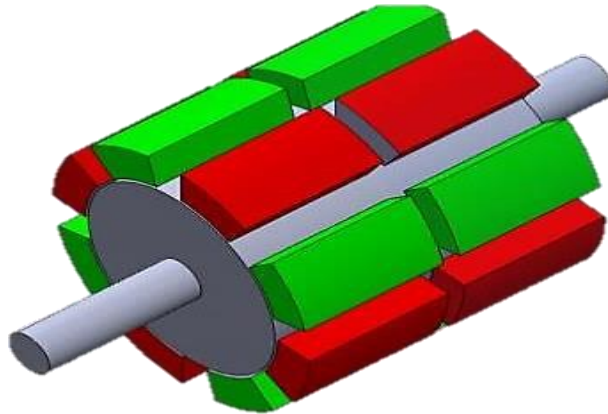


Figure III.7: Photographie 3D du tambour à aimants permanents.

III.3 Mélange utilisé dans les essais expérimentaux

Les expériences ont été effectuées en utilisant le mélange granulaire provenant d'une carte électronique d'un téléviseur à tube cathodique concasser et broyer après tamiser avec un tamis de 1mm. La photographie montre le mélange quand vas utiliser dans tous les essais qui vont suivre.



Figure III. 8 : Photographie du mélange granulaire

III.4 Broyeur



Figure III.9 : Le Broyeur

Afin de recycler les cartes électroniques des téléviseurs à tube cathodique, c'est nécessaire de les broyer dans un broyeur de type BM400 qui est une machine ou appareil dont la fonction de concasser et de réduire la taille des particules (Grains) [42].

III.5 Tamiseur

Des échantillons de granules de métal et de plastique de différentes tailles granulométriques ont été préparés à l'aide d'un tamiseur (Fritsch). Le tamiseur possède une large gamme de tamis de mailles de tailles différentes (Figure III.10).



Figure III.10 : Photographie du tamiseur FRITSCH

III.6 Spectrométrie de fluorescence X

Des essais préliminaires ont été effectués pour tester la performance du séparateur à courant de Foucault pour le mélange granulaire provenant des cartes électroniques des téléviseurs à tube cathodiques broyer et tamiser.

La vitesse de rotation du séparateur est fixée à (600 tr/min) pour une masse de 300 g du mélange à séparer. On a prélevé les particules séparées et récupérées des deux extrémités du collecteur afin de les analyser et déterminer leur composition avec exactitude.

a) Spectromètre à Micro fluorescence X compact de type M4 TORNADO

Pour les analyses on a utilisé la microscopie de fluorescence X. La spectrométrie de fluorescence X est une technique d'analyse élémentaire globale permettant d'identifier et de déterminer la plupart des éléments chimiques qui composent un échantillon. Cette technique peut être utilisée pour des matériaux très variés : minéraux, céramiques, ciments, métaux, huiles, eau, verres... sous forme solide ou liquide.

Elle permet l'analyse de tous les éléments chimiques du Béryllium (Be) à l'Uranium (U) dans des gammes de concentration allant de quelques ppm à 100%, avec des résultats précis et surtout reproductibles.



Figure III.11 : Spectromètre à Micro fluorescence X compact de type M4 TORNADO

Le M4 TORNADO est l'outil de choix pour la caractérisation d'échantillons à l'aide de micro fluorescence de rayons X à petits points. Ses mesures donnent des informations sur la composition et la distribution des éléments, même sous la surface. Le spectromètre microXRF de Bruker est optimisé pour les analyses à grande vitesse de points, de lignes et de balayages de zone 2D (cartographie d'éléments) de tout type d'échantillon ; qu'il soit organique, inorganique ou liquide.

b) Principe de fonctionnement

L'échantillon à analyser est placé sous un faisceau de rayons X. Sous l'effet de ces rayons X, les atomes constituant l'échantillon passent de leur état fondamental à un état excité. L'état excité est instable, les atomes tendent alors à revenir à l'état fondamental en libérant de l'énergie, sous forme de photons X notamment. Chaque atome, ayant une configuration électronique propre, va émettre des photons d'énergie et de longueur d'onde propres. C'est le phénomène de fluorescence X qui est une émission secondaire de rayons X, caractéristiques des atomes qui constituent l'échantillon. L'analyse de ce rayonnement X secondaire permet à la fois de connaître la nature des éléments chimiques présents dans un échantillon ainsi que leur concentration massique.

c) Rayons X et fluorescence

Les rayons X sont des ondes électromagnétiques. On distingue, des plus énergétiques aux moins énergétiques, les rayons gamma, les rayons X, les Ultra-Violet, la bande du visible, l'Infra Rouge.

Les rayons X représentent la partie du spectre électromagnétique comprise entre 100eV et 1 MeV. L'énergie contenue dans les photons X est donc bien plus grande que celle des photons lumineux est suffisamment grande pour pouvoir arracher des électrons situés au cœur des atomes. L'énergie E et la longueur d'onde λ d'un photon sont liées par la relation

$$E = h \cdot c / \lambda \quad (\text{III.1})$$

Où :

h est la constante de Planck ($6,6 \cdot 10^{-34} \text{J.s}$)

c la vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$).

En spectrométrie de fluorescence X, les sources de rayonnements X habituellement utilisées sont les tubes à rayons X ou les sources radioactives du fait de leur énergie importante,

les photons X émis par un tube ont la capacité d'arracher des électrons situés sur les couches proches du noyau des atomes. L'atome alors ionisé va tendre à revenir à l'état d'équilibre : un électron d'une couche plus externe va venir combler la lacune laissée par l'électron qui a été éjecté. Cette transition électronique s'accompagne d'une libération d'énergie sous forme d'un photon X d'énergie caractéristique de l'atome. C'est le phénomène de fluorescence X. Plusieurs transitions électroniques sont possibles, un atome pouvant émettre plusieurs types de photons X. Pour les nommer on utilise la notation de Siegbahn, on parle de raies $K\alpha$, $K\beta$, $L\alpha$, $L\beta$,...

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit le dispositif exploité (séparateur à courant de Foucault) et citer le mélange utilisé dans les essais expérimentaux.

Le séparateur semi-industriel et le mélange granulaire des cartes circuits jouent un rôle crucial dans les essais expérimentaux, offrant la possibilité d'analyser en détail les caractéristiques et les performances des cartes circuits, et de les optimiser pour répondre aux exigences spécifiques de diverses applications industrielles.

CHAPITRES IV :

Résultats expérimentaux et discussion

CHAPITRE IV Résultats expérimentaux et discussion**IV.1 Introduction**

L'étude expérimentale impliquerait la mise en place d'un séparateur à courants de Foucault spécifiquement conçu pour les DEEE. Les déchets d'équipements électroniques seraient introduits dans le système de tri, et le séparateur utiliserait les courants de Foucault pour séparer les composants conducteurs (tels que les métaux précieux) des composants non conducteurs (tels que le plastique).

IV.2 Analyse par spectrométrie de fluorescence

L'analyse par spectrométrie de fluorescence peut être utilisée pour caractériser et identifier les différents matériaux présents dans un mélange de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) qui ont été séparés à l'aide d'un séparateur à courants de Foucault.

Voici comment on a procédé pour analyser le mélange de déchets séparés :

a) Préparation de l'échantillon : On a collecté les matériaux à partir des deux compartiments de collecteur

b) Spectromètre de fluorescence : Après on a utilisé le spectromètre de fluorescence équipé d'une source lumineuse appropriée pour exciter les échantillons. La fluorescence est une propriété optique des matériaux qui leur permet d'émettre de la lumière après avoir été excités par une source d'énergie.

c) Acquisition des spectres de fluorescence : Placez chaque matériau séparé individuellement dans la zone d'excitation du spectromètre de fluorescence et enregistrez les spectres de fluorescence correspondants. Les spectres de fluorescence sont des graphiques qui représentent l'intensité de la lumière émise en fonction de la longueur d'onde.

d) Résultats et discussion

On peut analyser les spectres de fluorescence obtenus pour identifier les différentes caractéristiques spectrales distinctes des matériaux présents dans les deux échantillons. Les matériaux différents auront des spectres de fluorescence uniques en raison de leurs propriétés chimiques et structurales. On peut utiliser des bibliothèques spectrales ou des bases de données pour comparer les spectres mesurés avec ceux des matériaux de référence connus.

Interprétation des résultats : Identifiez les différents matériaux présents dans le mélange de déchets en fonction des caractéristiques spectrales observées. La fluorescence peut révéler la présence de métaux précieux tels que l'argent, le cuivre, ainsi que d'autres matériaux spécifiques aux équipements électroniques tels que le plastique, le verre, etc.

Il est important de noter que la spectrométrie de fluorescence est une technique sensible et précise, mais elle nécessite une calibration appropriée et la comparaison des spectres avec des matériaux de référence pour une identification précise.

Tableau périodique des éléments



Legend:

- Éléments analysés par l'auteur
- Éléments analysés par l'auteur à l'aide d'un détecteur M4 TORNADO

Figure IV .1 : Tableau périodique des éléments chimiques [43]

SPECTRE 1

On a prélevé un échantillon du produit séparé et collecté au Côté droite du collecteur pour l'analyser dans le spectromètre M4 TORNADO. Les résultats sont détaillés dans le tableau IV.1 si dessous et illustrer dans la figure IV.2.

El	AN	Net	norm. C	Atom. C
		[wt.%]	[at.%]	
Rh	45	29217	8.67	6.03
Fe	26	1565109	7.25	9.29
Cu	29	6452654	32.25	36.30
Zn	30	2202722	10.90	11.93
Re	75	34971	0.34	0.13
Br	35	3657852	40.58	36.33
Total:		100.00	100.00	

Tableau IV .1Caractéristiques du Spectre(1) de rayons X à dispersion d'énergie (EDX)

EL = élément ; **AN** = numéro atomique. **C[% en poids]** = la concentration non normalisée en pourcentage en poids de l'élément ; norme. **C [wt.%]** = la concentration normalisée en poids

Pourcentage de l'élément ; **Atome C. [at.%]** le pourcentage de poids atomique

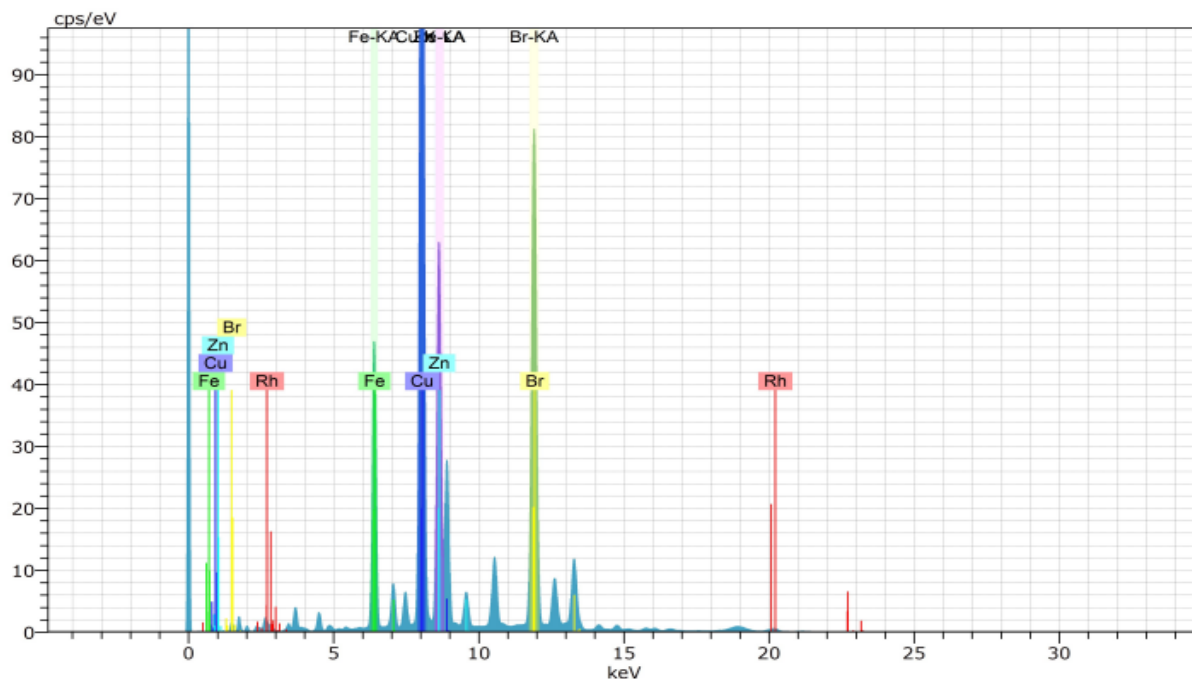


Figure IV .2 : Spectre de fluorescence X d'un échantillon du produit séparé et collecté au Côté droite du collecteur

L'échantillon principalement composé de **32,25 %** du cuivre (**Cu-KA**), de zinc **10,90%**(**Zn-KA**), de **7,25 %** de fer (**Fe-KA**) et de **40,58 %** brome (**Br-KA**), présente également une fluorescence due à la présence de rhodium **0,34 %**(**Rh-KA**). La source de fluorescence du rhodium est attribuée aux caractéristiques du tube du spectromètre, où la fluorescence est générée par le matériau de l'anode. Il convient de noter que lors de la mesure, aucun filtre n'a été utilisé entre le tube et l'échantillon, laissant l'air comme séparateur entre la source de rayons X et l'échantillon.

On remarque les métaux représente un pourcentage de 60% à peu près par rapport au brome bien que c'est un élément essentiel dans la constitution des cartes électroniques des téléviseurs à tube cathodique.

SPECTRE 2

Un échantillon du produit séparé et collecté au Côté gauche du collecteur est analysé dans le spectromètre M4 TORNADO. Les résultats sont détaillés dans le tableau **IV.2** ci dessous et illustrer dans la figure **IV .3**.

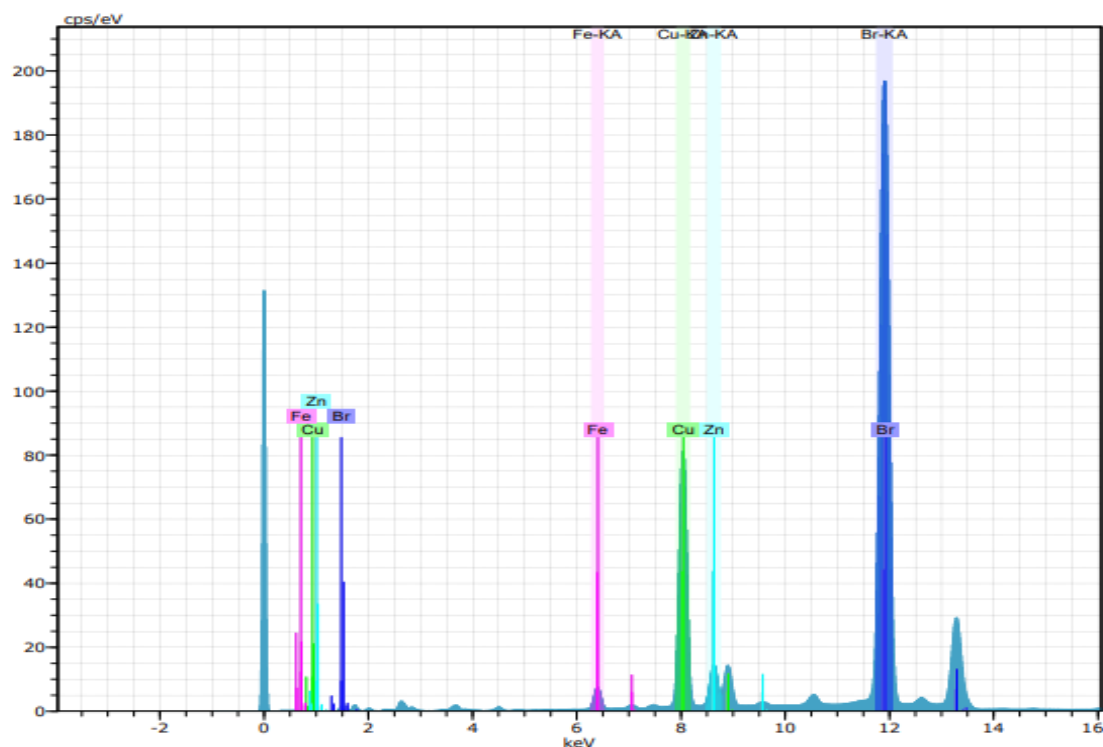


Figure IV.3 : Spectre de fluorescence X d'un échantillon du produit séparé et collecté au Côté gauche du collecteur

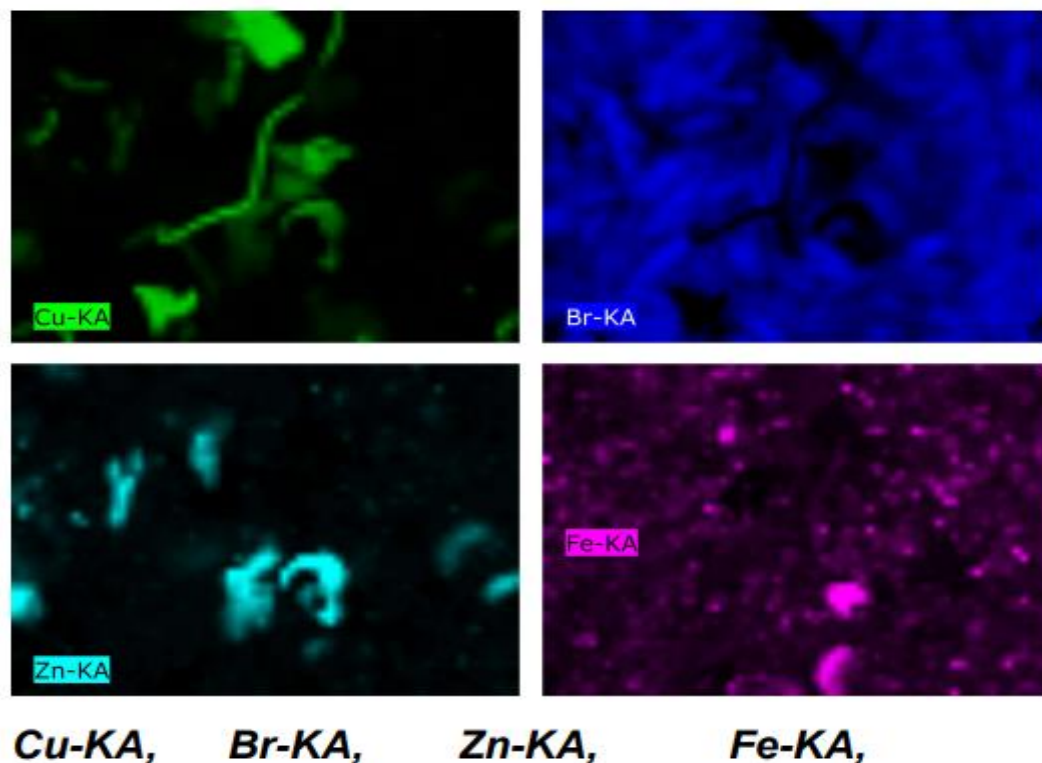
El	AN	Net norm. C	Atom. C
		[wt.%]	[at.%]

Cu	29	2811812	10.63
Br	35	8404487	86.74
Zn	30	435623	1.55
Fe	26	211581	1.08

Total:		100.00	100.00

Tableau IV.2 : Caractéristiques du Spectre(2) de rayons X à dispersion d'énergie (EDX)
EL = élément ; **AN** = numéro atomique. **C[% en poids]** = la concentration non normalisée en pourcentage en poids de l'élément ; **norme. C [wt.%]** = la concentration normalisée en poids Pourcentage de l'élément ; **Atome C. [at.%]** le pourcentage de poids atomique

L'échantillon est composé de 87 % brome (**Br-KA**) est 13% des métaux (**cuivre, zinc et fer**). L'interprétation des analyses de spectrométrie à fluorescence dans le contexte de la séparation des DEEE par un séparateur à courants de Foucault peut aider à évaluer l'efficacité de séparation, la pureté des fractions récupérées et la conformité aux réglementations environnementales. Ces informations sont essentielles pour évaluer le potentiel du séparateur à courants de Foucault en tant que solution de tri des DEEE.



Figures IV.4 : Images X numérique du cuivre, brome, zinc et fer (haute résolution 1200x1200)

IV .3Simulation numérique de la performance du tri des DEEE du séparateur à courant de Foucault

La séparation basée sur les courants de Foucault représente une méthode hautement efficace pour extraire des métaux non ferreux tels que l'aluminium et le cuivre à partir de déchets industriels. Les paramètres tels que l'intensité du courant, la fréquence, la vitesse d'alimentation des déchets et la géométrie du séparateur seraient ajustés pour optimiser la séparation. Des mesures seraient prises pour évaluer l'efficacité du tri en termes de pureté et de rendement des matériaux récupérés.

Voici un exemple de code sous Matlab qui calcul du comportement des particules d'Aluminium de forme rectangulaire. Ce code nous permettra de vérifier la possibilité de leur séparation, estimer les performances de séparation et identifier les limites d'utilisation de séparateur à courant de Foucault pour les matériaux DEE.

Induction magnétique rémanente (T)	1.1
Vitesse de rotation du tambour (tr/min)	3000
Vitesse linéaire du tapis (m/s)	0.47
Taille de la particule (cm ³)	4×4×0.1
Conductivité électrique de la particule (S/m)	5×10 ⁷
Densité de masse de la particule (kg/m ³)	2700

Tableau IV.3: Données de calcul d'une particule d'aluminium prises de la littérature [43]

a) Code source

% Paramètres

```
Induction_magnétique = 1.1; % Induction magnétique rémanente (T)
vitesse_rotation_tambour = 3000; % Vitesse de rotation du tambour (tr/min)
vitesse_lineaire_tapis = 0.47; % Vitesse linéaire du tapis (m/s)
taille_particule = [4, 4, 0.1] * 1e-2 ; % Taille de la particule (m)
conductivite_electrique = 5e7; % Conductivité électrique de la particule (S/m)
densite_masse_particule = 2700 ; % Densité de masse de la particule (kg/m³)
```

% Conversion de la vitesse de rotation du tambour en rad/s

```
vitesse_rotation_tambour_rad = vitesse_rotation_tambour * (2 * pi / 60);
```

% Calcul de la fréquence de rotation du tambour

```
frequence_rotation_tambour = vitesse_rotation_tambour_rad / (2 * pi);
```

% Calcul de la vitesse linéaire du tambour

```
vitesse_lineaire_tambour = frequence_rotation_tambour * taille_particule(1);
```

% Calcul de la force gravitationnelle sur la particule

```
force_gravitationnelle = taille_particule(1) * taille_particule(2) * taille_particule(3) *  
densite_masse_particule * 9.81;
```

% Calcul de la force magnétique entre la particule et le tambour

```
force_magnetique = 0.5 * induction_magnetique^2 * taille_particule(1) * taille_particule(2) *  
taille_particule(3) * conductivite_particule * vitesse_lineaire_tambour^2;
```

% Vérification de la possibilité de séparation

```
possibilite_separation = force_magnetique / force_gravitationnelle;
```

% Affichage des résultats

```
fprintf('Possibilité de séparation : %d\n', possibilite_separation);  
fprintf('Force gravitationnelle : %.2f N\n', force_gravitationnelle);  
fprintf('Force magnétique : %.2f N\n', force_magnetique);
```

b) Exécution du code

Il faut s'assurer d'avoir les données correctes et de fournir les unités appropriées pour chaque paramètre. Ce code Nous donnera une indication de la possibilité de séparation, des performances de séparation et des limites d'utilisation du séparateur à courants de Foucault pour les matériaux DEE.

```

14
15 % Calcul de la vitesse linéaire du tambour
16 vitesse_lineaire_tambour = frequence_rotation_tambour * taille_particule(1);
17
18 % Calcul de la force gravitationnelle sur la particule
19 force_gravitationnelle = taille_particule(1) * taille_particule(2) * taille_particule(3) * densite_masse_particule * 9.81;
20
21
22 % Calcul de la force magnétique entre la particule et le tambour
23 force_magnetique = 0.5 * induction_magnetique^2 * taille_particule(1) * taille_particule(2) * taille_particule(3) * conductivite;
24
25 % Vérification de la possibilité de séparation
26 possibilite_separation = force_magnetique / force_gravitationnelle;
27
28 % Affichage des résultats
29 fprintf('Possibilité de séparation : %d\n', possibilite_separation);
30 fprintf('Force gravitationnelle : %.2f N\n', force_gravitationnelle);
31 fprintf('Force magnétique : %.2f N\n', force_magnetique);

```

Command Window

```

Possibilité de séparation : 4.568279e+03
Force gravitationnelle : 0.04 N
Force magnétique : 193.60 N

```

Figure IV .5. : Programme écrit sous Matlab avec exécution

IV.4 Conclusion

Les résultats de cette étude expérimentale seraient essentiels pour évaluer le potentiel du séparateur à courants de Foucault en tant que solution de tri des DEEE. Ils pourraient être utilisés pour orienter les décisions de gestion des déchets électroniques et contribuer à l'amélioration des pratiques de recyclage et de valorisation de ces déchets, tout en réduisant leur impact environnemental.

Conclusion générale :

La technologie de séparation par courant de Foucault est en effet largement utilisée dans le traitement des déchets d'équipement électronique (DEEE), principalement pour le tri des métaux non ferreux tels que l'aluminium, le cuivre, le plomb, etc. Ce processus multifactoriel repose sur plusieurs paramètres qui doivent être ajustés pour maximiser l'efficacité de la séparation.

Parmi ces paramètres, la vitesse de rotation du tambour est un élément clé. En ajustant la vitesse de rotation, on peut contrôler la force centrifuge exercée sur les particules et ainsi influencer leur trajectoire dans le tambour. Une vitesse de rotation optimale permet de séparer efficacement les particules en fonction de leur conductivité électrique.

La position du collecteur est également importante. Il est placé de manière à récupérer les particules conductrices qui sont repoussées par les courants de Foucault. Une position stratégique du collecteur permet d'optimiser la collecte des métaux non ferreux.

Enfin, la distribution du mélange de déchets à l'entrée du séparateur peut également affecter l'efficacité de la séparation. Une répartition homogène du mélange permet d'optimiser le processus de tri.

Notre étude expérimentale sur le séparateur semi-industriel associé à un dispositif à tambour rotatif a montré que les paramètres étudiés ont un impact significatif sur la gestion des DEEE. En optimisant ces paramètres, nous avons pu améliorer simultanément la collecte des déchets et la pureté des produits séparés. Cela signifie que nous avons réussi à obtenir un tri plus efficace des métaux non ferreux, ce qui est important pour le recyclage et la valorisation des DEEE.

En résumé, la séparation par courant de Foucault est une technologie prometteuse pour le traitement des déchets d'équipement électronique. En ajustant les paramètres tels que la vitesse de rotation du tambour, la position du collecteur, la taille du produit et la distribution du mélange, il est possible d'améliorer l'efficacité de la séparation et d'optimiser la collecte et la pureté des produits séparés.

Références Bibliographique

- [1] 1-Loi n° 01-19 du 12 décembre 2001 de la réglementation algérienne relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets Alger : sn., 2001.
- [2] Tahar, Dr. BENNAMA. Les bases de traitement des déchets solides. Oran : Polycopié de Cours, 2016.
- [3] ARIB, Souleymane, YALAOUI, Fouad et ZEROUKLANE, Massinissa. Pour une amélioration de la gestion des déchets dans le milieu urbain Cas de la ville de Bejaia. Bejaia : Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Architecture Université Abderrahmane Mira – Bejaia, 2016-2017.
- [4] L'USINENOUVELLE. [En ligne] 2017. [Citation : 22 avril 2023.] <https://www.usinenouvelle.com/article/les-professionnels-des-dechets-menagers-doivent-travailler-sur-le-tri-a-la-maison>.
- [5] Mains vertes. Tout savoir sur les déchets en Algérie. [En ligne] 2018. <https://mainsvertes.org/2019/03/19/tout-savoir-sur-les-dechets-en-algerie-partie-1/>.
- [6] Turlan, tristan. Les déchets collecte.traitement.tri. Recyclage. s.l. : Dunod, 2018.
- [7] Écosystème. [En ligne] [Citation : 27 avril 2023.] <https://www.ecosystem.eco/fr/article/deee>.
- [8] DIRECTIVE 2012/19/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). 2012.
- [9] Global E-waste Monitor. 2020.
- [10] Chemical hazards associated with treatment of waste electrical and electronic equipment. Oyuna Tsydenova, Magnus Bengtsson. s.l. : Waste Management journal.
- [11] Déchets électroniques dans le Pacifique : stratégie régionale et plan d'action. Apia, Samoa : Secrétariat du Programme régional océanien de l'environnement, 2011.
- [12] Ouladkaddour, Leila et zian, hakima. Récupération & traitement des déchets d'Equipements électriques&Electroniques. Tlemcen : projet de fin d'étude Université Abou Bakr Belkaid, 2018.
- [13] Recycling printed circuit boards. Li, J. et Zeng, X. China: Woodhead Publishing Limited Tsinghua University, 2012.
- [14] site web : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/Aurora_2ch_mixer_board_arrive.jpg. [En ligne]
- [15] Thomas, Christian. RECYCLAGE DES CARTES ÉLECTRONIQUES : UN APERÇU DE L'ÉTAT DE L'ART. Distribution électronique Cairn.info, 2016, 82.
- [16] LAURENT, P. TECHNOLOGIE et REALISATION de CIRCUITS IMPRIMES ELECTRONIQUES. Nice : IUT de NICE Dpt. GEII Laboratoire, 2002.
- [17] Courstechinfo. [En ligne] [Citation : 10 mai 2023.] <http://www.courstechinfo.be/Hard/CircuitsImprimes.pdf>.

- [18] ORIENT DISPLAY. [En ligne] [Citation : 26 05 2023.]
<https://www.orientdisplay.com/fr>.
- [19] MOKO TECHNOLOGY. [En ligne] 2022. [Citation : 26 05 2023.] FR4 PCB - MOKO Technology
- [20] BELGREINE Kawther BENAYAD Zakaria Modélisation d'un séparateur électrostatique à cylindre tournant par un réseau de neurone artificiel (RNA) Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchen 2018
- [21] Marc Séguin, Physique XXI Tome B note de cours rédigée par Simon Vézina
- [22] <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/le-champ-electrique-et-la-loi-de-coulomb-s1156>
- [23] Gontran R., “Étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations déséparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires”, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, France, 2018.
- [24] Nadjem A., “Etude et exploitation des charges électriques dans les procédés électrostatiques”, Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2019.
- [25] Boukhoulda, M. F., Miloudi, M., Medles, K., Rezoug, M., Tilmatine, A., Dascalescu, L. “Experimental modeling of a new triboelectrostatic separation process for mixed granular polymers”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, pp. 2375-2381, 2013.
- [26] Remadnia M., “Déclin de potentiel sur la surface de matériaux granulaires isolants”, Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2012.
- [27] Aksa W., Medles K., Rezoug M., Miloudi M., Dascalescu L., “Procédé de séparation électrostatique à deux étages pour l'amélioration de la pureté des matériaux isolants obtenus des déchets d'équipements électriques et électroniques”, Conférence Francophone sur l'Eco-conception en Génie Electrique (CONFREGE), Montréal, Canada, Mai 2012.
- [28] Messafeur R., “Etude d'un procédé de séparation d'un mélange de particules isolantes issues de plusieurs matériaux”, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2018.
- [29] Fekir D. E., “Chargement triboélectrique et séparation électrostatique pour deux types de mélange granulaire binaire isolants de taille fine et ceux de grosse taille”, Thèse de Doctorat en électrotechnique, Université de Sidi-Bel-Abbes, 2017.
- [30] OULADKADDOUR Leila ZIAN Hakima Récupération & traitement des déchets d'Equipements Electriques & Electroniques Université Abou bakr Belkaid – Tlemcen 2018
- [31] Bilici, M., Dascalescu, L., Dragan, C., Fati, O., Iuga, A., Samuila, A., “Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices”,

- IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, pp. 1476-1483, 2011.
- [32] OULADKADDOUR Leila ZIAN Hakima Récupération & traitement des déchets d'Equipements Electriques &Electroniques Université Abou bakr Belkaid – Tlemcen 2018
- [33] Mekhalef Benhafssa A., “Etude d’un séparateur tribo-aéro-électrostatique des mélanges des matériaux poudreux”, Thèse de Doctorat en électrotechnique, Université de Sidi-Bel-Abbès, 2017
- [34] MERAHI Amir Réseaux Electriques/Commande des actionneurs électriques Université DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES 2016
- [35] P. Lorrain, D.R. Corson, Champs et ondes électromagnétiques, Armand colin, Paris, 1979.
- [36] BUZID. S, Détection magnétique de matériaux enterres, Thèse de doctorat de l’université de Reims Champagne Ardenne, 2009.
- [37] [Définition | Séparateur à courant de Foucault | Futura Planète \(futura-sciences.com\)](#)
- [38] [Les séparateurs à courants de Foucault, Raoul Lenoir \(raoul-lenoir.com\)](#)
- [39] AYAD Ahmed Nour El Islam Etude et Réalisation d’un séparateur à inductionélectromagnétique UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES 2017
- [40] Mer ahi, A., Medles, K., Tilmatine, A., Conception et développement d’un procédé de séparation à courant de Foucault pour matériaux non ferreux, brevet enregistré à l’Institut national algérien de la propriété industrielle (INAPI), N0 150682, 10 Novembre 2015.
- [41] G. Gillet, Séparation magnétique haut gradient (SMHG) et haut champ, Techniques de l'ingénieur, Génie des procédés, Vol papier n° JB3, J3222, Mars 2004
- [42] Gasmi mohamed et Habbi mohamed,"Etude expérimentale d'un separateur électrostatique des mélanges granulaires (métal /isolant)" Memoire de master „juin 2022
- [43] <https://www.physitek.fr/blog-groupe-physitek/fluorescence-x/>
- [44] OUILI Mehdi, Thèse de doctorat : « Optimisation du Profil de l'Induction Magnétique Pour Application de la Séparation des Particules non Homogènes en Voies Sèche et Humide ». 2019