



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة و الأمن الصناعي

Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de maintenance en instrumentation

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : électromécanique industrielle

Thème

Caractérisation et traitement des cartes électroniques par la séparation électrostatique

Présenté et soutenu publiquement par :

Nom & Prénom : Lekhal Mohammed El Amine

Nom & Prénom : Lounis Abdessamed

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
Belkacem Belkacem	MCA	IMSI/Univ-Oran2	Président
Mimouni Chahinez	MCB	IMSI/Univ-Oran2	Encadrante
Labair Hakima	MCB	IMSI/Univ-Oran2	Examinatrice

Année 2023 / 2024

Remerciements :

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à encadrante Mme Mimouni Chahinez, pour son soutien indéfectible, ses conseils avisés et son accompagnement tout au long de ce projet. Ses remarques constructives et son expertise m'ont permis d'approfondir mes réflexions et de mener à bien ce travail.

Mes sincères remerciements vont également aux membres du jury qui me font l'honneur d'évaluer ce mémoire. Leurs commentaires et leurs questionnements enrichissants contribueront à faire progresser ma compréhension du sujet.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué à l'achèvement de ce manuscrit, en particulier à ceux qui, généreusement, ont partagé leurs connaissances et leurs expériences au cours des entrevues, pour leur temps et leur collaboration.

Enfin, un immense merci à ma famille et à mes proches pour leur soutien inconditionnel, leur patience et leurs encouragements permanents. Leur présence à mes côtés a été un moteur essentiel pour mener ce projet à son terme.

Merci beaucoup à tous.

Dédicace

Tout d'abord, je dédie ce travail à moi-même.

Ensuite, A celle qui m'a attendu avec patience pour les fruits de sa bonne Éducation,...
A ma plus belle femme dans ma vie ma mère et ma mère et ma mère Malika pour son
amour infini.

A mon cher père Abdelkader qui m'a donnée Tout ce qu'une femme rêve dans sa vie.

A mon plus cher sœur Feryal qui le rayon de soleil qui illumine nos jours, un trésor
précieux dans notre famille

A mes plus chère frères Abdessamed et Farouk qui m'a donné de la joie dans les moments
difficiles.

A la mémoire de mes grands-mères et mes grands-pères qui nous a quittés avec un cœur
triste.

Sans oublier mon binôme Abdessamed, je tiens à souligner son soutien indéfectible, sa
patience et sa compréhension qui ont été d'une aide précieuse tout au long de la réalisation
de ce projet.

Enfin, A Tous ceux qui me portent durant le travail de mon mémoire.

Finalement, A mes plus grands sentiments de remerciements vont à moi.

Mohammed El Amine

Dédicace

A ma très chère mère :

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier
comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me
guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force
pour affronter les différents obstacles.

« Ô Allah, pardonne les péchés de ma mère, accorde-lui Ta miséricorde et fais entrer son
âme au Paradis permets-nous de nous réunir au Paradis. Amin. »

A mon très cher père :

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager.

Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A ma très chers ma belle sœur

A ma famille, elle qui m'a doté d'une éducation digne,
son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui :

Sans oublier mon binôme Mohamed Amine pour son soutien moral, sa
patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

Puisse Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout

Réussite

Abdessamed

Résumé :

La séparation électrostatique du cuivre, aluminium et des matériaux isolants électriques représente une technologie économiquement viable pour la préservation de l'environnement, car elle offre du plastique recyclé de qualité élevée et une meilleure efficacité pour le recouvrement des métaux que les méthodes conventionnelles de traitement des cartes électroniques. L'électro-séparation isolant-métal représente de nos jours une technologie moderne de recyclage des matériaux usagés issus des déchets industriels ; elle est considérée comme la meilleure possibilité utilisée pour la séparation d'un mélange de granules isolant métal.

L'objectif 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 à tambour 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 tambour ; recyclage

Abstract:

Electrostatic separation of copper, aluminum and electrical insulating materials is a cost-effective technology for environmental protection, as it offers high-quality recycled plastic and better efficiency for metal coating than conventional electronic card processing methods. Nowadays, insulating-metal electro-separation represents a modern technology for recycling waste materials from industrial waste; it is considered to be the best option used for separating a mixture of metal-insulating granules.

The purpose of this study is to highlight the need to treat WEEE appropriately, as it often contains valuable materials such as non-ferrous metals, which can be recovered and recycled. By assessing the ability of this drum separator to effectively separate and recover these valuable materials, you are contributing to the development of sustainable solutions for the management of WEEE.

Keywords: Waste, waste electronic equipment, drum separator; recycling

ملخص :

تشكل الانفصال الكهرومغناطيسي للألومنيوم والمواد الهيدروجينية الكهربائية تقنية حيوية اقتصادياً لحماية البيئة، لأنها توفر البلاستيك المعنوية ذات الجودة العالية وفعالية أعلى لتشخيص المعادن من طرق معالجة البطاقات الإلكترونية التقليدية. يعتبر تقسيم الكهرباء من المعدن إلى المعادن حالياً تقنية حديثة لتصنيع المواد المستخدمة من النفايات الصناعية، ويعتبر أفضل خيار يستخدم لتقسيم مزيج من الخلايا المعدنية.

الغرض من هذه الدراسة هو تسليط الضوء على الحاجة إلى معالجة نفايات المعدات الكهربائية والإلكترونية بشكل مناسب، حيث إنها غالباً ما تحتوي على مواد قيمة مثل المعادن غير الحديدية، والتي يمكن استعادتها وإعادة تدويرها. من خلال تقييم قدرة جهاز فصل الأسطوانة على فصل هذه المواد القيمة واستعادتها بفعالية، فإنك تساهم في تطوير حلول مستدامة لإدارة نفايات المعدات الإلكترونية والإلكترونية.

الكلمات الرئيسية: النفايات، نفايات المعدات الإلكترونية، فاصل الأسطوانات، إعادة التدوير

Sommaire

Introduction Général	1
Chapitre 1 : Traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques	3
I.1 Introduction :	3
I.2 Définition des déchets :	3
I.2.1 Définition juridique :	3
I.2.2 Définition environnementale :	4
I.2.3 Définition économique :	4
I.3. classification des déchets :	4
I.3.1 selon leur origine :	4
a. Les déchets ménagers et assimilés (DMA) :	4
b. Les déchets industriels :	5
c. Les déchets agricoles :	5
d. Les déchets d'activité de soins de santé :	6
I.3.2 selon la nature du déchet :	7
a. Les déchets dangereux :	7
b. Les déchets toxiques en petites quantités :	7
c. Les déchets non dangereux :	7
d. Les déchets inertes:	8
e. Les déchets ultimes :	8
I.4 Impact des déchets :	8
I.4.1 Impacts sur la santé humaine.....	8
I.4.2 Impacts sur l'environnement :	10
I.5 Définition des déchets d'équipements électriques et électroniques :	10
I.6 classification des DEEE :	11
I.6.1 Le classement des EEE jusqu'à 2018 :	11
I.6.2 Le classement des EEE en cours à ce jour :	11
I.7. Composants et substances dangereuses dans les déchets électroniques :	13
I.7.1 composants des DEEE :	13
a. Composants contenant du mercure :	13
b. Batteries :	13
c. Cartes de circuits imprimés (PCB)	13

d. Tubes à rayons cathodiques (CRT):	14
e. Écrans à cristaux liquides (LCD)	14
f. plastique :	15
I.7.2 Les substances dangereuses des composants électroniques :	15
I.8 recyclage des DEEE:.....	17
I.9 Exemples de déchets électroniques recyclables :	18
I.9.1 Recyclage des cartes de circuits imprimés :	18
a. Présentation des cartes de circuits imprimés :	18
b. Les constituants d'une carte de circuits imprimés :	19
c. Les types de circuits imprimés :	20
d. Le montage des composants électroniques :	23
e. recyclage des cartes de circuits imprimés :	24
I.10 Conclusion :	29
Chapitre 2 : Separation electrostatique.....	30
II.1 Introduction	30
II.2 Installation des séparateurs électrostatique:	30
II.2.1 Séparation électrostatique des DEEE :	30
II.2.2 La charge électrique	31
II.2.3 Le champ électrique :	32
II.2.4 La force électrique:	34
II.3 Installations de séparation électrostatique :	35
II.3.1 Dispositifs de séparateur tribo électrostatiques :	35
a) Séparateur tribo-électrique à tapis roulant:	35
II.3.2 Types de séparation triboélectrique :	36
a) Séparateur tribo-électrique à chute libre:	36
b) Séparateur tribo-électrostatique à tambour :	38
II.3.3 Avantages de la séparation triboélectrique :	38
II.3.4 Inconvénients de la séparation triboélectrique :	39
II.4 Séparateurs tribo-Aero-électrostatique :	39
II.4.1 Séparateur tribo-Aero-électrostatique à électrodes verticales	39
II.4.2 Séparateur tribo-Aero-électrostatique à disques tournants:	40
II.4.3 Séparateur tribo-Aero-électrostatique à deux bandes transporteuses:	44
II.4.4 Séparateur tribo-Aero-électrostatique à deux étages :	45

II.5 La séparation magnétique :.....	47
II.6 Conclusions :	49
Chapitre 3 : Étude expérimentale d'un séparateur électrostatique a tambour	50
III.1 Introduction :	50
III.2 Description du dispositif :	50
III.2.1 Principe de fonctionnement :	51
III.2.2 Paramètres influents du séparateur :	52
III.2.3- Le Séparateur Electrostatique de Mélanges Granulaires SELMEG	54
III.3.1 Description:.....	54
III.3.2 chambre de séparation du SELMEG :	55
III.4 Mélange utilisé dans les essais expérimentaux :	56
III.5 Broyeur :	56
III.6 Tamiseur :	57
III.7 Spectrométrie de fluorescence X.....	57
III.7.1 Spectromètre à Micro fluorescence X compact de type M4 TORNADO	57
III.7.2 Principe de fonctionnement	58
III.7.3 Rayons X et fluorescence	59
III.7 Conclusion :	60
Chapitre 4 : Résultats expérimentales et discussion.....	61
VI .1 Introduction	61
VI.2 Analyse par spectrométrie de fluorescence.....	61
VI.3 Résultats expérimentaux et discussions	62
VI .3.1 SPECTRE 1	65
VI .3.2 SPECTRE 2	66
VI.4 Conclusion	67
Conclusion Général	68

Liste des figures :

Figure I.1: Déchets ménagère et assimilé.....	4
Figure I.2: Déchets agricoles.....	5
Figure I.3: Déchets médicaux et pharmaceutiques.....	6
Figure I.4: Déchets dangereux	7
Figure I.5: Déchets inerte	8
Figure I.6 : Voies physiologiques d'exposition OMS, 2021	9
Figure I.7 : Classification des DEEE	12
Figure I.8 : Afficheur LCD	15
Figure I.9 : une carte de circuits imprimés.....	19
Figure I.10 : constitution d'un CI simple face.....	20
Figure I.11 : La structure du PCB simple face	20
Figure I.12 : exemple de double face avec sérigraphie côté composant et vernis épargne sur les deux faces externes.....	21
Figure I.13 : La structure du PCB double face.....	21
Figure I.14 : exemple de circuit à 4 couches ; deux couches de signal externes, et deux couches d'alimentation internes.....	22
Figure I.15 : La structure du PCB multicouches	22
Figure I.16 : exemple de carte 16 couches à haute densité d'intégration.....	23
Figure II.1 :Type et protection de matériaux existant dans les DEEE	31
Figure II.2 : Charge électrique	31
Figure II.3: Lignes de champ électrique produit par une charge ponctuelle.....	32
Figure II.4 : Les lignes d'un champ électrique produit par une seule charge.	33
Figure II.5 : Lignes de champ électrique produit par deux charges ponctuelles.....	33
Figure II.6 : Lignes de champ électrique produit par deux petits conducteurs.	33
Figure II.7 : Force de coulomb entre deux sphères chargées	34
Figure II.8 : Dispositif de séparation à tapis roulant.	35
Figure II.9 : Séparation simple étage et séparation à deux étages.....	36
Figure II.10 : Dispositif de séparation à chute libre avec chargement triboélectrique par cylindre tournant.....	37
Figure II.11 : Photographie de dispositif de Séparation Triboélectrique à chute libre	37

Figure II.12 : Représentation schématique d'un séparateur tribo_électrostatique à tambours transporteurs.....	38
Figure II.13 : Schéma descriptif global de séparateur à deux électrodes plaques en mouvement vertical.....	40
Figure II.14 : Photographie du séparateur tribo-électrostatique à deux disques tournant.....	41
Figure II.15 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-Aero-électrostatique à disques tournants.....	42
Figure II.16 : Photographie d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques.....	43
Figure II.17 : Photographie et schéma d'un séparateur triboélectrique à disques tournants réalisé au laboratoire IRECOM de Sidi Bel-Abbes.....	43
Figure II.18 : représentation schématique d'un séparateur tribo-aero-electrostatique a deux bandes transporteuses.....	44
Figure II.19 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages.....	46
Figure II.20 : Chaîne de séparation magnétique.....	47
Figure II.21 : Séparateur magnétique.....	48
Figure III.1 : séparateur couronne-électrostatique à tambour.....	50
Figure III.2 : Schéma descriptif de l'électro-séparateur et ses éléments constituants.....	51
Figure III.3: Paramètres et variables dans un processus de séparation électrostatique.....	53
Figure III.4 : Schéma global du SELMEG.....	54
Figure III.5 : Photographie de la chambre de séparation du SELMEG.....	55
Figure III.6 : Photographie du mélange granulaire.....	56
Figure III.7 : Le Broyeur.....	56
Figure III.8 : Photographie du tamiseur FRITSCH.....	57
Figure III.9 : Spectromètre à Micro fluorescence X compact de type M4 TORNADO.....	58
Figure VI.1 : Tableau périodique des éléments chimiques.....	62
Figure VI.2: Paramètres et variables dans un processus de séparation électrostatique.....	63
Figure VI.3 : Spectre de fluorescence X d'un échantillon du produit séparé et collecté au Côté conducteur.....	65
Figure VI.4 : Spectre de fluorescence X d'un échantillon du produit séparé et collecté au Côté non conducteur.....	66
Figure VI.5 : Images X numérique du cuivre, brome, zinc et fer (haute résolution 1200x1200).....	67

Liste des tableaux :

Tableau I.1 : Les substances dangereuses des composants électroniques.....	16
Tableau II.1 : Caractéristiques d'un séparateur à deux disques tournants	42
Tableau II.2 : Caractéristiques du séparateur à bandes transporteuses	45
Tableau III.1 : Paramètres variables du processus	53
Tableau VI.1 : Résultats de l'analyse XRF, après la séparation électrostatique.....	64

Abréviation :

DEEE : déchets d'équipements électriques et électroniques

PCB : polychlorobiphényles

DMA : Déchets Ménagers et Assimilés

OM : Ordures Ménagères

OMS : Organisation mondiale de la Santé

CRT : Tubes à rayons cathodiques

LCD : Liquid Crystal Display

BFR : retardateurs de flamme bromés

PVC : plastiques en chlorure de polyvinyle

REP : Responsabilité Étendue du Producteur

SELMEG : Séparateur Electrostatique de Mélanges Granulaires

Introduction

Générale

Introduction Générale :

En ce moment, la gestion des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) constitue un défi crucial. La croissance rapide de l'utilisation des technologies entraîne une augmentation significative des volumes de DEEE chaque année. De nombreux appareils sont inclus dans ces déchets, allant des ordinateurs aux téléviseurs, en passant par les appareils électroménagers et les téléphones mobiles. Ces déchets constituent non seulement une grande quantité de matières premières qui pourraient être réutilisées, mais ils présentent également des risques environnementaux et sanitaires considérables s'ils ne sont pas traités de manière adéquate.

Les DEEE présentent un vaste potentiel de recyclage. Ces déchets contiennent environ 80 % de matériaux recyclables, tels que les plastiques, les métaux ferreux, les métaux précieux tels que l'or, l'argent et le platine, ainsi que des sols rares comme le lanthane et le néodyme. La collecte de ces matériaux permet non seulement de diminuer l'utilisation de nouvelles ressources naturelles, mais elle favorise ainsi la transition vers une économie circulaire, où les produits et les matériaux sont réutilisés et recyclés en continu.

La séparation électrostatique est un terme général désignant une classe importante de technologies de traitement des matériaux largement utilisées pour trier sélectivement les matériaux solides grâce à l'application de forces électriques agissant sur des particules chargées ou polarisées. Dans la plupart des cas, un champ électrique de l'ordre de 10^6 Vm^{-1} est requis, c'est pourquoi le développement de la technologie et des équipements de séparation électrostatique a toujours suivi le rythme des progrès de l'ingénierie haute tension. Des centaines de brevets reflètent sa gamme d'applications, du traitement des minéraux et du conditionnement des semences au recyclage des métaux et des plastiques issus des déchets industriels.

Cette recherche vise à créer et à améliorer des technologies avancées de traitement des DEEE. La séparation électrostatique, la pyrolyse, la récupération d'énergie et la récupération des métaux précieux sont quelques-unes des méthodes utilisées. L'objectif de cette recherche est de proposer des solutions innovantes pour une gestion plus durable des déchets électroniques, en se concentrant sur l'augmentation de l'efficacité du recyclage des matériaux et la réduction de l'impact environnemental.

Dans le premier chapitre on parle des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Il aborde les définitions et les classifications des DEEE, leurs composants et substances dangereuses. Il décrit également l'impact des DEEE sur la santé et l'environnement,

ainsi que les différentes méthodes de recyclage, en mettant un accent particulier sur le recyclage des cartes de circuits imprimés.

Le deuxième chapitre décrit le principe de la séparation électrostatique comme une solution adéquate pour recycler ces déchets. Le document explique en détail les différents types d'installations utilisées pour la séparation électrostatique triboélectrique et tribo-aéro-électrostatique des DEEE, en décrivant leur fonctionnement, leurs avantages et inconvénients. Enfin, il aborde brièvement la séparation magnétique comme une autre méthode utilisée pour le traitement des DEEE.

Dans le troisième chapitre nous parlons de l'étude expérimentale d'un séparateur électrostatique à tambour et décrit le principe de fonctionnement de ce type de séparateur. On présente aussi le SELMEG (Séparateur Electrostatique de Mélanges Granulaires), et détaille ses différents composants. Il aborde également les paramètres influençant les performances du séparateur ainsi que les techniques d'analyse utilisées pour caractériser la composition des mélanges granulaires avant et après séparation.

Le quatrième chapitre représente une étude expérimentale sur le tri des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) à l'aide d'un séparateur électrostatique à tambour. Il décrit l'utilisation de la spectrométrie de fluorescence X pour analyser la composition des fractions séparées, en identifiant les différents métaux et matériaux présents. Les résultats expérimentaux montrent les teneurs en cuivre, brome et autres éléments obtenues pour différents réglages de vitesse de rotation et de tension électrique du séparateur. L'étude vise à évaluer l'efficacité de ce procédé pour le recyclage et la valorisation des DEEE, tout en réduisant leur impact environnemental.

Enfin, la gestion des déchets d'équipements électriques et électroniques est un défi complexe, mais grâce à des technologies de recyclage innovantes, cela peut devenir une opportunité pour un avenir durable. Cette thèse explore des solutions pratiques pour la valorisation des DEEE.

Chapitre I :
TRAITEMENT DES DEEE

Chapitre 1 : Traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques

I.1 Introduction :

Les DEEE, ou D3E, pour déchets d'équipements électriques et électroniques, désignent tous les appareils électriques en fin de vie : ordinateurs, téléphones, appareils électroménagers, téléviseurs... Ces déchets, dont les volumes croissent de manière importante, constituent une source de matières premières récupérables et réutilisables.

Certains composants des DEEE sont dangereux pour l'environnement : une fois usagés, s'ils ne sont pas collectés et traités de manière appropriée, ils peuvent être à l'origine d'émissions de métaux lourds, de PCB (polychlorobiphényles, des polluants qui se désagrègent très peu dans l'environnement) ou de gaz au fort pouvoir de réchauffement.

Pourtant, avec un potentiel de recyclage supérieur à 80 %, les DEEE représentent un extraordinaire gisement de ressources : ils contiennent non seulement des plastiques et des métaux ferreux, mais aussi des métaux précieux comme l'or, l'argent ou le platine et des terres rares comme le lanthane ou le néodyme, qui font l'objet d'une forte pression économique à l'échelle mondiale.

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 :

Selon le législateur français, la loi du 15 juillet 1975, a considéré un déchet comme: « Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit, ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que le détenteur destine à l'abandon » (article L.541-1-1 du Code de l'environnement). [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 donnés. Cependant, il est essentiel de noter que cette définition n'englobe pas les déchets recyclables, qui peuvent avoir une faible valeur économique [3].

I.3. classification des déchets :

I.3.1 selon leur origine :

a. Les déchets ménagers et assimilés (DMA) :

Le terme de Déchets Ménagers et Assimilés (DMA) englobe les Ordures Ménagères (OM) qui sont issues de l'activité domestique des ménages ainsi que les déchets provenant des industries, artisans, commerçants, écoles, services publics, hôpitaux ou encore les services tertiaires qui sont collectés dans les mêmes conditions que les OM. [4]



Figure I.1: Déchets ménagère et assimilé

b. Les déchets industriels :

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 [5]

c. Les déchets agricoles :

Déchet agricole désigne un déchet qui provient de l'agriculture, de la sylviculture et de l'élevage, constitué de déchets organiques (résidus de récolte, déjections animales) et de déchets dangereux (produits phytosanitaires non utilisés, emballages vides ayant contenus des produits phytosanitaires, ...). [6]



Figure I.2: Déchets agricoles.

d. Les déchets d'activité de soins de santé :

Ce sont des déchets spécifiques des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif, curatif ou palliatif, dans les domaines de la médecine humaines et vétérinaires, ainsi que des activités de recherche et d'enseignement associées, de production industrielle et de thanatopraxie. [7]



Figure I.3: Déchets médicaux et pharmaceutiques.

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]



Figure I.4: Déchets dangereux

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. [8]

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 [8]

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 [8].



Figure I.5: Déchets inerte

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 [8].

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.
- Écllosion de conjonctivite.
- 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.

Pour une future mère, l'exposition à des déchets électroniques toxiques peut avoir des conséquences néfastes à vie sur la santé et le développement de son enfant à naître. Parmi ces effets nocifs potentiels pour la santé figurent l'issue négative de la grossesse, comme la mort naissante ou la naissance prématurée, ainsi qu'un faible poids ou une petite taille à la naissance.

Parmi les autres conséquences néfastes sur la santé des enfants liées aux déchets électroniques, on peut mentionner les altérations de la fonction pulmonaire, les effets respiratoires, les dommages à l'ADN, les troubles de la fonction thyroïdienne et le risque accru de certaines maladies chroniques plus tard dans la vie, comme les cancers et les maladies cardiovasculaires.

« Un enfant qui mange un seul œuf de poule venant d'Agbogbloshie, une décharge de déchets située au Ghana, ingèrera 220 fois la dose quotidienne tolérable de dioxines chlorées fixée par l'Autorité européenne de sécurité des aliments » (OMS, 2021).

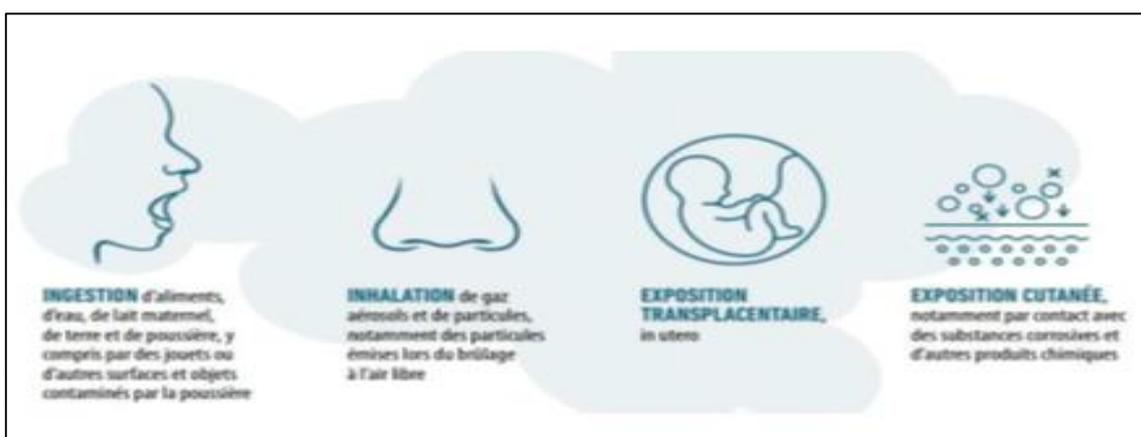


Figure I.6 : Voies physiologiques d'exposition OMS, 2021

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.

Les déchets électroniques sont parmi les déchets les plus tenaces qui persistent très longtemps dans la nature, prenant exemple d'une petite puce téléphonique, elle peut persister plus de 1000 ans dans la nature ou d'une pile qui persiste 200 à 300 ans, entraînant des conséquences néfastes sur l'environnement, car environ 70 % des matières premières des déchets spécifiques sont contaminées et ne sont pas toujours correctement traitées. En outre, dans de nombreux pays, la population n'a pas conscience des problèmes engendrés par les déchets électroniques et cela augmente le problème.

Les appareils électroniques sont des produits complexes, fabriqués à partir de nombreuses matières ayant des effets dramatiques sur l'écosystème.

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 [9].

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 » [10]

Font partie de ces déchets : les appareils électroménagers, l'électronique de loisir, les appareils informatiques et bureautiques, ceux utilisés pour les distributeurs de billets, les outils électriques, les installations de mesure, de commande et de réglage, les installations d'éclairage, les jouets, les montres, les appareils de laboratoires et les appareils médicaux, les

appareils d'enregistrement et de reproduction d'images etc... dans la mesure où ils contiennent des composants électriques ou électroniques. [11]

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 : [12]

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.7) : [12]

1. Équipement d'échange de température.
2. Écrans, moniteurs et équipements contenant des écrans ayant une surface supérieure à 100 cm².
- 2 Les lampes.
- 3 Gros équipement (toute dimension externe supérieure à 50 cm), y compris, mais sans s'y limiter :

Appareils ménagers; équipements informatiques et de télécommunication ; 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

- 4 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.

- 5 Petit matériel informatique et de télécommunication (pas de dimension extérieure supérieure à 50 cm).



Figure I.7 : Classification des DEEE [21]

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 [14].

Le mercure est bioaccumulable et possède des effets néfastes, tant en exposition aiguë que chronique. Absorbé principalement par les voies respiratoires sous forme de vapeur ou par la peau, il a des effets sévères sur le système nerveux central et périphérique. Il se volatilise à température ambiante et dans l'eau, il forme du méthyl-mercure qui contamine les sédiments et toute la chaîne alimentaire. L'incinération et l'enfouissement non contrôlés des déchets électroniques contribuent donc à la contamination de l'environnement par le mercure.

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.

Plusieurs technologies se sont succédé au cours des dernières années : les batteries Nickel-Cadmium, Nickel-hydrure métallique, Lithium-ion et Lithium polymère. Comme leur nom l'indique, elles contiennent plusieurs éléments chimiques précieux comme le Nickel, le Cadmium ou le Lithium. [15]

c. Cartes de circuits imprimés (PCB)

Les cartes de circuits imprimés, ces plaquettes multicolores et en relief où se trouvent les circuits de l'ordinateur, contiennent divers métaux lourds, dont le mercure, le cadmium et une légère quantité de plomb. Les concentrations de plomb sont cependant beaucoup moins élevées que dans les tubes à rayons cathodiques.

Les cartes électroniques assurent l'intelligence de l'équipement. Elles sont constituées de plaques formées d'un assemblage de cuivre, de résine époxy (un plastique thermodurcissable) et de fibre de verre, sur lesquels les composants électroniques sont soudés. La soudure est composée d'un mélange d'étain et de plomb. Dans les appareils les plus modernes, de la soudure sans plomb est utilisée pour des considérations environnementales. [11].

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 [14].

e. Écrans à cristaux liquides (LCD)

Les afficheurs à cristaux liquides (Figure I.8), autrement appelés afficheurs LCD (Liquid Crystal Display), sont des modules compacts intelligents et nécessitent peu de composants externes pour un bon fonctionnement. Ils consomment relativement peu (de 1 à 5 mA), sont relativement bons marchés et s'utilisent avec beaucoup de facilité. [16]

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.[14]



Figure I.8 : Afficheur LCD

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) [14].

Le PVC est utilisé dans les équipements électroniques pour la fabrication du boîtier et du câblage. Ce matériau est recyclable, mais présente des inconvénients environnementaux importants, notamment l'émission de dioxines et furanes lors de sa fabrication et de son incinération.

Du fait de la présence de chlore dans ce type de plastique, sa présence complexifie les opérations de la chaîne de mise en valeur de l'ensemble des plastiques, notamment pour les applications de valorisation énergétique. Plusieurs fabricants d'équipements cherchent à éliminer l'utilisation de PVC dans les nouvelles générations de produits.

I.7.2 Les substances dangereuses des composants électroniques :

Les déchets électroniques sont chimiquement très différents des déchets ménagers, ils contiennent des matériaux de grande valeur, souvent toxiques la liste des substances toxiques présentes dans les déchets électroniques est impressionnante (voir tableau I.1). On trouve des métaux lourds qui sont actuellement essentiels dans la fabrication de la plupart des appareils

électroniques (plomb, cadmium, chrome, cuivre, mercure), des éléments comme l'arsenic et le sélénium, ainsi que des retardateurs de flammes bromés (RFB). Ces derniers sont mélangés aux plastiques pour augmenter la résistance des appareils à la chaleur, toutes ces substances mélangées représentent des risques sur la santé humaine et l'environnement.

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

Tableau I.1 : Les substances dangereuses des composants électroniques

Sources	Composants	Substances dangereuses
Téléviseurs, moniteurs	Tubescathodiques	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 est essentiel car ces déchets ont une empreinte écologique très élevée en raison des importantes quantités de ressources en eau, métaux, et énergies mobilisées par la conception, la fabrication, le transport, l'utilisation et le recyclage des composants et objets électriques et électroniques.

Tous les appareils électriques et électroniques sont recyclables. Leur taux de recyclage varie entre 73% et 87%. Le recyclage permet de produire de nouvelles matières premières secondaires et de fabriquer ainsi de nouveaux appareils tout en préservant les ressources naturelles. (AM ENVIRONNEMENT)

Le traitement des déchets s'appuie sur une logistique et des équipements de collecte, de transport et de traitement. Du producteur au traitement, les déchets doivent être collectés puis être transportés jusqu'aux installations dédiées.

Le traitement s'effectue essentiellement selon les étapes suivantes :

1. Collecte : La collecte des déchets désigne l'ensemble des opérations qui consistent à regrouper les déchets depuis leurs sources de production, puis à les transporter jusqu'aux centres de traitement. [11]

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 [14].

3. Démantèlement : Le démantèlement a pour objectif de retirer les composants contenant des substances dangereuses tels que les écrans cathodiques, les piles, les lampes à décharge, et d'obtenir des sous-ensembles ou des pièces aptes à être valorisés de façon optimale d'un point de vue matière.

Généralement on extrait :

- Les cartes électroniques pour leur contenu en métaux précieux
- Les tubes cathodiques et autres composants dangereux
- Les boîtiers plastiques destinés à être valorisés dans les filières plastiques
- Les pièces métalliques composées de fer, cuivre, aluminium présents dans les câbles, les bobinages, les coffrets... [14]

4. Le broyage : Le broyage est l'une des principales étapes de recyclage des DEEE, il consiste à diminuer la taille des déchets, le but du broyage est de réduire des matières solides d'une taille donnée à une taille plus petite, en les fragmentant. [14]

5. La séparation : C'est une étape très importante dans le processus de recyclage des DEEE, car elle permet la séparation et le tri de plusieurs métaux.

On utilise la séparation magnétique lorsqu'il faut séparer une quantité importante des substances métalliques à partir du flux de matières déjà broyées.

La séparation par courant de Foucault est utilisée pour la séparation des métaux non ferreux, comme son nom l'indique cette technique utilise le courant de Foucault pour repousser les matériaux non métalliques du convoyeur et alors ils seront séparés.

La flottaison est la technique utilisée pour la séparation des plastique en se basant sur le principe de la différence de la masse volumique des déchets à séparés et la masse volumique du liquide dans lequel ces déchets sont plongés. [14]

I.9 Exemples de déchets électroniques recyclables :

I.9.1 Recyclage des cartes de circuits imprimés :

a. Présentation des cartes de circuits imprimés :

Un circuit imprimé (ou PCB, pour printed circuit board) est un support permettant de relier électriquement un ensemble de composants électroniques dans le but de réaliser un circuit électronique. Le circuit imprimé est constitué d'une mille-feuille de fines couches de cuivre séparées par un matériau isolant (en général de la résine époxy armée de fibres de verre et ignifugée par ajout de composés organobromés et de trioxyde d'antimoine). Ces couches de cuivre sont gravées par lixiviation chimique pour obtenir un ensemble de pistes terminées par des pastilles. Ces pastilles sont alors perforées, établissant une liaison électrique soit entre les composants soudés sur le circuit imprimé, soit entre les différentes couches de cuivre superposées et isolées les unes des autres. Une très fine couche de palladium (métal platinoïde stratégique) est déposée dans les trous afin d'éviter l'oxydation, et une fine couche d'or est également déposée sur les parties (en cuivre) de la carte qui serviront de contacts lors de son installation dans l'équipement électronique auquel elle est destinée. À ce stade, une carte électronique contient donc des fibres de verre, du cuivre, de la résine époxy, des traces de palladium et d'or, du brome et de l'antimoine. [18].



Figure I.9 : une carte de circuits imprimés [19].

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 [18].

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 [18].

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 (figure I.10). Ceci ne permet pas de croiser les pistes de cuivre de potentiel différent, sauf à y implanter des straps (cavalier réalisé en câble rigide enjambant, côté composant, la piste à croiser voir chap. 1.2). [20].

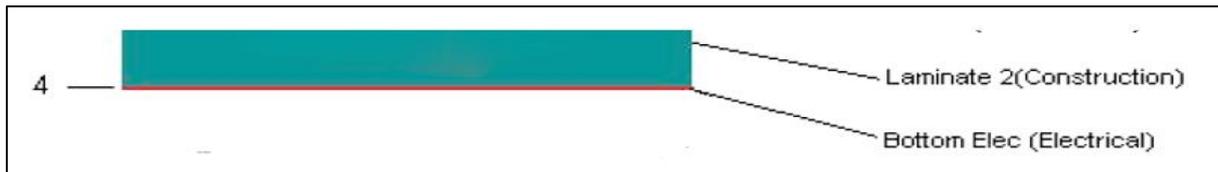


Figure I.10 : constitution d'un CI simple face

Ce type de circuit, peu coûteux, ne permet pas de réaliser des assemblages de composants de haute densité (à cause de la seule couche de cuivre disponible pour relier les composants entre eux) et le support isolant utilisé (généralement de la bakélite), peu résistant aux contraintes mécaniques, limite ce type de circuits à des applications grand public (électroménager, hi-fi, TV ...).[20].

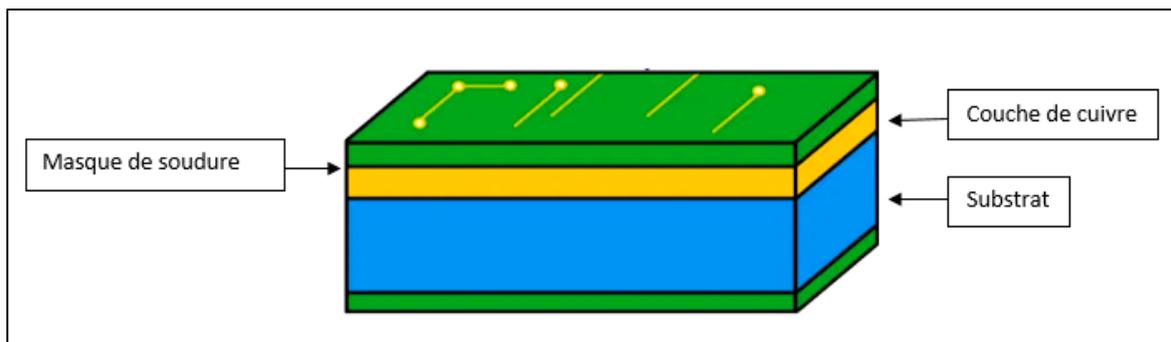


Figure I.11 : La structure du PCB simple face

•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 voir figure I.12). 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. [20].

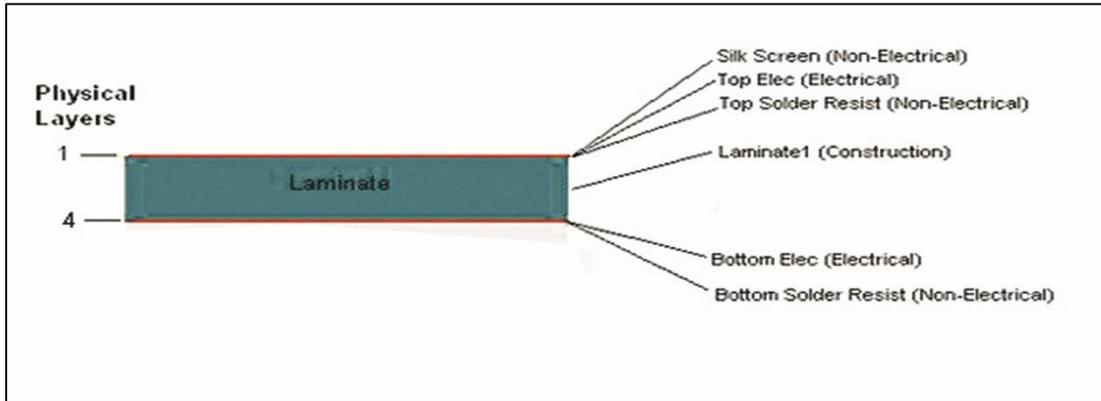


Figure I.12 : exemple de double face avec sérigraphie côté composant et vernis épargne sur les deux faces externes



Figure I.13 : La structure du PCB double face

• 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. Voir Figure I.14 [20].

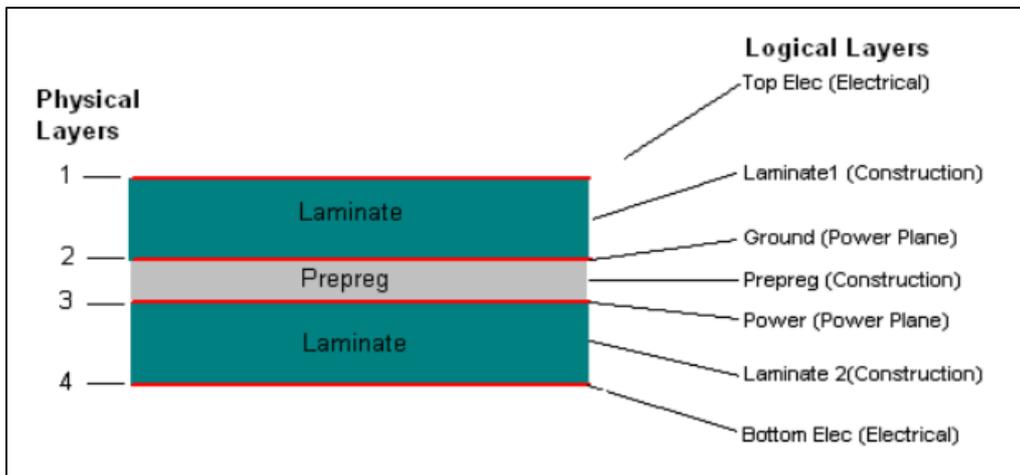


Figure I.14 : exemple de circuit à 4 couches ; deux couches de signal externes, et deux couches d'alimentation internes.

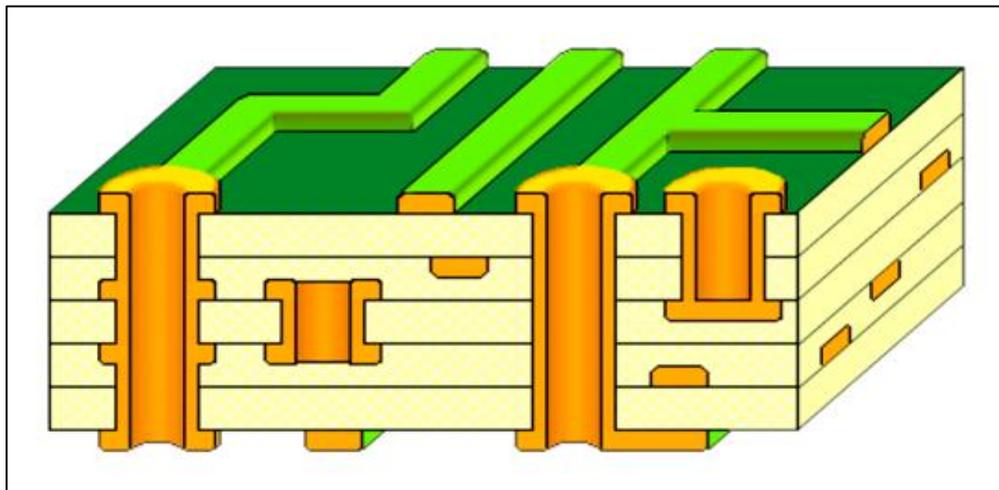


Figure I.15 : La structure du PCB multicouches

L'outillage (prix correspondant à la réalisation des films et le réglage des machines) nécessaire pour réaliser ce type de produit étant très coûteux, on réserve ces CI pour des applications où la densité d'implantation des composants et la complexité du routage l'exigent, en assurant une production en grande série pour rentabiliser l'outillage

Ci-dessous, un exemple de fabrication de cartes mère de PC sur la figure I.16 [20].

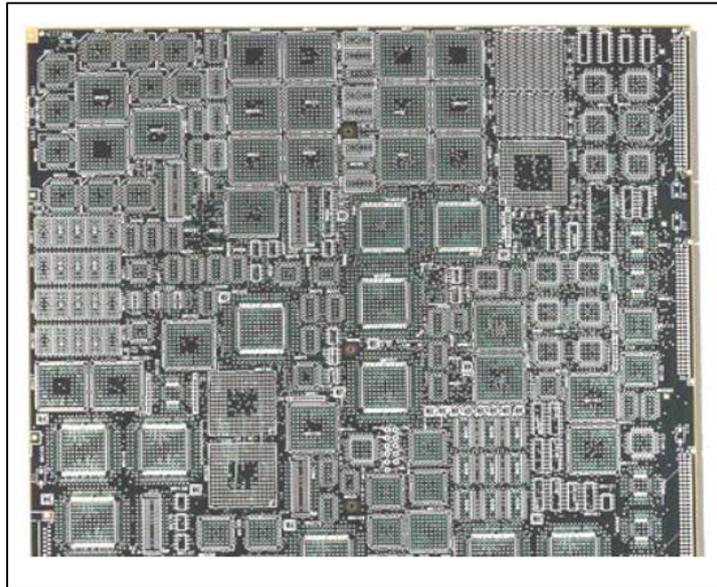


Figure I.16 : exemple de carte 16 couches à haute densité d'intégration

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 (RoHS) 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. [18].

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. [18].

- **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 [18].

- **Les séparations physiques**

Broyage et séparation gravimétrique

Il est tentant d'essayer de s'affranchir des difficultés liées aux matières organiques et aux fibres de verre. Des broyages successifs et des séparations par densité permettent de récupérer une fraction polymétallique.

Les acteurs du Sud-est asiatique installent des capacités assurant ce type de traitement. La raison essentielle est d'ordre réglementaire. En effet, l'exportation de ces matières est interdite, si un prétraitement n'a pas été effectué au préalable.

Mais cette technologie très économique est handicapée par une récupération insuffisante des métaux (de l'ordre de 80 %) et par la production d'un déchet ultime polluant (la fraction légère) dans lequel se concentrent les résines phénoliques, les plastiques bromés et chlorés, les

électrolytes et un reste de métaux lourds. La fraction métallique peut alors être traitée plus facilement, bien qu'elle soit encore accompagnée de résine et de plastique (mais à un taux inférieur à 10 %). Des broyeurs et des appareils de séparation gravimétrique spécifiques aux cartes électroniques fabriqués en Chine sont même mis en vente sur Internet !

Héritée des techniques minières, la séparation mécanique fait l'objet de nombreuses recherches. En broyant la matière plus finement (moins de 100 μ) de façon à libérer les métaux de la résine époxy, on améliore la teneur en métal (qui atteint alors 90 %).

Le traitement des résidus légers est un enjeu primordial sur le plan environnemental. Leur valorisation énergétique et la récupération par distillation du brome peuvent être des solutions possibles.

En France, la société Bigarren Bizzi conduit un projet de R&D sur ce sujet.

En Allemagne, la société Adamec a investi 15 millions d'euros (en 2010) dans une usine permettant ce type de valorisation, mais dont l'arrêt de l'activité est intervenu au bout de seulement trois ans. En effet, la quantité de polychlorobiphényles contenue dans la fraction légère des DEEE était incompatible avec les standards européens de mise en décharge et/ou d'incinération.

Enfin, quelques ateliers chinois utilisent actuellement cette technologie, n'étant pas soumis aux contraintes environnementales beaucoup plus strictes prévalant dans le monde occidental. [18]

- **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 à Hong Kong, avant d'être envoyés en Australie pour y être traités.

Le recours à l'hydrométallurgie pour dissoudre les soudures est plus sophistiqué. Plusieurs projets ont vu le jour, mais sans aboutir pour autant à une industrialisation (voir infra le paragraphe consacré à l'hydrométallurgie).

Des techniques de tri optique ont été envisagées, mais sans avoir jamais été mises en œuvre. [18]

- **la pyrolyse :**

La pyrolyse consiste à détruire les plastiques et les résines par évaporation et cracking thermique des vapeurs produites. L'avantage est d'obtenir une matière brute polymétallique beaucoup plus facile à traiter dans les fonderies de cuivre, et ce sans perte de métaux ni production de déchets ultimes. Les gaz sont produits en petite quantité, ils sont de ce fait faciles à traiter. La pyrolyse est donc un moyen qui permet d'améliorer les performances des fonderies de cuivre.

Terra Nova a développé ce procédé en installant en 2010 une unité de traitement d'une capacité de 30 kT/an dans le nord de la France pour un investissement inférieur à 20 millions d'euros. Le procédé est conduit à une température de 500°C, ce qui permet d'éviter la fusion des métaux et des fibres de verre.

La pyrolyse respecte donc les fibres de verre, mais en dépit de nombreux efforts de recherche, la société Terra Nova n'a encore jamais réussi à séparer de façon satisfaisante les fibres de verre des métaux.

En 2014 et 2015, les sociétés LS (en Corée) et GEM (en Chine) se sont équipées de four à pyrolyse utilisant une technologie inspirée de celle adoptée par Terra Nova.

Boliden (en Suède) a opté pour une pyrolyse à haute température (1 150°C). La réaction est dans ce cas très violente et peut aboutir à des instabilités dans le process. Cette voie engendre par ailleurs une scorie très pâteuse, ce qui ne permet pas d'aboutir à une bonne séparation. Cette mauvaise qualité de la scorie tient à la composition chimique des fibres de verre et à la présence d'aluminium. Un investissement de 140 M€ a été réalisé pour une capacité de traitement de 70 000 tonnes de DEEE par an.

Alternative à la pyrolyse, la solvolysse a été assez peu étudiée. Une thèse de doctorat soutenue à l'Université de Dijon est à ce jour la seule référence dont nous ayons connaissance. La difficulté de ce process réside dans la maîtrise des effluents liquides.

La société Panasonic a développé une technologie originale de pyrolyse fondée sur l'utilisation de granulés de dioxyde de titane portés à 500°C. Les cartes sont immergées dans ces granulés chauffés et brassées par des pales. Le dioxyde de titane étant un catalyseur d'oxydation, il n'y a pas de carbone résiduel. La carte ainsi débarrassée de ses plastiques et de ses résines est alors séparée du dioxyde de titane par tamisage. Une installation permettant de traiter 500 tonnes par an a été construite en 2010. Mais, à ce stade, le procédé n'est pas viable économiquement, en raison d'une forte consommation de dioxyde de titane (un produit coûteux).

Un projet de traitement sous eau en condition supercritique (pression de 250 bars et température de 600°C) fait actuellement l'objet d'un programme de recherche mené par un consortium dirigé par la société TND et regroupant le BRGM, le CNRS et la société Separex. Ce projet prometteur au stade du laboratoire est lauréat de la phase 2 du concours mondial pour l'innovation et est en train de passer au stade de démonstrateur. L'avantage de cette technologie est qu'elle réduit en poudre les fibres de verre, rendant ainsi la phase suivante, celle de la séparation, beaucoup plus performante. Un rendement métal de 98 % est ainsi atteint. [18].

- **La pyrométallurgie :**

Le métal le plus présent dans les cartes électroniques est le cuivre. Les fondeurs de cuivre ont donc été logiquement les premiers à traiter des cartes électroniques, et ce depuis plus de 20 ans.

Neuf fonderies dans le monde se sont équipées pour pouvoir traiter de façon satisfaisante sur le plan environnemental cette nouvelle matière première (quatre au Japon, trois en Europe, une au Canada, et une autre en Corée).

Le processus technologique d'une fonderie de cuivre comporte deux étapes principales :

- une fusion à une température de l'ordre de 1 100°C, qui produit des gaz, une scorie et un cuivre impur (elle peut être éventuellement suivie d'une étape d'oxydation à chaud permettant d'améliorer la pureté du cuivre),
- un raffinage par électrolyse qui permet de produire, d'un côté, des cathodes de cuivre pur et, de l'autre, des boues contenant les métaux précieux.

Cette technologie a été inventée afin de traiter des minerais naturels essentiellement constitués de sulfures de cuivre. L'adaptation nécessaire au traitement des cartes électroniques est coûteuse en investissement et requiert une grande expertise métallurgique. L'investissement d'adaptation par tonne de matière traitée est de l'ordre de 2 à 5 000 euros par an (Natureo Finance).

Par ailleurs, les gaz et l'énergie résultant de la présence de plastiques et de résines dans les cartes électroniques limitent à 10 % de l'entrant la proportion de cartes que peut traiter un four. Au-delà de cette valeur, le four devient instable. Les métaux rares sont donc dilués dans un flux de matière important et sont, par conséquent, difficiles à récupérer. Alors que le cuivre et les métaux précieux sont très bien récupérés (à hauteur de 98 %), la rigidité du procédé ne permet pas toujours de récupérer les « petits métaux », comme l'étain, le nickel ou le tantale.

La pyrométallurgie ne permet pas à ce jour de traiter exclusivement des cartes électroniques. Outre les problèmes liés à la présence de produits organiques, le contenu en aluminium, en

céramique et en fibres de verre des cartes conduit à des scories difficilement fusibles. Afin d'obtenir une scorie fluide en traitant exclusivement des cartes, il faut en effet atteindre une température supérieure à 1 500°C. La société Scanarc (en Suède) a réalisé des essais, mais sans atteindre un résultat satisfaisant à ce stade.

La société Morphosis (au Havre) développe un programme de R&D utilisant la technologie plasma pour traiter directement et exclusivement des cartes électroniques. Ce projet a été lauréat du concours mondial pour l'innovation (phase 2). [18].

- **L'hydrométallurgie :**

L'acide process :

Largement utilisée en Inde, en Chine et de façon plus sporadique en Afrique en raison de son faible coût d'investissement, la dissolution de l'or présent dans les contacts des cartes électroniques permet de traiter à petite échelle et dans des conditions très médiocres lesdites cartes. Plusieurs variantes techniques sont utilisées : cyanuration, attaque à l'eau régale, utilisation du mercure. La récupération des métaux n'excède pas 60 % et s'opère dans des conditions environnementales et sanitaires désastreuses. Toutefois, mieux organisé, ce procédé pourrait permettre de garder dans les pays d'origine une partie significative de la valeur des cartes, tout en évitant les graves problèmes sanitaires et environnementaux qu'elle génère. [18]

La R&D en hydrométallurgie :

Peut-on améliorer ce traitement par les acides, l'« acid process » ? De nombreux essais d'hydrométallurgie directe ont été tentés au cours des quinze dernières années. Toutes ces tentatives se sont heurtées à la production de déchets ultimes en quantités considérables et à la nécessité d'utiliser de grosses quantités de réactifs. Si la récupération des métaux est théoriquement excellente, l'impact environnemental de ces techniques les disqualifie totalement à ce jour.

Les premiers travaux ont été réalisés en 2000 par une équipe de scientifiques anglais dans le cadre d'un programme (d'une durée de cinq ans) conduit conjointement par Cambridge et par The London Imperial College. La technologie utilisait l'acide fluoroborique pour dissoudre les soudures étain-plomb et libérer ainsi les composants électroniques de leur support.

L'idée était de pouvoir recycler certains de ces composants. Cependant, leur obsolescence rapide faisait que la rentabilité de ce procédé était improbable. La deuxième étape consistait à utiliser l'eau régale (un mélange d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique) pour extraire les métaux précieux. Mais la présence d'aluminium et de fer entraînait une consommation d'acide

excessive et une production très importante de résidus ultimes. Enfin, le palladium et le tantale étaient mal récupérés. Le programme a donc été abandonné.

Un projet très voisin a été conduit par la société italienne Engitec aboutissant à la construction d'une usine pilote en 2008. Mais ce projet a lui aussi été abandonné.

La société Managem (au Maroc) connue pour son expertise en hydrométallurgie a tenté une approche fondée sur l'acide sulfurique afin d'extraire le cuivre en premier, puis les autres métaux. Là encore, le projet n'a pas abouti.

En Angleterre, Itrimex (en partenariat avec Ultromex) conduit des essais de récupération de l'étain des cartes électroniques en utilisant l'acide fluoroborique ou l'acide fluorosilicique (ce programme est financé à hauteur de 550 000 £).

ATMI (aux États-Unis) a développé un procédé comparable à celui de Cambridge et a construit une unité pilote, qu'elle cherche à commercialiser.

Terra Nova, dans le cadre du projet SISENVA, a exploré les procédés hydrométallurgiques permettant de récupérer l'ensemble des métaux à partir de la matière issue de la pyrolyse.

Enfin, un nouveau programme de recherche a été lancé en 2015 au Royaume-Uni, il est doté d'un financement de 500 k£. [18].

I.10 Conclusion :

Le traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) est un enjeu crucial de notre époque en raison de la croissance rapide de la technologie et de l'obsolescence programmée des appareils 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

Chapitre 2 : Séparation électrostatique

II.1 Introduction

Le recyclage des déchets industriels devient une activité de plus en plus importante du fait de l'augmentation de quantité d'équipements électriques en fin de vie. Ces déchets contenant des matériaux conducteurs et isolants de différentes natures, recycler et éliminer ces déchets de manière sûre et respectueuse de l'environnement. Les équipements de traitement des déchets électriques et électroniques (DEEE) jouent un rôle crucial dans la gestion de ces déchets en permettant la récupération des matériaux précieux et la réduction des déchets qui finissent dans les décharges. Il fallait trouver des moyens de les séparer. Parmi les solutions envisagées, la séparation électrostatique s'est avéré une solution adéquate : propre et avec une faible consommation d'énergie, elle assure une bonne récupération des matériaux avec une pureté élevée.

II.2 Installation des séparateurs électrostatique:

II.2.1 Séparation électrostatique des DEEE :

Plusieurs directives internationales et européennes ont été élaborées afin de contrôler la gestion de ces déchets. Elles imposaient leur collecte sélective, le traitement des substances dangereuses qu'ils contenaient, et préconisent également la réutilisation, le recyclage et la valorisation des autres matières [22]. Ces directives visent à restreindre, voir à interdire l'utilisation de substances dangereuses dans les EEE. Elles ont pour objectif d'obliger au remplacement de ces substances par des produits plus respectueux de l'environnement tout en garantissant au moins le même niveau de protection du consommateur. L'objectif est de promouvoir la valorisation des DEEE dans le sens où les EEE doivent être conçus et fabriqués de manière à faciliter leur démantèlement et de favoriser la réutilisation et le recyclage plutôt que leur destruction.

La gestion des déchets doit être améliorée par la mise en place de collectes sélectives et d'un traitement adapté des DEEE en séparant certains composants, tout en évitant la dispersion des substances dangereuses. C'est aux producteurs (fabricants, vendeurs, revendeurs et importateurs) d'être responsables (Responsabilité Etendue du Producteur REP) de la collecte, du traitement et de la valorisation des DEEE. La quantité des DEEE devait également être réduite.

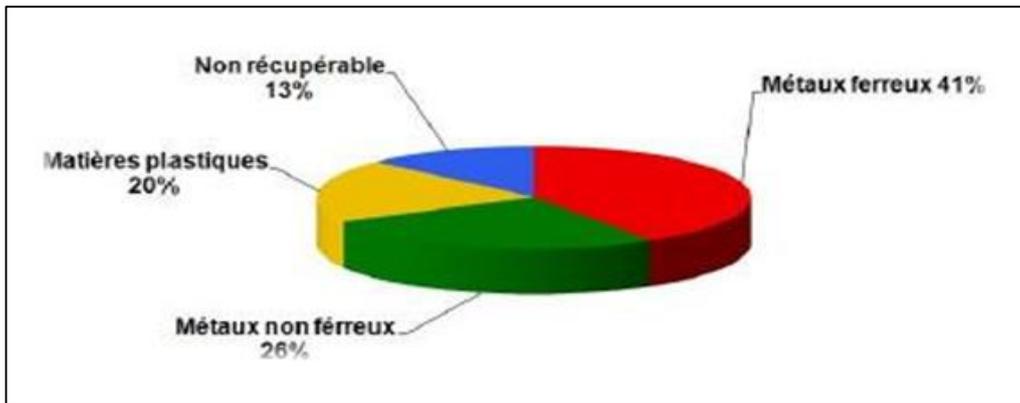


Figure II.1 : Type et protection de matériaux existant dans les DEEE

II.2.2 La charge électrique

La séparation électrostatique d'un mélange de matériaux pulvérulents est possible si les constituants de celui-ci portent des charges électriques différentes. Ces charges peuvent être générées par un ou plusieurs des trois mécanismes physiques différents [24-25]. Il s'agit de l'effet couronne, de l'induction électrostatique et de l'effet tribo-électrique.

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) : $[q] = C$ [26]

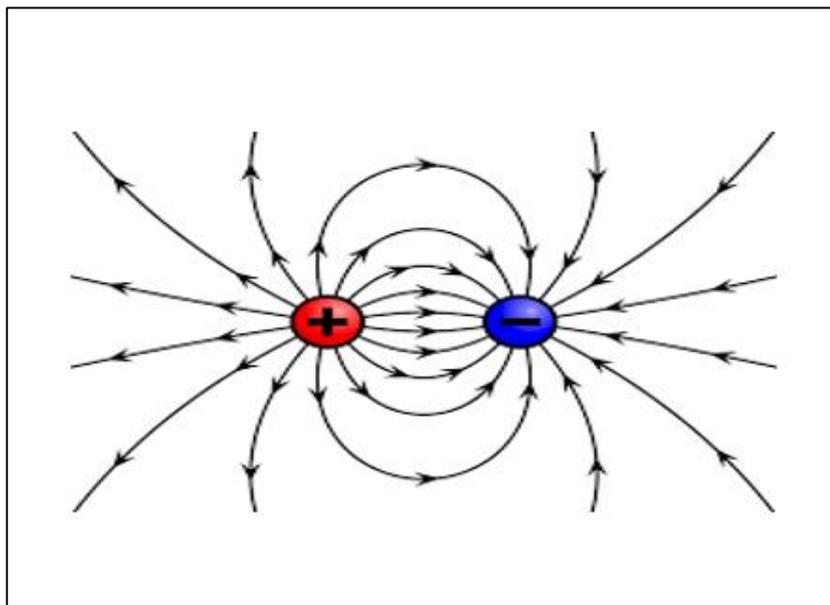


Figure II.2 : Charge électrique

II.2.3 Le champ électrique :

Le champ électrique est une zone d'influence invisible qui s'étend autour d'une charge électrique. L'intensité du champ électrique augmente en s'approchant d'une charge électrique et elle diminue en s'en éloignant.

Le **champ électrique** est la région de l'espace où une charge électrique peut en influencer une autre.

On représente un champ électrique à l'aide de flèches infinies appelées lignes de champ électrique. La direction des lignes de champ électrique indique la direction du mouvement qu'aurait une particule positive placée dans ce champ électrique.

Dans les images suivantes, on représente le champ électrique autour de particules chargées et le champ électrique autour de plaques chargées. [27]

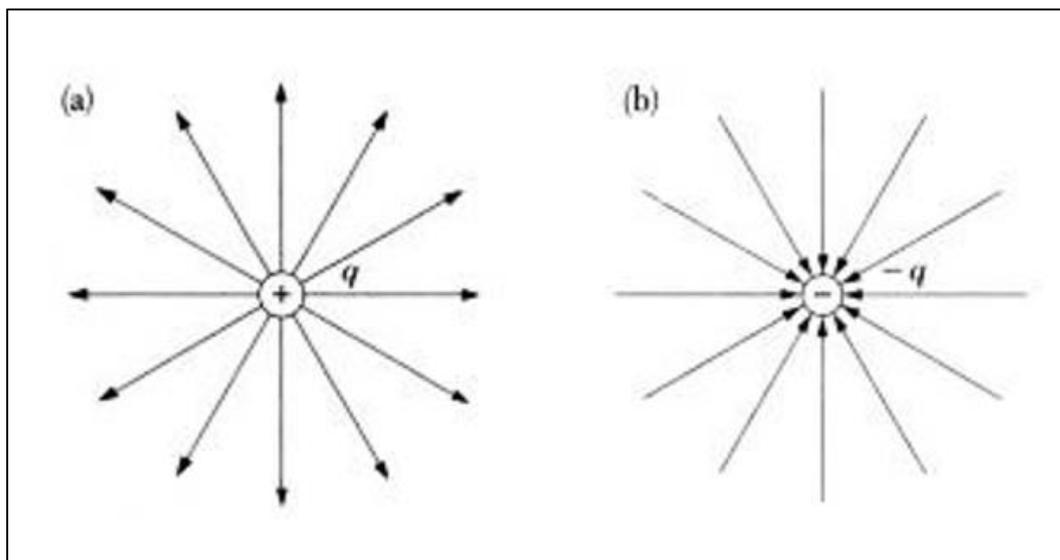


Figure II.3 : Lignes de champ électrique produites par une charge ponctuelle.

Les traits foncés sont des petits morceaux de fils en suspension dans de l'huile.

Les fils s'alignent selon le champ électrique produit par un petit conducteur chargé placé au Centre.

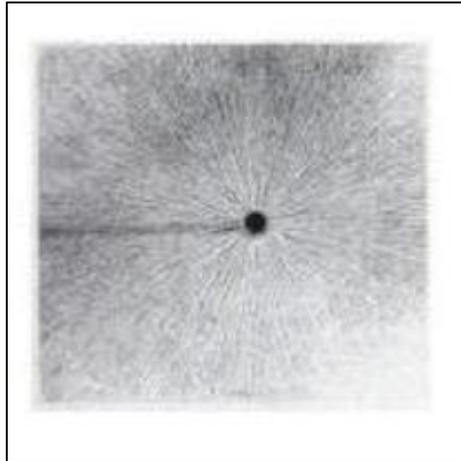


Figure II.4 : Les lignes d'un champ électrique produit par une seule charge.
(Gracieuse de Harold M. Waage, de l'Université Princeton)

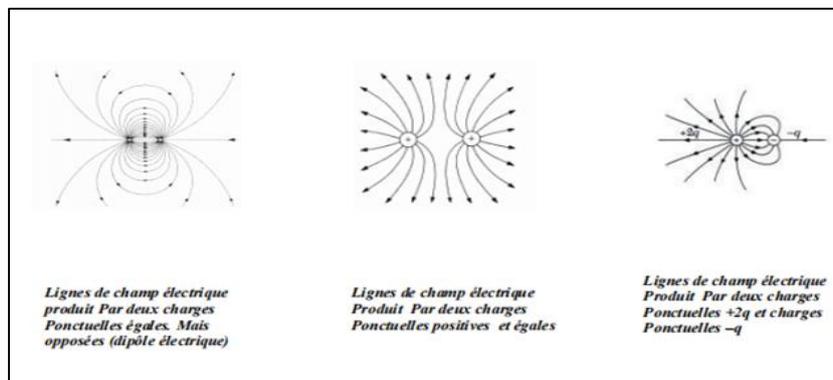


Figure II.5 : Lignes de champ électrique produit par deux charges ponctuelles.

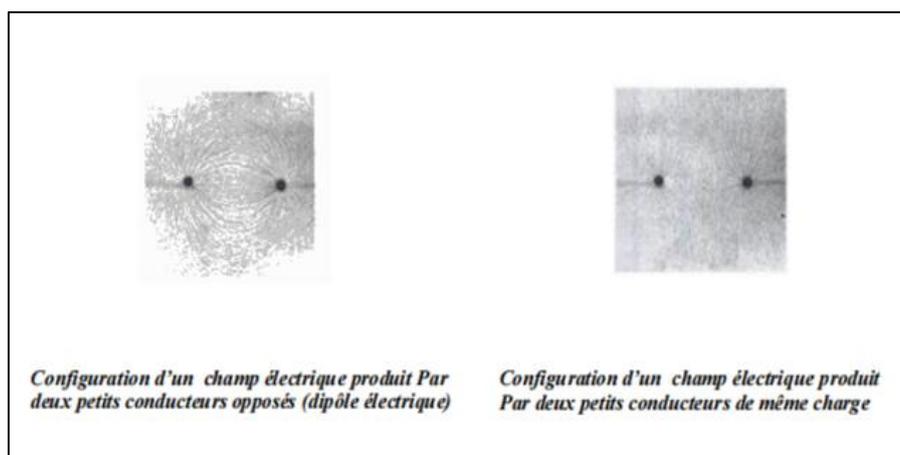


Figure II.6 : Lignes de champ électrique produit par deux petits conducteurs.
(Gracieuse de Harold M. Waage, de l'Université Princeton)

II.2.4 La force électrique:

Charles-Augustin de Coulomb découvre expérimentalement l'expression de la force électrique qui s'exerce sur deux charges électriques immobiles disposées sur des sphères.

Coulomb réalise que le module de la force électrique dépend des paramètres suivants :

- La force électrique est proportionnelle au produit des deux charges q_1 et q_2 en attraction ou en répulsion.
- La force électrique est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les deux charges $1/r^2$.
- La force électrique est proportionnelle à une constante k afin d'évaluer la force électrique en newton.

L'expression scalaire de la loi de Coulomb en électrostatique est donnée par : [28]

$$F_e = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

Où :

F_e : Force électrique en newton (N) ;

q_1 : première charge qui applique la force électrique sur la deuxième charge en coulomb (C) ;

q_2 : deuxième charge qui applique la force électrique sur la première charge en coulomb (C) ;

r : distance entre les deux charges ponctuelles en mètre (m) :

k : Constante de la loi de Coulomb, $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} 9.109 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ et ϵ_0 étant la permittivité du vide

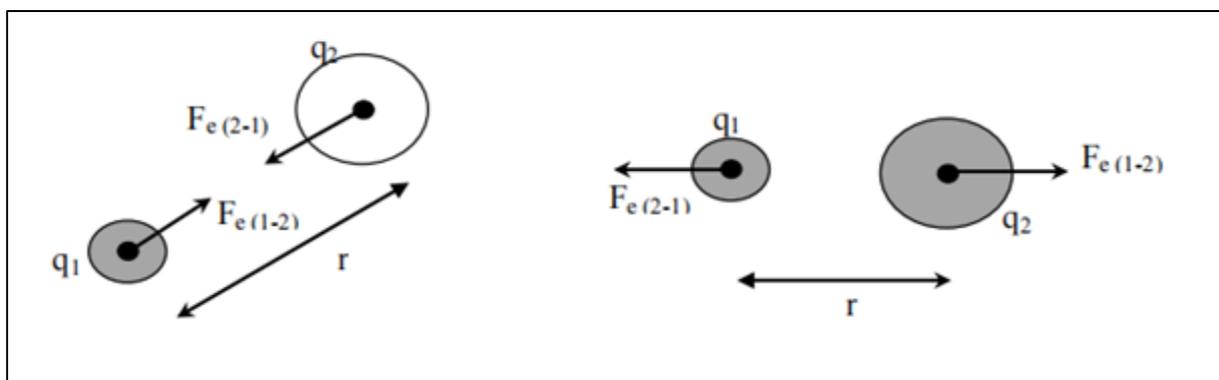


Figure II.7 : Force de coulomb entre deux sphères chargées
 (a) : attraction, charges de signes contraires ($q_1 q_2 < 0$)
 (b) : répulsion, charges de signes semblables ($q_1 q_2 > 0$)

II.3 Installations de séparation électrostatique :

II.3.1 Dispositifs de séparateur tribo électrostatiques :

La séparation Tribo-électrostatique implique le chargement de particules par contact ou frottement avec les autres particules ou avec une surface du contact. Alors les particules chargées traversent un champ électrique qui sépare ces particules d'après la magnitude et le signe de leur charge [29]. À cause des caractéristiques physiques différentes, le signe de charge acquise par les particules est différent. Ceci permet la séparation des produits.

Le tri des matériaux granulaires et de particules fines dans les séparateurs tribo-électrostatiques est produit par les forces qui agissent sur les particules qui sont déjà chargées.

Multiples installations destinées à la séparation électrostatique des matériaux granulaires plastiques par la tribo-électrification ont été réalisées. Le commun entre ces dispositifs est la nécessité d'avoir deux parties successives, la première celle de chargement triboélectrique des granules et même des particules fines, et l'autre destinée à leur séparation. On distingue les prototypes suivants :

a) Séparateur tribo-électrique à tapis roulant:

Le schéma de la (Figure II.8) explique le fonctionnement d'un séparateur triboélectrique à tapis roulant TBS (Tribocharged Belt Separator). Les particules sont tribo-électrisées par un dispositif de chargement tribo-électrostatique, puis elles tombent sur un tapis roulant et sont transportées vers la région de séparation. Une électrode haute tension attire les particules d'une polarité et repousse les particules de polarité opposée grâce aux forces électriques d'attraction et de répulsion, permettant ainsi la séparation [30].

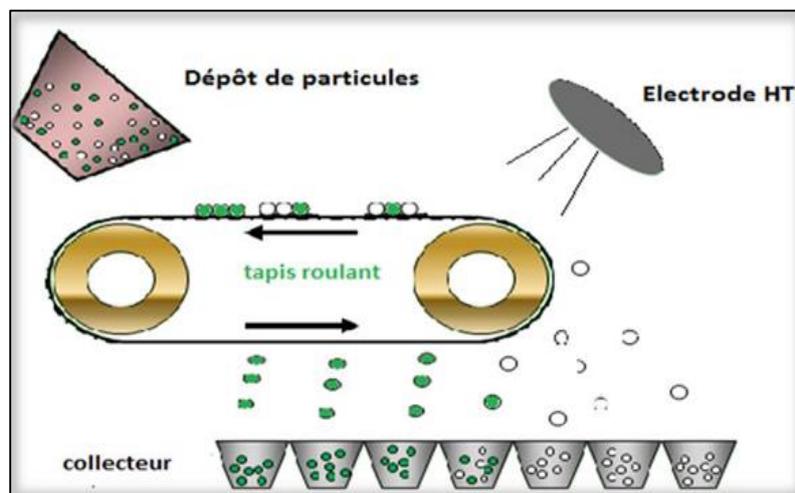
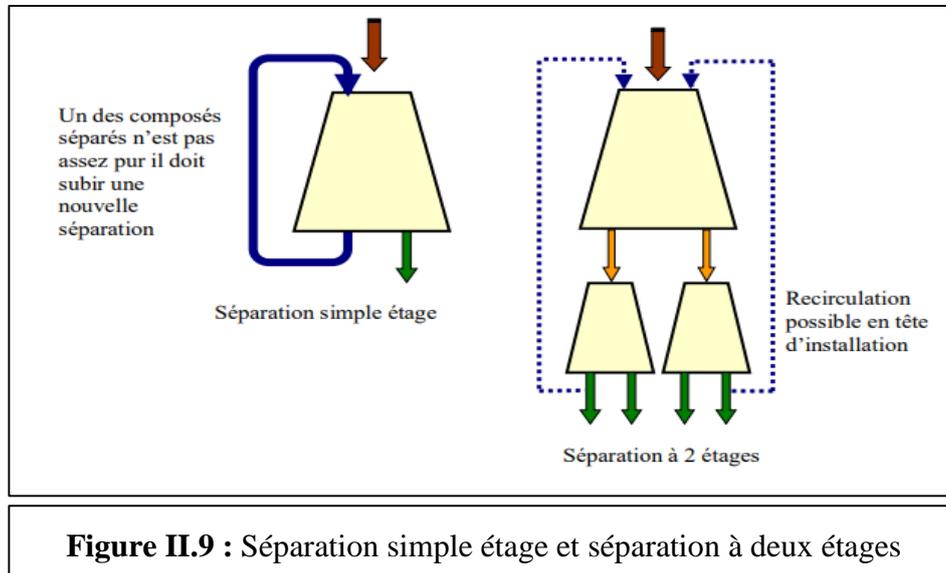


Figure II.8 : Dispositif de séparation à tapis roulant.

II.3.2 Types de séparation triboélectrique :

Il existe deux systèmes de séparation : La séparation simple étage à un seul séparateur et la séparation bi-étagée à trois séparateurs.



Le second type a une capacité double de traitement car il n'a quasiment pas besoin de recirculation pour assurer la pureté de ses produits de séparations.

a) Séparateur tribo-électrique à chute libre:

Les particules granulaires sont chargées par cylindre tournant où les particules entrent d'un côté du tambour et sortent de l'autre côté totalement chargées. A l'intérieur les particules sont en collision quand le tambour tourne à une certaine vitesse comme l'explique la figure II.10 qui résume le fonctionnement d'un séparateur triboélectrique à cylindre tournant :

Un flux de particules plastiques propre, sec et broyé est introduit dans un tambour rotatif. La rotation du tambour provoque la culbute des particules qui se chargent par contacts répétés : c'est le phénomène de triboélectricité.

Les particules chargées entrent ensuite dans un fort champ électrique horizontal produit entre deux électrodes soumises à haute tension de polarité opposée. Les particules chargées sont alors déviées dans leur chute suite au champ intense qu'elles traversent et chaque type de matériau prend un côté dans les bacs de récupération. Les granules chargées positivement sont attirées vers l'électrode négative, et contrairement, les granules chargées négativement sont attirées vers l'électrode positive. Les produits purifiés tombent près de l'électrode positive et de l'électrode négative, alors que les produits neutres tombent dans le bac du milieu [30].

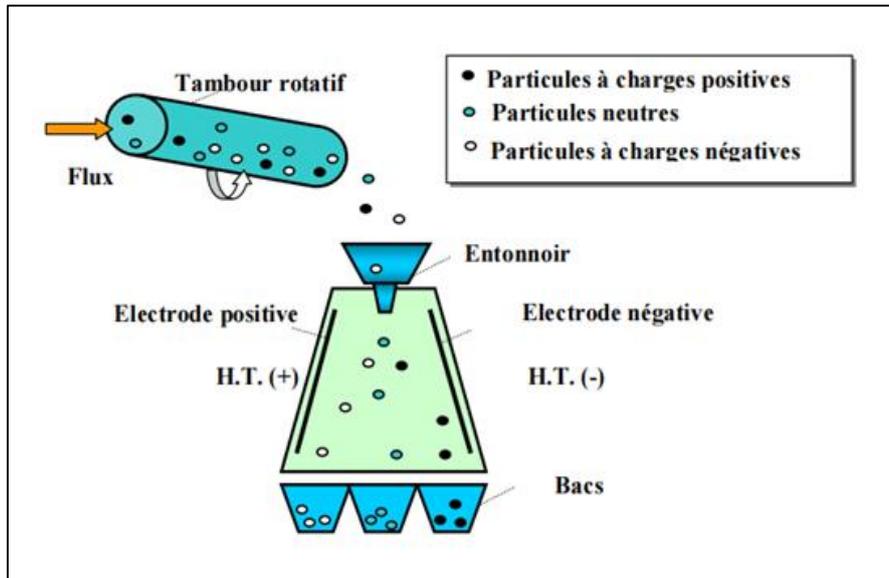


Figure II.10 : Dispositif de séparation à chute libre avec chargement triboélectrique par cylindre tournant.



Figure II.11 : Photographie de dispositif de Séparation Triboélectrique à chute libre
« Séparateur triboélectrique des matériaux plastiques »
(Réalisé au laboratoire IRECOM de l'université Sidi Bel Abbas)

b) Séparateur tribo-électrostatique à tambour :

Ce dispositif consacré à la séparation des particules fines. En premier lieu les particules sont disposées dans la chambre de fluidisation. Elles entrent en collisions entre elles et entre les parois de la chambre sous l'effet de l'air comprimé du souffleur, ce qui provoque leur chargement. Donc elles acquièrent deux charges de signe opposé.

Ces particules sont soumises à un champ électrique intense, produit entre les deux électrodes métalliques ayant une forme cylindrique, reliées à deux sources de haute tension ayant des polarités opposées. Les particules chargées négativement sont attirées vers l'électrode positive et vis-versa.

Les cylindres métalliques servent en même temps d'électrodes et de moyen de transport des particules chargées et séparée vers la zone de récupération

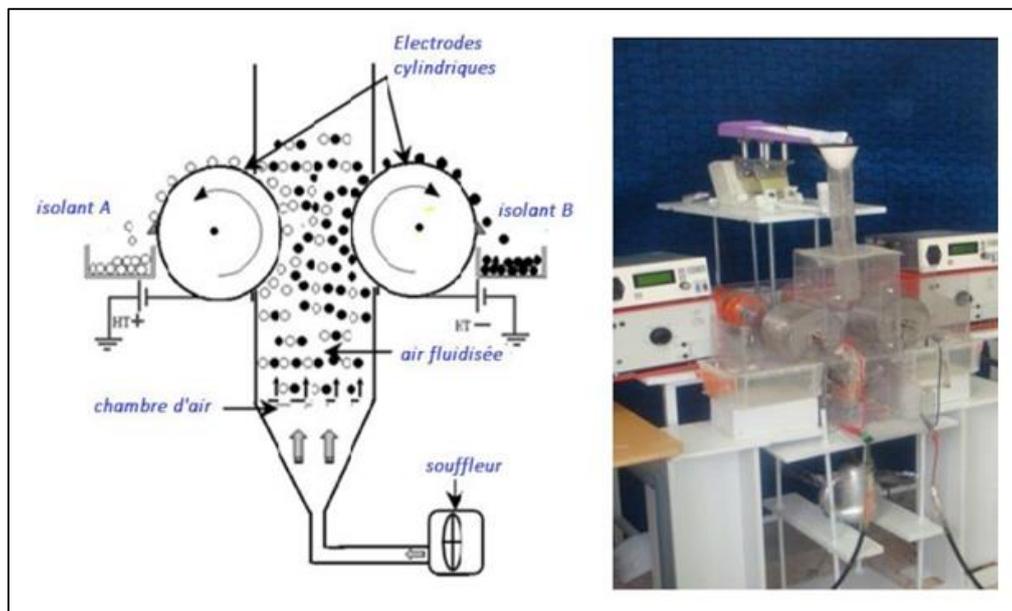


Figure II.12 : Représentation schématique d'un séparateur tribo_électrostatique à tambours transporteurs.

II.3.3 Avantages de la séparation triboélectrique :

- La séparation triboélectrique est un procédé à sec, sans aucun additif.
- Entièrement automatique, le procédé est continu.
- Le séparateur triboélectrique permet d'obtenir des fractions d'une grande pureté pouvant dépasser les 99,5 % [32].
- La consommation d'énergie est faible.

- Les réglages ou la maintenance en cas de changement de flux de déchets entrants se fait sans problème (faible main-d'œuvre requise et facilité d'emploi).
- Le séparateur triboélectrique ne génère aucune émission.
- La séparation triboélectrique est une technologie éprouvée et propre.

II.3.4 Inconvénients de la séparation triboélectrique :

- La séparation triboélectrique requiert des étapes importantes de préparation : broyage, dépoussiérage, lavage et séchage.
- Plusieurs passages sont parfois nécessaires pour obtenir la pureté désirée.
- Pour que la séparation se passe bien, il faut que le Ratio du mélange de plastiques soit optimal.
- La matière doit avoir une granulométrie fine et homogène. Selon les appareils, les granulés doivent avoir une taille inférieure à 1,5 mm ou comprise entre 2 à 10 mm, un broyage préalable est donc nécessaire [33].
- La matière doit être sèche : Le taux d'humidité (relative) du flux entrant doit être inférieur à **50%**.
- La matière doit être propre : un dépoussiérage, voir un lavage du flux entrant est parfois nécessaire.
- Le temps de chargement : les différents tests effectués ont permis de caractériser un temps de chargement optimal en fonction du matériau et de sa taille [34].
- La tension des électrodes : La tension des électrodes doit aussi être réglée pour une séparation optimum sachant que cette valeur est fonction des matériaux à trier.

II.4 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.

II.4.1 Séparateur tribo-Aero-électrostatique à électrodes verticales

Un nouveau séparateur Tribo-électrostatique de particules micronisées à électrodes plaques en mouvement « va-et-vient » est réalisé au sein du Laboratoire APELEC de l'université de Sidi Bel Abbés dont le procédé de chargement triboélectrique est à base d'un lit fluidisé.

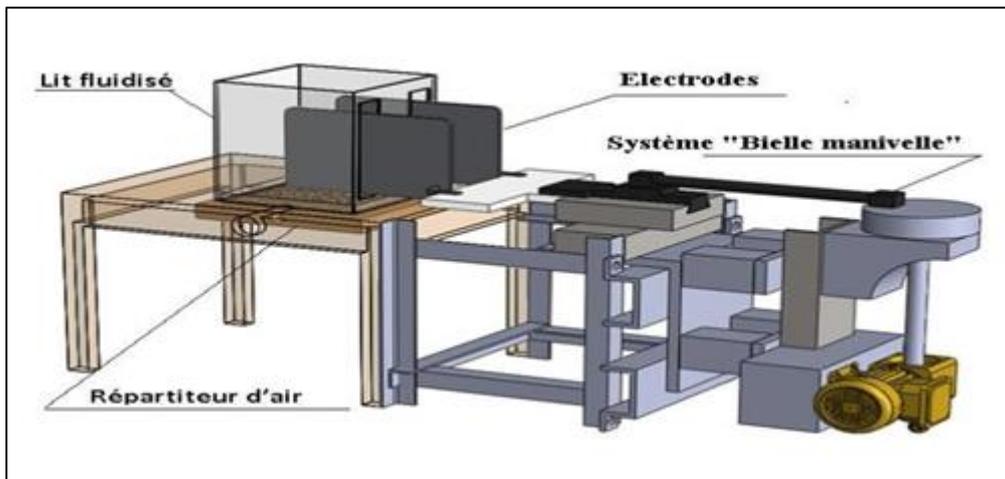


Figure I.13 : Schéma descriptif global de séparateur à deux électrodes plaques en mouvement vertical

Ce dispositif offre la possibilité de varier plusieurs paramètres afin de permettre l'étude de l'influence de chacun d'eux sur le rendement de la séparation en mouvement vertical et horizontal, ce qui fait de lui un banc d'essai de laboratoire important. Pour atteindre une séparation d'un mélange composé de particules fines isolantes de taille micronisée, en premier temps il est nécessaire de charger par un dispositif d'acquisition de charge électrique par effet triboélectrique en utilisant un lit fluidisé, puis la seconde étape de séparation est obtenue à l'aide du champ électrique appliqué entre deux électrodes plaques parallèles par l'intermédiaire des sources de haute tension comme le montre le schéma descriptif global de système pour les deux mouvements (figure II.13).

II.4.2 Séparateur tribo-Aero-électrostatique à disques tournants:

Ce dispositif a été réalisé pour effectuer les premières expériences de séparation du type triboélectrique de particules de taille fines au sein du laboratoire APELEC de l'université DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES. [35]

Deux disques métalliques sont montés séparément, chacun sur son arbre en téflon, qui est successivement fixé à leur tour sur l'arbre d'un moteur électrique asynchrone, l'arbre étant maintenu par deux paliers. Les deux disques sont plongés en partie dans un lit de mélange de particules issus de matériaux différents ; le mélange de particules est déposé sur un support qui est un tamis à mailles très fines, ne laissant passer que l'air et empêchant le mélange de tomber.

Le produit poudreux granulaire à trier est introduit à l'intérieur du dispositif à travers la partie supérieure de la chambre de séparation. Un flux d'air généré par un compresseur

et entrant à travers une ouverture située en dessous du lit fluidisé provoquant la fluidisation, le flux d'air doit être délivré avec un débit déterminé. Les disques qui sont reliés à deux alimentations de haute tension de polarités opposées, soulèvent lors de leur rotation les particules chargées.

Des balais sont utilisés pour récupérer les particules collées aux disques. Un collecteur comprenant deux compartiments, un pour chaque type de produit collecté après leur séparation

A travers toutes les expériences effectuées, l'équipement primordial est le séparateur triboélectrique à deux disques tournants.

La séparation d'un mélange granulaire isolant, de taille de dizaine de micromètre, en premier temps par le dispositif d'acquisition de charge électrique par effet triboélectrique,



Figure II.14 : Photographie du séparateur tribo-électrostatique à deux disques tournant

Ensuite une séparation grâce à la force d'attraction électrostatique des particules vers les électrodes de charges opposées à leurs charges acquises [36].

Ce dispositif de séparation à lit fluidisé a été conçu au sein du laboratoire APELEC de l'université «DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES ».

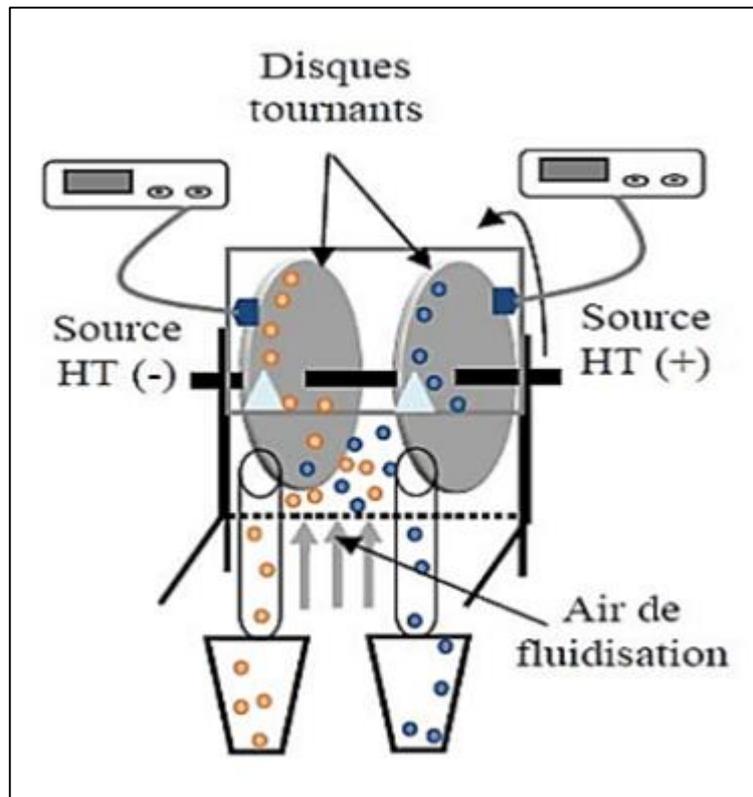


Figure II.15 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-Aero-électrostatique à disques tournants

- **Principe de fonctionnement :**

Les particules se chargent dans le lit fluidisé. Les disques tournants qui sont reliés à deux sources hautes tension de polarité opposée attirent les particules contrairement polarisées. Des ballais sont utilisés pour récupérer les particules collées aux disques vers le collecteur.

Tableau II.1 : Caractéristiques d'un séparateur à deux disques tournants

Installation	Utilisation	Dimensions [m]	Type de mélange	Taille des particules	Mode de chargement
séparateur tribo-aero électrostatique à disques tournants	- Prototype de laboratoire - Prototype semi-industriel	1,8 m × 0,8 m × 0,6	Isolant-Isolant	Micronisé (50 µm à 1000 µm)	Effet triboélectrique

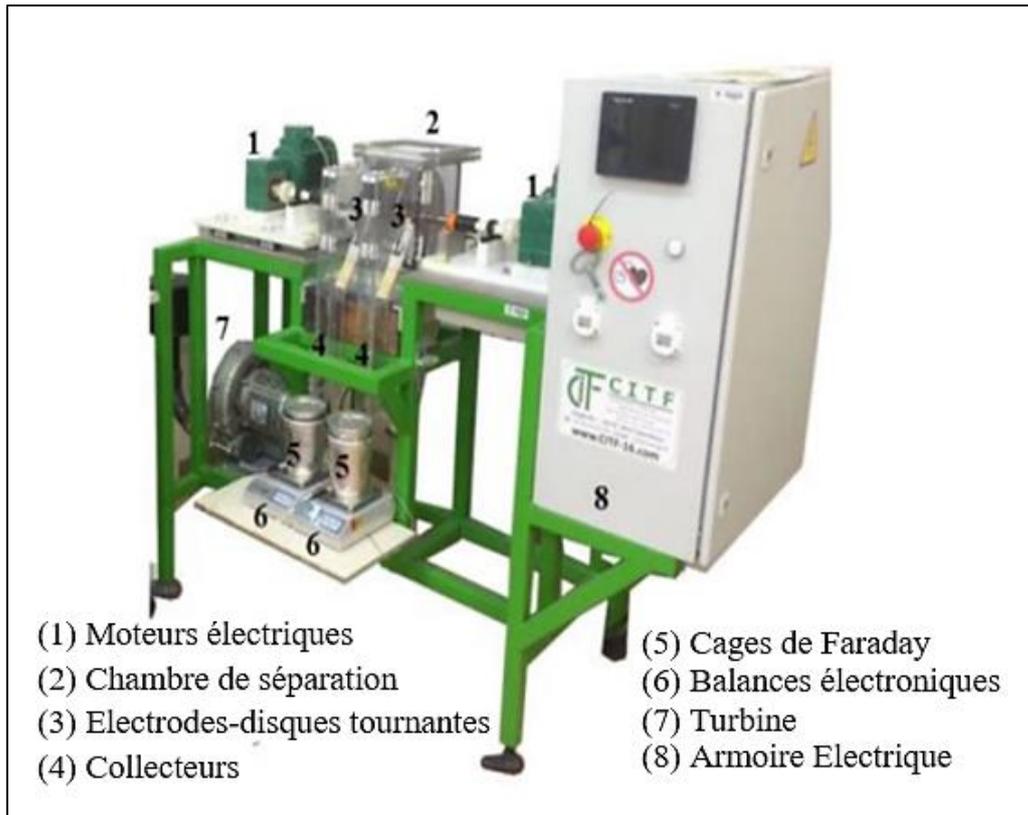


Figure II.16 : Photographie d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques

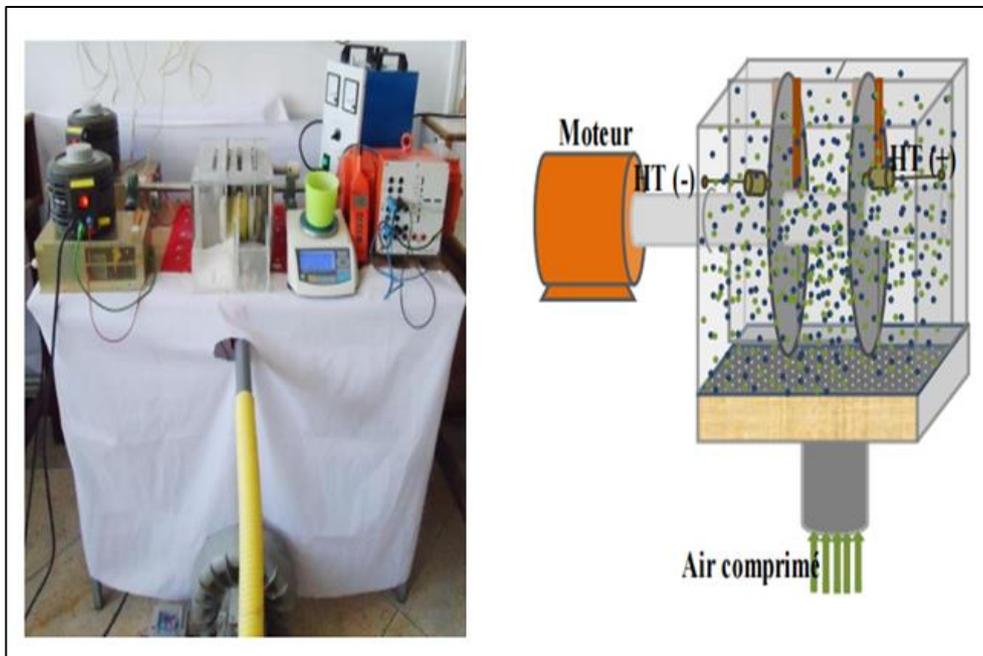


Figure II.17 : Photographie et schéma d'un séparateur triboélectrique à disques tournants réalisé au laboratoire IRECOM de Sidi Bel-Abbes.

II.4.3 Séparateur tribo-Aero-électrostatique à deux bandes transporteuses:

Les électrodes qui vont attirer la matière granulaire fluidisée sont deux bandes transporteuses du tapis roulant, elles sont à base d'une matière conductrice (Figure II-18). Elles s'appuient sur Les tambours isolants. Leur entrainement est assuré par des moteurs triphasés alternatifs, commandés par des variateurs de fréquence. Les particules chargées collent sur la surface des bandes contrairement polarisées, pour être transportées vers la zone de récupération [30].

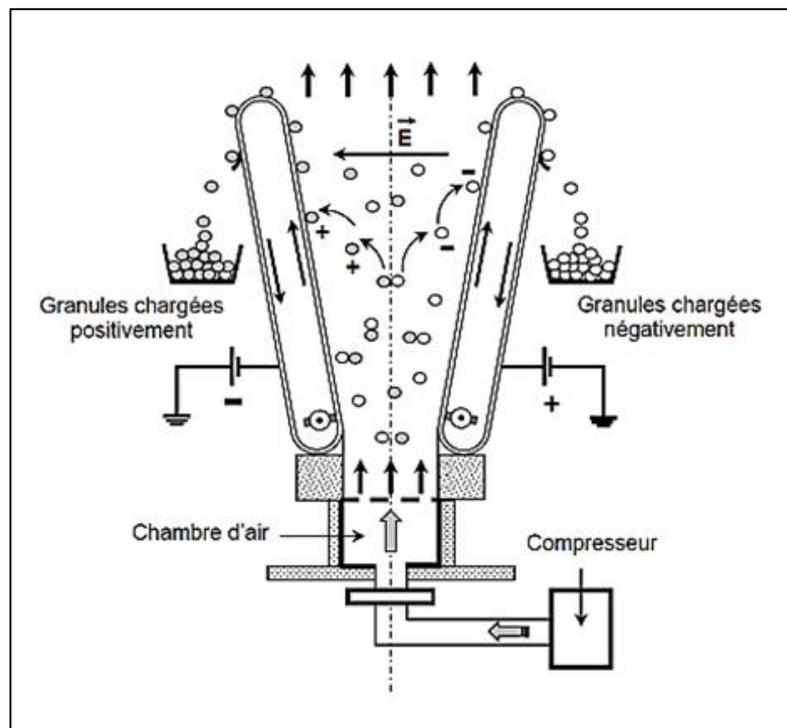


Figure II.18 : représentation schématique d'un séparateur tribo-aero-electrostatique a deux bandes transporteuses

- **Principe de fonctionnement :**

Les granules chargés dans le lit fluidisé sont attirés par les convoyeurs et collés à la surface de la bande métallique de ces derniers par les forces électriques. La rotation des convoyeurs conduit ces particules jusqu'à des bacs de récupération prévus à cet effet.

Tableau II.2 : Caractéristiques du séparateur à bandes transporteuses

Installation	Utilisation	Dimensions [m]	Type de mélange	Taille des particules	Mode de chargement
séparateur tribo-aero électrostatique à disques tournants	- Prototype de laboratoire - Prototype semi-industriel	1,8 m × 0,8 m × 0,6	Isolant-Isolant	Micronisé (50 µm à 1000 µm)	Effet triboélectrique

II.4.4 Séparateur tribo-Aero-électrostatique à deux étages :

L'installation est composée de deux étages superposés, détachables, attachés à un même support vertical (Figure II.19). Le séparateur tribo-Aero-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 [37-38].

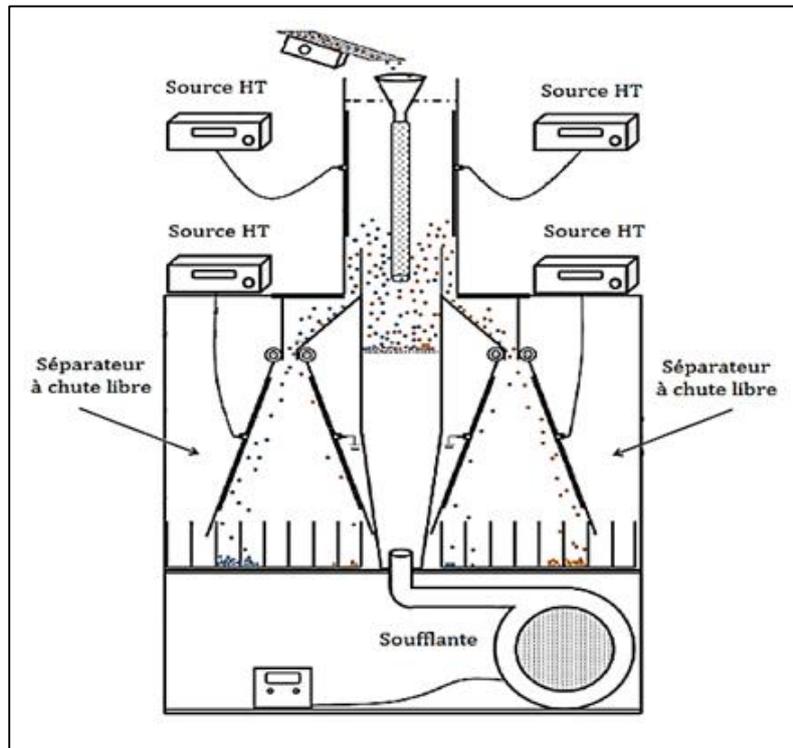


Figure II.19 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages

II.5 La séparation magnétique :

Un séparateur magnétique est un appareil qui modifie les caractéristiques du champ magnétique dans l'espace du traitement engendrant en particulier un champ magnétique agissant de façon sélective sur les corps qui présentent la plus grande aptitude à l'aimantation à travers une force magnétique figure II.20 et figures II.21 [40-41].

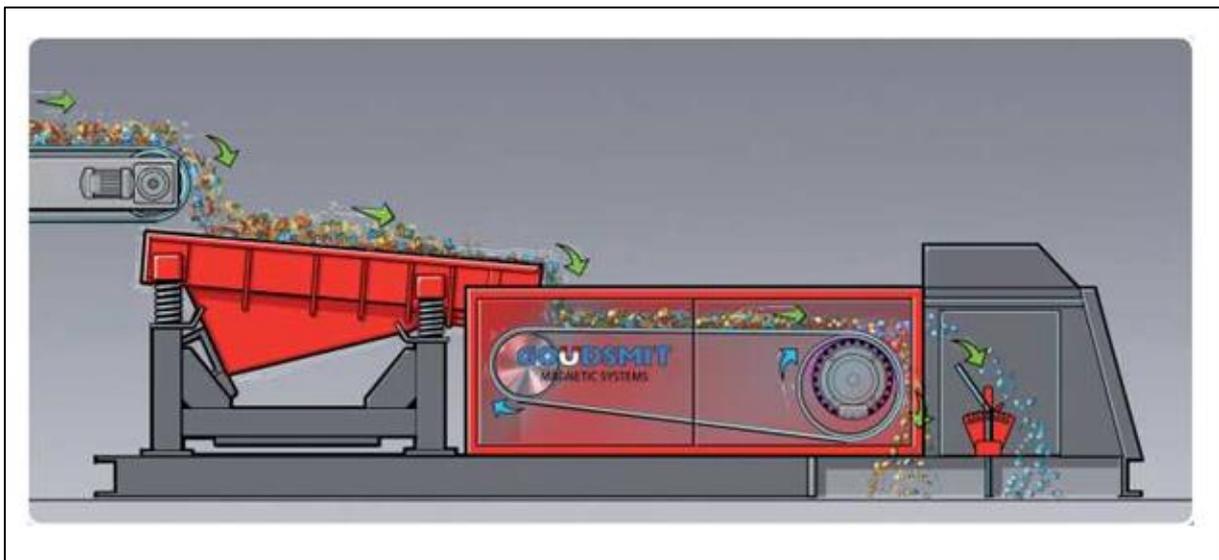


Figure II.20 : Chaîne de séparation magnétique

➤ Principe de base

Un champ magnétique est une région de l'espace où une force magnétique fait sentir son influence. Sous l'effet d'un champ magnétique H , les corps vont réagir de différentes façons dépendamment s'ils sont :

Diamagnétique : la matière répond par un champ magnétique opposé à celui qui lui est appliqué, ce qui annule son effet.

- Paramagnétiques : la matière répond par une aimantation dirigée vers le même sens que celui du champ H , ce qui l'attire vers les pôles.

- Ferromagnétiques : s'aimantent fortement sous l'effet d'un champ magnétique [42].

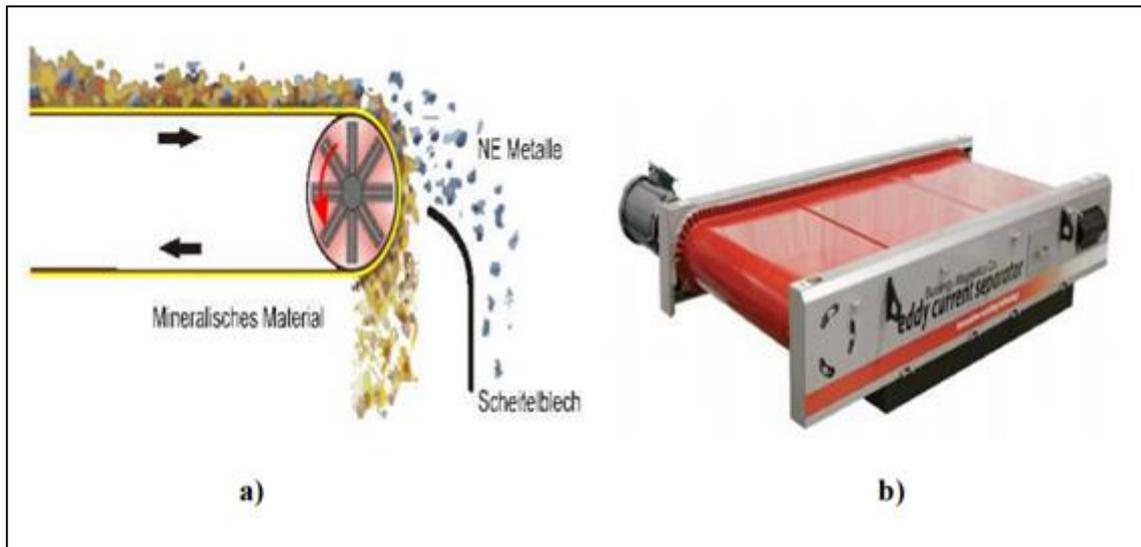


Figure II.21 : Séparateur magnétique

- **Le tambour** : Élément cylindrique pour courroie d'entraînement. Ce tambour est relié à une poulie pour transmettre la rotation du moteur.
- **Le tambour magnétique** : Le tambour est situé à l'extrémité du séparateur et contient un ensemble d'aimants pour séparer en continu les particules ferromagnétiques du flux de matières.
- **Le tapis**: Une courroie est un appareil de transport qui permet le déplacement continu de matériaux. Il s'agit essentiellement d'une bande de matériau flexible entraînée par un rouleau motorisé.
- **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.
- **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.

II.6 Conclusions :

Les phénomènes tribo-électriques sont extrêmement complexes et mal expliqués, et sont influencés par plusieurs facteurs externes et internes. Plusieurs travaux de recherche ont été effectués sur des dispositifs de chargement triboélectrique et des séparateurs triboélectriques des déchets d'équipements électrique et électronique, dont l'efficacité a déjà été prouvée pour des applications particulières.

Les séparateurs triboélectriques à lit fluidisé apportent beaucoup d'avantages à la séparation électrostatiques des mélanges granulaires isolants. Ce type d'installation est particulier, le fait qu'il combine le chargement des particules et leur séparation en régime continu.

Chapitre III :
**Étude expérimentale d'un séparateur
électrostatique a tambour**

Chapitre 3 : Étude expérimentale d'un séparateur électrostatique à tambour

III.1 Introduction :

Le séparateur de tambour est un équipement industriel utilisé pour séparer les matériaux en fonction de la taille et de la densité. C'est un tambour rotatif perforé qui déplace les matériaux à travers les trous en fonction de leur taille, traitant efficacement divers matériaux comme les déchets, les minéraux et les produits agricoles. Il est largement utilisé dans des industries telles que l'agriculture, l'exploitation minière et le recyclage, offrant une solution efficace pour trier les matériaux en fonction de leurs caractéristiques physiques, optimiser les processus de production et réduire les coûts.

III.2 Description du dispositif :

Les techniques électrostatiques ont été largement utilisées pour la séparation à sec de petites particules offrant une large différence de conductivité [43-44]. La séparation électrostatique est un terme générique donné à une importante classe de technologies de traitement de matériel, largement utilisée pour le triage des mélanges granulaires grâce à des forces électriques agissant sur des particules chargées ou polarisées [45]. L'électro-séparateur à tambour tournant, utilisant la décharge couronne pour charger les granules, permet de séparer un mélange granulaire isolant-métal (PVC-Cuivre, par exemple) avec une pureté qui peut atteindre des valeurs de 100%. [46]

Le séparateur à tambour [47], illustré sur la (Figure III.1), est le modèle le plus utilisé. Il est composé de trois électrodes, dont deux électrodes sont connectées à une génératrice haute tension et une électrode cylindrique tournante est reliée à la terre. [48]



Figure III.1 : séparateur couronne-électrostatique à tambour

III.2.1 Principe de fonctionnement :

Son principe de fonctionnement consiste à la création de charges électriques par ionisation de l'air grâce à une électrode couronne. Ainsi les granules déposés par le vibro-transporteur sur le cylindre tournant (tambour) acquièrent une charge électrique de même polarité que la haute tension appliquée.

Les particules non-conductrices, chargées par effet couronne, sont collées à la surface du tambour sous l'effet de la force électrique et la force d'image.

Les granules conducteurs perdent rapidement leurs charges à travers le tambour relié à la terre, en arrivant dans la zone du champ électrostatique généré par l'électrode statique de forme elliptique, ils acquièrent par induction électrique une charge de polarité opposée à la haute tension appliquée. Ils sont ensuite attirés par l'électrode elliptique et déposés dans la partie droite du collecteur. [48]

La figure III.2 montre les différents éléments composant le séparateur et le rôle de chacun d'eux

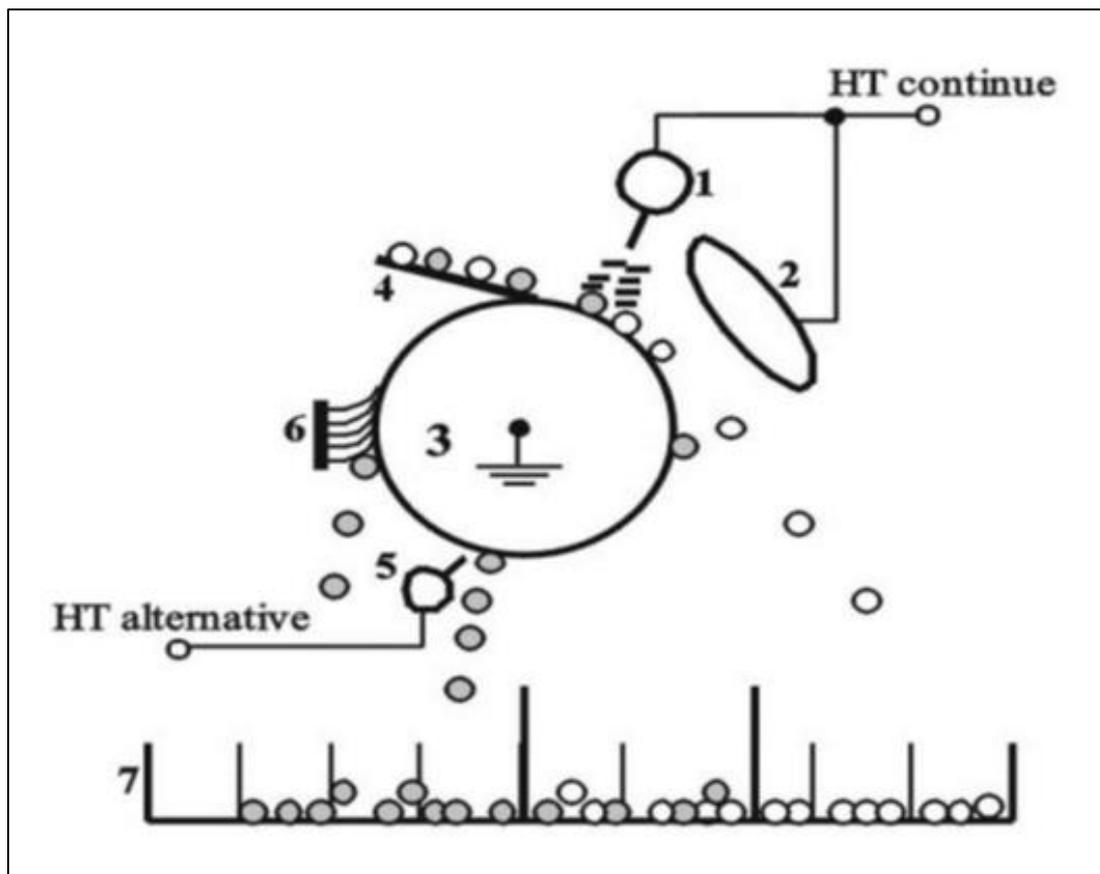


Figure III.2 : Schéma descriptif de l'électro-séparateur et ses éléments constitutifs

Des charges électriques sont créées par ionisation de l'air grâce à la décharge couronne générée par l'électrode à pointes (1), appelée électrode couronne. Les granules déposés sur le cylindre tournant (3) par le vibro-transporteur (4) acquièrent tous une charge électrique de même signe que le potentiel de la haute tension continue, et se comportent différemment suivant qu'ils sont électriquement conducteurs ou isolants.

1/ Les granules isolants restent "collés" et adhèrent à la surface du tambour grâce à la force d'image électrique. Ils tombent dans la partie du collecteur (7) qui leur est réservée lorsque la force de pesanteur l'emporte sur la force d'image. Pour assurer la chute de ces particules, certains électro-séparateurs sont équipés d'une autre électrode à pointes, appelée électrode de neutralisation (5), pour éliminer la charge q par neutralisation. Les particules qui ne tombent pas et qui restent "collées" sont éliminées de la surface du tambour par une brosse (6).

2/ Les granules conducteurs perdent rapidement la charge à travers le cylindre relié à la terre, en arrivant dans la zone du champ électrostatique généré par l'électrode statique de forme elliptique (2). Ils acquièrent par induction électrostatique une charge de signe opposé au potentiel de la haute tension, et sont ensuite attirés par l'électrode elliptique et collectés dans la partie droite du collecteur.

Dans tous les cas, le produit granulaire à séparer est déposé sur la surface de l'électrode cylindrique reliée à la terre, qui l'introduit dans la zone du champ électrique.

Deux mécanismes de charge sont simultanément employés: "bombardement ionique" et "induction électrostatique". Le premier est destiné aux particules isolantes seulement, passant à travers la décharge couronne; le deuxième concerne seulement les particules conductrices en contact avec le tambour en présence d'un champ électrique externe, à savoir le champ électrostatique généré par l'électrode elliptique [49].

III.2.2 Paramètres influents du séparateur :

Les paramètres influençant du séparateur sont rassemblés dans le tableau III.1 et la figure III.3. Quelques-uns de ces paramètres sont fixés au départ, lors de la conception de l'appareil, comme par exemple: type et position du vibro-transporteur, position du collecteur, nombre d'électrodes, forme de la tension. Généralement, l'étude de la séparation est basée sur la variation de 4 paramètres importants à savoir, le niveau et la polarité de la haute tension appliquée, la vitesse de rotation du tambour, le débit du vibro-transporteur et la température du produit granulaire [50-51].

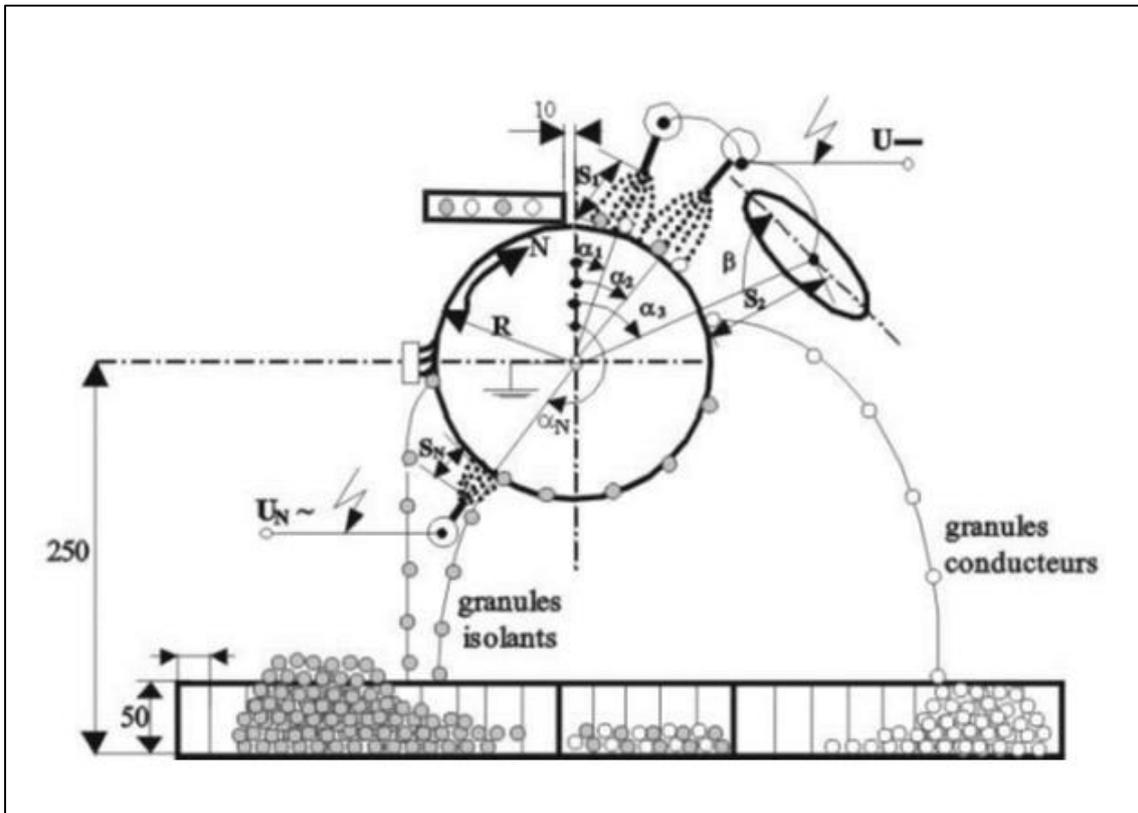


Figure III.3: Paramètres et variables dans un processus de séparation électrostatique.

Tableau III.1 : Paramètres variables du processus

Mécaniques	produit	ambiance	électriques
-Vibor-transporteur *type *position *débit - Cylindre *rayon *vitesse - Collecteur *type *position	- Conductivité des particules - Forme et dimensions des particules - Densité volumique des particules	Température Humidité Poussière	Electrodes actives *type *position *nombre Electrode de neutralisation *type *position Haute tension *forme de la tension *polarité *niveau

III.2.3- Le Séparateur Electrostatique de Mélanges Granulaires SELMEG

III.3.1 Description:

Le Séparateur Electrostatique de Mélanges Granulaires SELMEG, est un modèle de laboratoire, et contrairement à l'électro-séparateur industriel, il doit en plus offrir des possibilités de réglage de plusieurs paramètres afin d'étudier l'influence de chacun d'eux sur les rendements de la séparation pour différents types de mélanges granulaires. Le SELMEG tel que conçu possède les particularités suivantes :

- La possibilité d'utiliser deux tambours de diamètres différents ;
- Vitesse de rotation du tambour variable ;
- Position de l'entonnoir réglable ;
- Position du vibro-transporteur réglable ;
- Position de la brosse réglable ;
- Positions radiales et angulaires des électrodes hautes tension réglables.

Le SELMEG comprend dans sa conception trois parties distinctes (Fig. III.4) :

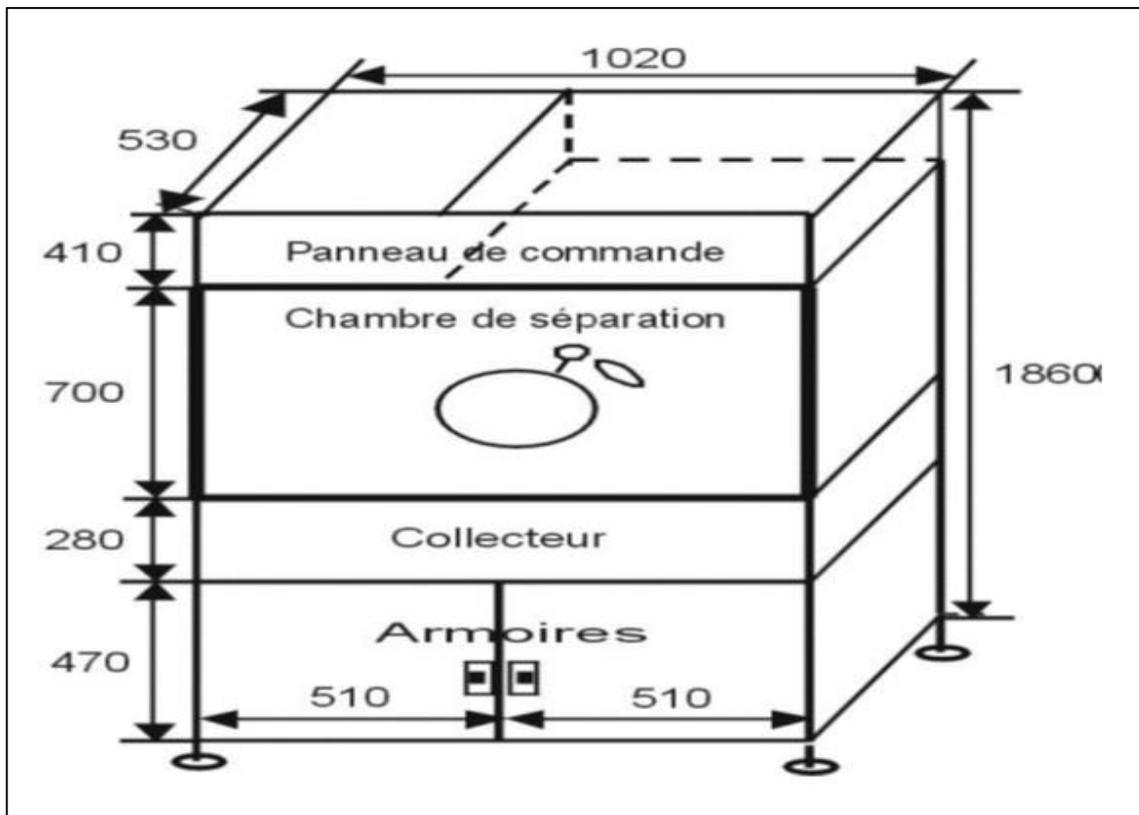


Figure III.4 : Schéma global du SELMEG.

- Une chambre de séparation où sont traités les mélanges granulaires, c'est la partie la plus importante ;
- Un panneau de commande des différents éléments ;
- Un collecteur de récupération des particules.

III.3.2 chambre de séparation du SELMEG :

La figure III.5 montre la partie la plus importante de l'appareil, en l'occurrence la chambre de séparation où s'effectue le triage des mélanges granulaires.

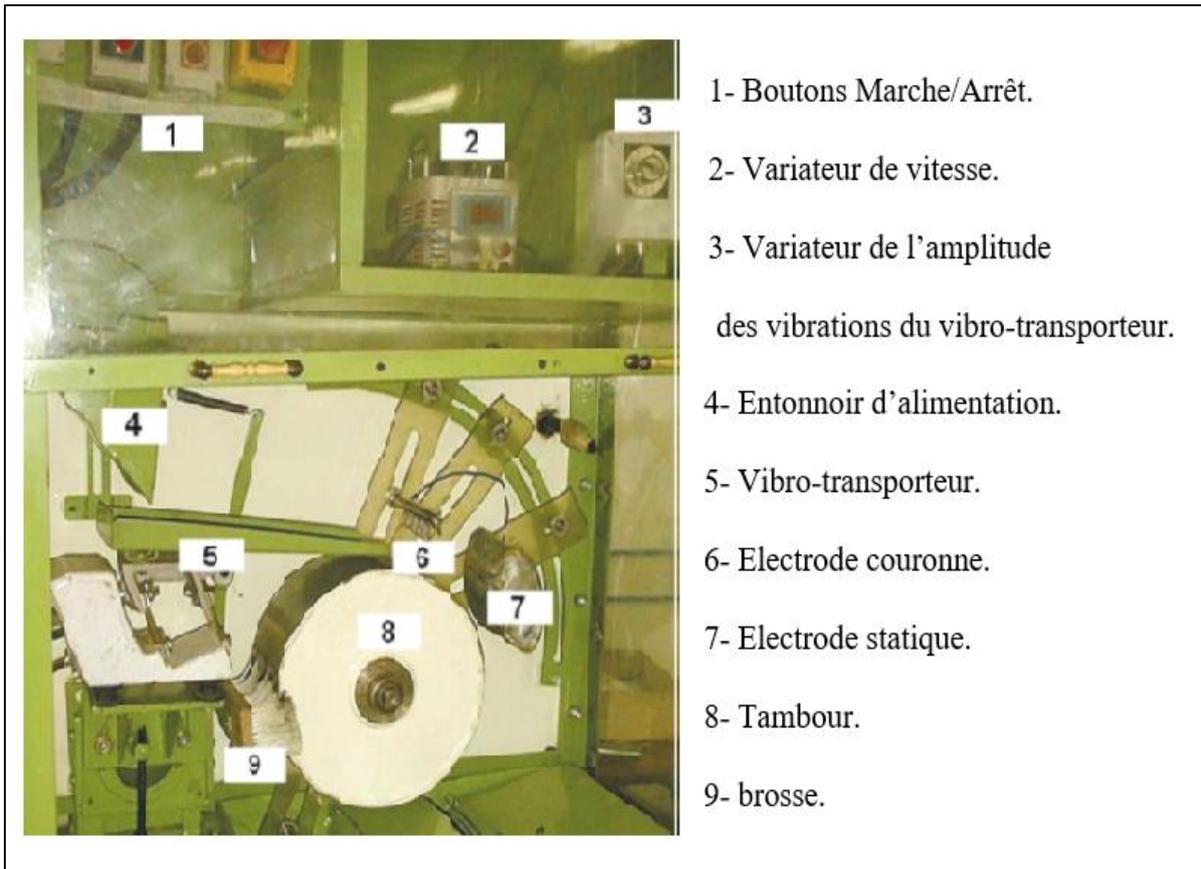


Figure III.5 : Photographie de la chambre de séparation du SELMEG

III.4 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 tamisé avec un tamis de 1mm. La photographie montre le mélange quand vas utiliser dans tous les essais qui vont suivre.



Figure III.6 : Photographie du mélange granulaire

III.5 Broyeur :

Afin de recycler les cartes électroniques des téléviseurs à tube cathodique, c'est été 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)



Figure III.7 : Le Broyeur

III.6 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 (Fig. III.8).



Figure III.8 : Photographie du tamiseur FRITSCH

III.7 Spectrométrie de fluorescence X

Des essais préliminaires ont été effectués pour tester la performance du séparateur à tambour pour le mélange granulaire provenant des cartes électroniques des téléviseurs à tube cathodiques broyés et tamisés.

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.

III.7.1 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.

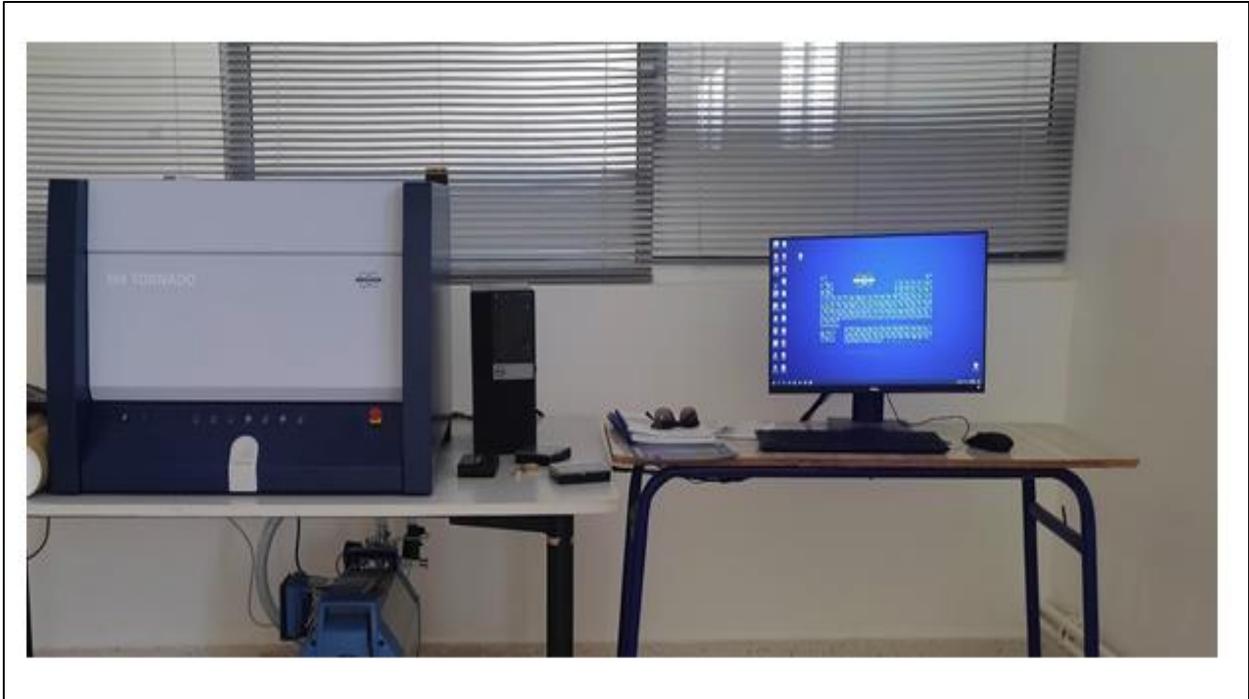


Figure III.9 : Spectromètre à Micro fluorescence X compact de type M4 TORNADO

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 micro-XRF 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.

III.7.2 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.

III.7.3 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

$$E = h c / \lambda$$

Où :

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

c la vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^8$ 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 :

La séparation électrostatique des matières granulées est une technologie non conventionnelle utilisée dans l'industrie du recyclage, dont le développement est fortement influencé par les règlements environnementaux. L'étude révèle l'importance de cette technologie, en particulier dans l'industrie du recyclage, car elle peut améliorer l'efficacité en minimisant les pertes de métaux grâce au mélange en plastique. La quantité de cuivre récupérée par ce processus dépasse 80 % par rapport à la masse perdue du cuivre. Cependant, la séparation électrostatique ne peut pas remplacer la sécrétion mécanique, qui traite de grandes quantités de matériaux, par rapport à l'électro-séparation, qui prend généralement plusieurs centaines de kg par heure. La combinaison d'un ou de plusieurs séparateurs électriques pour le traitement des déchets avec du cuivre lourd est une solution prometteuse du point de vue technique, économique et environnemental.

Chapitre VI : Résultats expérimentales et discussion

Chapitre 4 : Résultats expérimentales et discussion

VI.1 Introduction

L'étude expérimentale impliquerait la mise en place d'un séparateur à tambour 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).

VI.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 séparés à partir du séparateur à tambour.

b) Spectromètre de fluorescence : Après on utilise 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

Le tableau périodique des éléments chimiques est présenté avec des légendes de couleur indiquant les types d'analyse :

- Éléments analysés par nos appareils :** Éléments représentés en bleu foncé.
- Éléments analysés par nos appareils associés à un détecteur DVI (DCLIN) :** Éléments représentés en orange.

Les éléments analysés par nos appareils (bleu foncé) incluent : H, He, Li, Be, B, C, N, O, F, Ne, Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ar, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Kr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Xe, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Fr, Ra, Ac, Th, Pa, U, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Lr.

Les éléments analysés par nos appareils associés à un détecteur DVI (DCLIN) (orange) incluent : Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, Ar.

Figure VI.1 : Tableau périodique des éléments chimiques

VI.3 Résultats expérimentaux et discussions

Les paramètres variables du processus de séparation électrostatique par tambour peuvent être d'ordre mécanique (vibro-transporteur, cylindre et collecteur), matériel (conductivité des particules, forme et taille des particules, densité apparente), forme et la taille des particules, (densité apparente), environnementaux (température, humidité et poussière) et électriques (électrode active, électrode de neutralisation et haute tension) [53].

La figure VI.2 montre le mécanisme de décharge des particules dans le champ de décharge corona. Dans le champ de décharge corona. Avec l'augmentation de la tension entre les électrodes, il se produit une ionisation intense par choc de gaz avec l'apparition de l'électrode couronne, puis elle diminue de plus en plus avec le champ électrique. Diminue de plus en plus avec l'intensité du champ électrique dans la direction de l'électrode conductrice [54].

La charge d'une particule augmente jusqu'à ce que les ions ne se couplent plus entre eux. Avec l'augmentation du temps de charge et du nombre d'ions déposés sur la particule, l'augmentation de l'intensité du champ créée par la particule chargée est dirigée vers l'électrode conductrice.

Lorsque ces intensités deviennent égales, la particule cesse de recevoir de nouveaux ions. Elle cesse donc de se charger. À ce moment-là, la particule a la charge maximale possible [55].

Les essais d'enrichissement par séparation électrostatique ont été réalisés dans le laboratoire d'applications du plasma, de l'électrostatique et de compatibilité électromagnétique de l'Université de Sidi Bel Abbes, avec les paramètres suivants

1. Type d'électrode active : Fil-électrode avec une position $\alpha_1=10^\circ$
2. Type d'électrode de neutralisation : électrode statique avec une position de $\alpha_2=45^\circ$
3. Tension électrique : Variable.
4. Vitesse de rotation du rouleau : Variable.
5. Taille des particules : 0,125 mm.
6. Température : 25 °C.
7. Humidité : 2 %.
8. Rayon du rouleau : 15 cm et les vanes de séparation sont réglées de manière à ce que le produit initial soit divisé en produits conducteurs et non conducteurs.

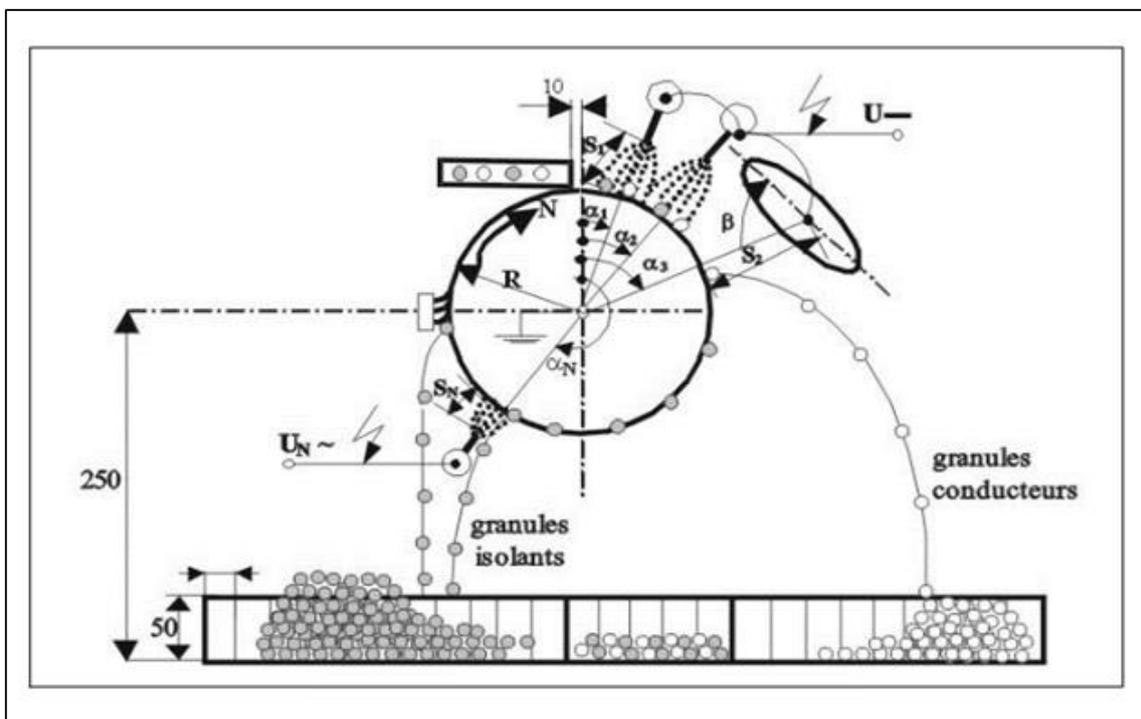


Figure VI.2: Paramètres et variables dans un processus de séparation électrostatique.

D'après les essais effectués par séparation électrostatique avec effet corona, il ressort du tableau VI.1 que les meilleurs résultats sont obtenus avec les paramètres suivants : Vitesse de rotation 35 r/min et tension électrique de 10 kV, teneur en cuivre de 89.2%, et du brome 70.99%.

Tableau VI.1 : Résultats de l'analyse XRF, après la séparation électrostatique

Vitesse (tr/min)	Tension (KV)	Conductivité	M _{récup} (g)	Br-KA	Cu-KA
25	10	Conducteur	85,9	28.23%	52.33%
25	10	Nconducteur	9,9	75.25%	8.45%
25	15	Conducteur	81,2	31.56%	55.26%
25	15	Nconducteur	17,5	68.45%	9.15%
25	20	Conducteur	73,7	30.76%	52.26%
25	20	Nconducteur	24,29	71.45%	11.15%
30	10	Conducteur	90,9	28.56%	58.26%
30	10	Nconducteur	8,59	69.45%	8.35%
30	15	Conducteur	84,7	36.56%	59.26%
30	15	Nconducteur	14,2	70.45%	11.15%
30	20	Conducteur	64,9	31.56%	55.26%
30	20	Nconducteur	33,8	68.45%	9.25%
35	10	Conducteur	89,2	18.45%	61.25%
35	10	Nconducteur	9,3	70.99%	11.02%
35	15	Conducteur	82	31.56%	55.26%
35	15	Nconducteur	14,6	68.45%	8.15%
35	20	Conducteur	79,9	31.56%	55.26%
35	20	Nconducteur	17,8	68.45%	7.15%

En utilisant une tension alternative élevée variant de 10 kV à 20 kV, Une vitesse de rotation il devient possible de distinguer les différents éléments constitutifs présents dans le mélange de déchets en observant les propriétés spectrales distinctes. Pour ce faire, nous avons mis en œuvre le dispositif expérimental décrit dans le chapitre 3, générant ainsi deux échantillons pour chaque essai. Dans tous ce qui suit, nous présentons deux spectres pour chaque expérience :

Spectre A : Échantillon des particules restées collées à la surface du tambour après séparation.

Spectre B : Échantillon des particules attiré par l'électrode elliptiques après séparation de ce dernier.

VI.3.1 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 détailler dans le tableau VI.1 si dessous et illustrer dans la figure VI.3.

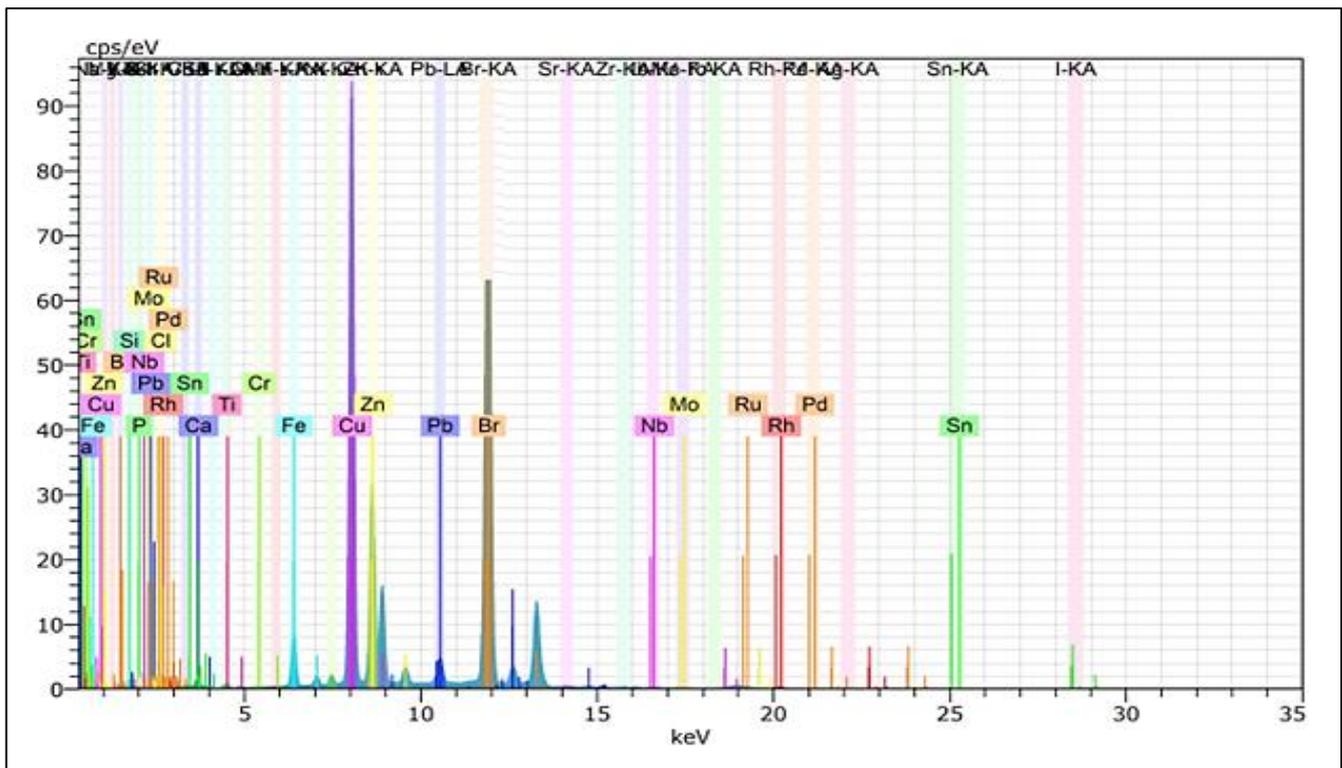


Figure VI.3 : Spectre de fluorescence X d'un échantillon du produit séparé et collecté au Côté conducteur

L'échantillon optimale est principalement composé de **61.25 %** du cuivre (**Cu-KA**), de zinc **10,90%**(**Zn-KA**), de **7,25 %** de fer (**Fe-KA**) et de **18.45 %** 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.

Tandis que le reste des éléments présent dans le spectre avec des très petites proportions non significatives

On remarque les métaux représente un pourcentage de 82% 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.

VI.3.2 SPECTRE 2

Un échantillon du produit séparé et collecté au Côté gauche du collecteur, est analysé dans le spectromètre M4 TORNADO. Les résultats sont détailler dans le tableau VI.1 si dessous et illustrer dans la figure VI.4.

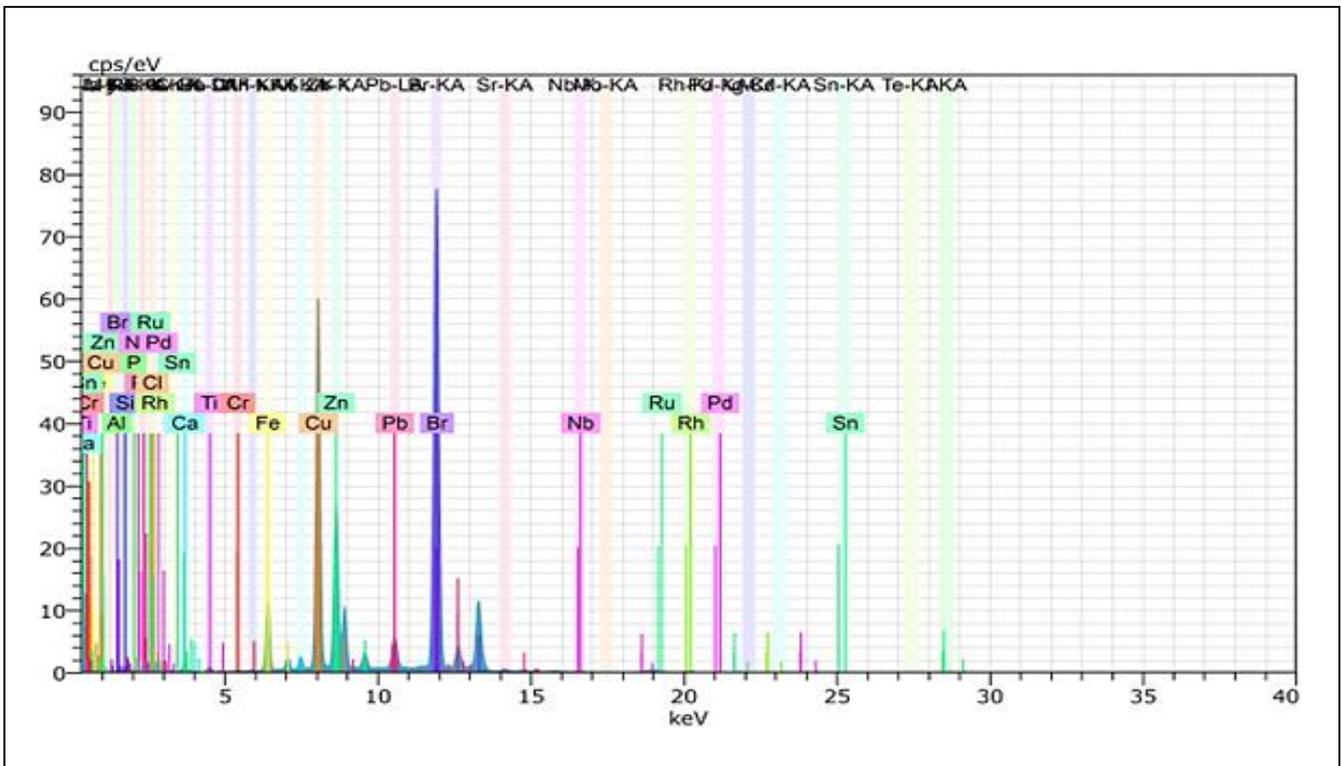
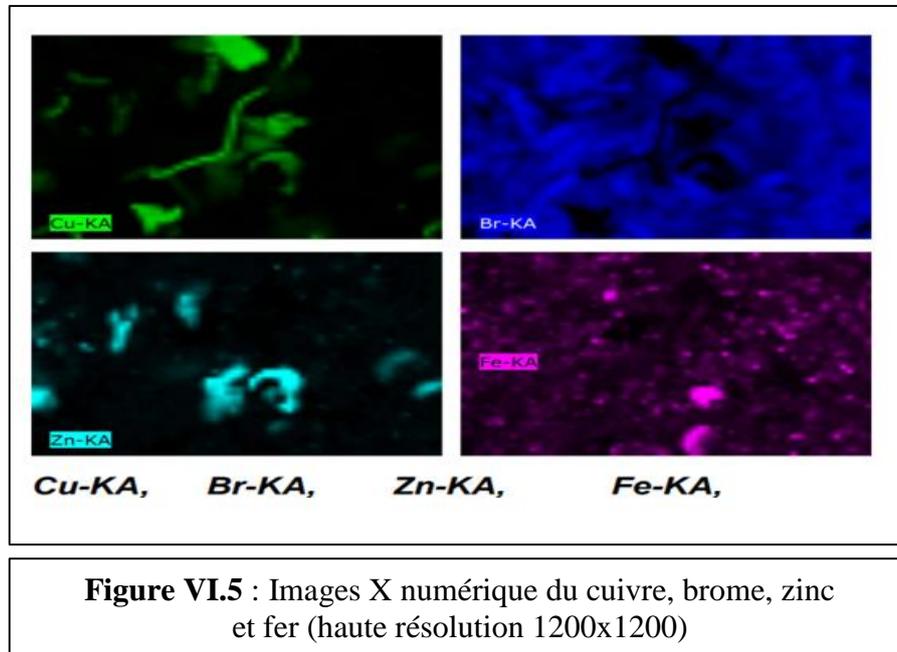


Figure VI.4 : Spectre de fluorescence X d'un échantillon du produit séparé et collecté au Coté non conducteur

L'échantillon est composé de 70.99 % brome (**Br-KA**) est **28%** 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 Tambour 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.

La figure VI.5 est une Images numérique haute résolution 1200x1200(MEB), elle montre clairement la présence du cuivre, Fer, Zinc et Brome dans les deux échantillons après la séparation électrostatique.



VI.4 Conclusion

Les résultats de cette étude expérimentale seraient essentiels pour évaluer le potentiel du séparateur à tambour 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

Conclusion Générale :

Le volume des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) connaît une forte croissance liée à un taux d'équipement de plus en plus élevé et à l'évolution très rapide des performances technologiques. Ces déchets sont composés d'une grande diversité de matériaux plastique, Les technologies électrostatiques se sont imposées comme la solution de choix pour le recyclage des matériaux isolants contenus dans ces déchets. D'autant plus que la séparation électrostatique est une technologie non-polluante, caractérisée par une faible consommation d'énergie, ainsi que par des coûts réduits d'exploitation et d'entretien.

Le recyclage des cartes électroniques offre d'importants avantages et joue un grand rôle dans le domaine de protection de l'environnement. Le recyclage des cartes électroniques est aussi une source de différents matériaux importants tels que le plastique, les métaux, s'effectuent progressivement par broyage des composants électroniques en un produit de la taille d'un grain de sable à l'aide de divers broyeurs. Le matériau ainsi obtenu est ensuite séparé en métaux, matières plastiques et fibres synthétiques selon des procédés de séparation différents (aimants, séparateurs à haute capacité, tamis) (Welslau & Kraus, 1998), c'est une méthode efficace pour séparer les composants électroniques et donner des bons résultats.

La séparation électrostatique a la réputation d'être une technologie de recyclage efficace et robuste, caractérisée par un faible coût, une consommation d'énergie réduite et une grande facilité d'utilisation. Cependant, le processus de séparation est multifactoriel et nécessite un choix judicieux des paramètres électriques et géométriques afin de permettre le traitement de différents mélanges de matériaux et d'obtenir un résultat optimal. La maîtrise du processus de séparation électrostatique nécessite une étude plus approfondie du comportement des particules chargées ou polarisées, soumises à l'action d'un champ électrique. La méthodologie adoptée dans cette thèse associe l'étude expérimentale et la simulation numérique, afin d'aboutir à un modèle fiable, d'où l'intérêt de l'utilisation d'outils informatiques de pointe, et de matériels d'acquisition d'images ultra-rapides.

Le séparateur électrostatique à tambour représente une avancée majeure dans le domaine de la séparation des matériaux. Son efficacité, sa polyvalence et son respect de l'environnement en font un choix privilégié dans diverses industries, notamment le recyclage et le traitement des minéraux. Bien qu'il existe des défis et des limitations, les bénéfices à long terme en termes d'efficacité opérationnelle et de durabilité environnementale sont indéniables. L'intégration continue d'innovations technologiques dans ces séparateurs promet d'élargir encore leurs

Conclusion Générale

applications et d'améliorer leur performance, contribuant ainsi à un avenir plus durable et respectueux de l'environnement.

La conclusion générale de ces travaux de recherche peut être formulée ainsi : grâce à la maîtrise des trois mécanismes physiques qui assurent la charge électrique des mélanges pulvérulents (effet couronne, induction électrostatique, effet tribo-électrique), la séparation en champ électrostatique est un procédé efficace pour la purification des matières premières dans l'industrie agro-alimentaire et pour la récupération des matériaux contenus dans les déchets d'équipements électriques et électroniques. Par ailleurs, ce procédé non-polluant est caractérisé par des coûts d'exploitation et d'entretien réduits, ainsi que par une faible consommation d'énergie.

Références bibliographiques

- [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] Loi n° 75-633 du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux
- [3] Tahar, Dr. BENNAMA. Les bases de traitement des déchets solides. Oran: Polycopié de Cours, 2016.
- [4] ADEME (2000a). Atlas des déchets en France 2ème édition (données et références). ADEME éditions, Paris, 27 pages.
- [5] 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.
- [6] https://www.dictionnaire-environnement.com/dechet_agricole_ID1191.html
- [7] Alain, D. (2006). Guide du traitement des déchets
- [8] 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.
- [9] Turlan, tristan. Les déchets collecte.traitement.tri. Recyclage. s.l.: Dunod, 2018.
- [10] Ecosystème. [En ligne] {Citation 27 avril 2023.}
<https://www.ecosystem.eco/fr/article/dece>.
- [11] Ouladkaddour, Leila et zian, hakima. Récupération & traitement des déchets d'Equipements électriques & Electroniques. Tlemcen: projet de fin d'étude Université Abou Bakr Belkaid, 2018.
- [12] DIRECTIVE 2012/19/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE), 2012.
- [13] Global E-waste Monitor, 2020.
- [14] Chemical hazards associated with treatment of waste electrical and electronic equipment. Oyuna Tsydenova, Magnus Bengtsson. s.l. Waste Management journal.
- [15] M. Lassalle, «LA FIN DE VIE DU MATÉRIEL INFORMATIQUE : COMPARATIF DES MODES DE GESTION EN FRANCE ET AU QUÉBEC ET DÉTERMINATION DES FACTEURS DE SUCCÈS,» CENTRE UNIVERSITAIRE DE FORMATION EN ENVIRONNEMENT, UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE, Québec, Canada, 2011.

Références bibliographiques

- [16] Bellakhal Ahmed Benadjina Brahim. Réalisation d'un système de contrôle automatique de l'éclairage. TIARET: projet de fin d'étude UNIVERSITE IBN KHALDOUN, 2015.
- [17] Déchets électroniques dans le Pacifique stratégie régionale et plan d'action. Apia, Samoa: Secrétariat du Programme régional océanien de l'environnement, 2011.
- [18] Thomas, C. (2016). Recyclage des cartes électroniques : un aperçu de l'état de l'art. Responsabilité & Environnement, Avril 2016, N°82.
- [19] site web: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/Aurora_2ch_mixer_board_arrive.jpg.
[En ligne]
- [20] P. Laurent. Technologie et réalisation de circuits imprimés électroniques. IUT de Nice, Département GEII, Laboratoire ER1, 2002.
- [21] Recycling printed circuit boards. Li, J. et Zeng, X. China: Woodhead Publishing Limited Tsinghua University, 2012
- [22] Directive 2002/96/ce du parlement européen et du conseil du 27 janvier 2003 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Journal officiel de l'Union européenne, n° L037 du 13/02/2003, pp. 24-38. 2003.
- [23] C.Delavelle, D. Fayolle, "Caractérisation des plastiques contenus dans les DEEE et état des lieux de la valorisation de ces plastiques", AJI-EUROPE, ADEME, 138p, 2006
- [24] S. Atroune, A. Tilmatine, R. Alkama, A. Samuila, and L. Dascalescu, "Comparative experimental study of tribo-electric charging of two size-classes of granular plastics." Part. Sci. & Technol., Vol.33, pp. 652-658, 2015.
- [25] C.H. Park, N. Subasinghe, and H.S. Jeon, "Separation of covering plastics from particulate copper in cable wastes by induction electrostatic separation.", Materials Trans. Vol. 56, pp. 1140-1143, 2015
- [26] Marc Séguin, physique XXI Tome Bnote de cours révisée par Simon Vézina
- [27] Matsushita Y, Mori N and Sometani T, "Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary drum blades", Electrical Engineering in Japan, 127 33–40, 1999.
- [28] Tilmatine.A, Bendimerad.S, Medles.K, Bendaoud.A, Younes.M, Dascalescu.L, "Set point identification and robustness testing of a free-fall triboelectrostatic separation process" IEEE/Industry Applications Society Annual Meeting Edmonton, Canada, 5-9 Oct. 2008, DOI 10.1109/08IAS.2008.102 Page(s):1 - 7.
- [29] R.-H. Yoon, G. H. Luttrell, E. S. Yan and A. D. Walters: « Poc-scale testing of a dry triboelectrostatic separator for fine coal cleaning » Report Period (September 27, 1995 to April 30, 2001) Center for Coal and Minerals Processing Virginia Polytechnic Institute & State University Blacksburg, Virginia 24061-0258.

Références bibliographiques

- [30] M.Miloudi, « Application de la charge par effet triboélectrique des matériaux granulaires dans la séparation électrostatique», Thèse de Doctorat, Université de Sidi Bel Abbès, Nov. 2012.
- [31] Bendimerad.S, Tilmatine.A, Ziane.M, & Dascalescu.L, (2009). Plastic wastes recovery using free-fall triboelectric separator. *International Journal of Environmental Studies*, 66(5), 529-538.
- [32] Carpco Inc., Jacksonville, USA. “Carpco application sheet. Rejection of PVC from PET flake using the Carpco V-STAT separator”. In: Bulletin No. 97713.
- [33] Matsushita Y, Mori N and Sometani T, “Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary drum blades”, *Electrical Engineering in Japan*, 127 33–40, 1999.
- [34] Bendimerad S, Tilmatine A, Ziane M, Dascalescu L, “Plastic wastes recovery using freefall triboelectric separator”, *Int. J. Environ. Studies*, vol. 66, p. 529 – 538. 2009
- [35] N.Bouhamri, M.E. Zelmat, A. Tilmatine, "Optimisation et commande du fonctionnement d'un sépareur tribo-electrostatique de mélanges granulaires à disques rotatifs"
- [36] Calin L, Dascalescu L. «Procédé de séparation électrostatique d'un mélange de granules de matériaux différents et dispositif de mise en œuvre », Brevet FR2943561, Oct.1, 2010.
- [37] Aksa W Medles K Rezoug M Miloudi M Dascalescu L procédé de séparations électrostatiques a deux etages pour l'amélioration de la pureté des matériaux isolant obtenus des déchet d'équipements électrique et électronique conférence francophone sur l'eco-conception en genie électrique (CONFREGE) Montréal ,canada mai 2012
- [38] Messafeur R Etude d'un procede de séparations d'un mélange de particules isolant issue de plusieurs matériaux, Université Djilali Liabes de Sidi-belabbes, 2018
- [39] Fekir D E Chargement triboélectrique et séparation électrostatique pour deux types de mélange granulaires binaires isolant de taille fine et ceux de grosse taille, Thèse de doctorat en électromécanique, Université de Sidi-Bel-Abbès, 2017
- [40] Habi_Meriem, Khengaoui Bouchra « Etude et simulation d'un sépareur rotationnel » Master II Université Kasdi Merbah Ouargla Algérie 2014/2015.
- [41] Mehasni Rabia “Elaboration de modèles de calcul de dispositifs a induction électromagnétique : application a un système de séparation magnétique dans les milieux particuliers“ thèse 2007 université Mentouri-Constantine
- [42] A. Young and Gerald H. Luttrell “Separation technologies for minerals” book <http://books.google.dz/uy> New View Book Synopsis. ISBN 13: 9781681174952 2012

Références bibliographiques

- [43] - Dascalescu L., "Séparateurs électrostatiques pour matériaux granulaires", Exposé présenté au Laboratoire d'électrostatique et de matériaux diélectriques associé à l'université J. Fourier, Grenoble, (7.11.1991).
- [44] - Delon J.F., "Théorie de la séparation électrostatique à l'aide de l'effet corona", Annales des Mines, 3, (1966), pp.37-50.
- [45] - Morar R., Iuga Al., Dascalescu L. and Samuila A., "Factors which influence the insulation-metal electroséparation", J. of electrostatics, 30, (1993), pp. 403-412.
- [46] - Tilmatine, A., Azzouz, Z., Younes, M., Brahami, M., & Dascalescu, L. "Séparation électrostatique des particules : une technologie efficace dans l'industrie de recyclage." Sciences & Technologie B, Université Mentouri, Constantine, Algérie, décembre 2004, pp. 42-46.
- [47] A. Tilmatine, K. Medles, S.E. Bendimered, F. Boukhoulida, K. Medles, and L. Dascalescu, "Electrostatic separators of particles. Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures", Waste Manage, vol. 29(1), pp. 228–232, 2009.
- [48] MAAMMAR Mohamed Modélisation et optimisation des séparateurs électrostatiques : multifonctionnel et à tambour. SIDI-BEL-ABBES: Thèse de doctorat UNIVERSITE DJILLALI LIABES, 2022.
- [49] - Dascalescu L., "Numerical analysis of the electric field of roll type electrostatic separators", J. of electrostatics, 29, (1993), pp.255-267.
- [50] - Inculet I.I., Castle G.S.P., Brown J.D., "Electrostatic separation of plastics for recycling", Particulate Science and Technology, 16, (1998), pp.91-100.
- [51] - Higashiyama Y., Asano K., "Recent progress in electrostatic separation technology", Particulate Science and Technology, 16, (1998), pp.77-90.
- [52] <https://www.physitek.fr/blog-groupe-physitek/fluorescence-x/>
- [53] . Louati, H., Tilmatine, A., Ouiddir, R., Alibida, A., & Zouzou, N. (2020). New separation technique of metal/polymer granular materials using an electrostatic sorting device. Journal of Electrostatics, 103, 103410. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2019.103410>.
- [54] Bouhamri, N., Zelmat, M.E., & Tilmatine, A. (2019). Micronized plastic waste recycling using two-disc tribo-electrostatic separation process. Advanced Powder Technology, 30(3), 625-631. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.12.012>
- [55]. Ben Abderrahmane, A., Medles, K., Zeghloul, T., Renoux, P., Dascalescu, L., & Parenty, A. (2020). Triboelectric Charging and Electrostatic Separation of Granular Polymers Containing Brominated Flame Retardants. IEEE Transactions on Industry Applications, 57(1), 915922. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3031579>