

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université MUSTAPHA Stambouli
Mascara



جامعة مصطفى اسطمبولي
معسكر

Faculté des Science et technologie

Département de Electrotechnique

Laboratoire LSTE, Université Mustapha Stambouli de Mascara

THESE de DOCTORAT

Spécialité : Electrostatique appliquée à l'environnement

Intitulée

Contrôle intelligent par les approches hybrides
pour les dispositifs électrostatiques

Présentée par : Bouleriah Mohammed Elamine

Le : 29/01/2024

Devant le jury :

Président	BENMIMOUN Youcef	Professeur	Université de Mascara
Examineur	BEKKARA Mohammed Fethi	MCA	Université de Mascara
Examineur	BENABBOUN Adel	MCA	Université de Mascara
Examineur	TOUHAMI Sedik	MCA	Université de Sidi Bel Abbès
Encadreur	DAHOU Omar	MCA	Université de Mascara

Année Universitaire : 2023-2024

REMERCIEMENTS

Avant tout, On remercie Dieu le tout puissant, pour nous avoir donné de la santé, le courage et la volonté d'étudier et pour nous avoir permis de réaliser ce travail dans de bonnes conditions.

Je tiens à remercier grandement mon directeur de thèse Dr. **Dahou Omar** qui m'a accompagné tout au long de cette thèse pour toutes ses aides précieux, sa gentillesse, sa disponibilité permanente, sa patience et pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodigués.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers mon ancien encadreur, **Pr. Karim Medles**. Je suis ravi d'avoir travaillé en sa direction. Je le remercie surtout pour ses qualités humaines, et pour sa patience tout au long de la réalisation de ce travail.

En outre, J'adresse mes vifs remerciements à monsieur **Benmimoun Youcef** pour avoir accepté de présider le jury, tout comme j'adresse ma profonde reconnaissance aux messieurs **Bekkara Mohammed Fethi**, **Benabboun Adel** et **Touhami Seddik** pour avoir acceptés d'examiner et d'évaluer ce travail.

En fin, je remercie tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail et qui n'ont pas pu être cités ici.

Tables des matières

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

Chapitre I

Généralité sur les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)

I.1	Définition, classification et caractéristiques des déchets électriques et électroniques.....	5
I.2	Aperçu des statistiques sur les déchets électroniques dans le monde	6
I.3	Le potentiel des déchets électroniques dans une économie circulaire.	9
I.4	Impact des déchets électroniques sur la santé	10
I.5	Déchets d'Equipement Electriques et Electroniques en Algérie.....	12
I.6	Législation sur les déchets électroniques et mouvement transfrontalier	14
I.6.1	Aperçu de la législation et des politiques d'importation et d'exportation de déchets électroniques en Algérie.....	15
I.7	Traitement des DEEE.....	16
I.7.1	Traitement et désassemblage.....	17
I.7.2	Réduction de la taille des DEEE.	18
I.7.3	La séparation par propriétés spécifiques	19
I.8	Conclusion	23

Chapitre II

Généralités sur les séparateurs électrostatiques.

II.1	Principes de la séparation électrostatique	25
II.1.1	Mécanismes de chargement électrique.....	26
II.2	Bibliographie sur les applications des processus de séparations électrostatiques.....	35
II.3	Types de séparateurs électrostatiques	36
II.3.1	Séparateur triboélectrique à chute libre	36
II.3.2	Séparateur triboélectrique à tapis roulant	37
II.3.3	Séparateur tribo-aéro-électrostatique à tambours transporteurs.	38
II.3.4	Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses.....	39
II.3.5	Séparateur triboélectrique à deux disques	40
II.3.6	Séparateur électrostatique à tapis roulant	41
II.3.7	Séparation électrostatique à électrode plaque.....	42
II.3.8	séparateur électrostatique à cylindre tournant	43
II.4	Conclusion	48

Chapitre III

Modélisation expérimentale des processus de séparation électrostatique

III.1	Méthodologie des plans d'expériences	51
III.1.1	La méthode du plan composite centré	51
III.2	Application de la méthode du plan composite centré	53
III.2.1	Analyse de variance pour réponses (ANOVA)	54
III.2.2	Les modèles mathématiques.....	56
III.2.3	La qualité descriptive des modèles.....	56
III.2.4	Vérification de la validité des modèles	57
III.3	Influence des facteurs choisis sur les réponses	60
III.3.1	Produit isolant.....	61
III.3.2	Produit conducteur	63
III.3.3	Produit Mixte.....	65
III.4	Conclusion	67

Chapitre IV

Optimisation d'un séparateur électrostatique

IV.1	Optimisation par plans expérience.....	70
IV.2	Optimisation multiobjectif.....	72
IV.2.1	Formulation générale du problème.....	73
IV.2.2	La classification des problèmes multiobjectifs:.....	75
IV.3	L'optimisation multiobjectif par algorithme génétique (MOGA)	76
IV.3.1	Avantages et inconvénients des MOGA.....	76
IV.3.2	Les étapes principales d'un (MOGA).	77
IV.4	Optimisation de séparateur électrostatique par MOGA.....	78
IV.4.1	Données relatives à l'algorithme génétique	79
IV.4.2	Plan exploratoire.....	79
IV.4.3	Résultats	79
IV.5	Conclusion	86

Chapitre V

Contrôle intelligent d'un séparateur électrostatique

V.1	Formulation du problème.....	89
V.2	Le contrôleur flou	95
V.3	Les différentes parties de la commande flou.....	96
V.3.1	Base de règles :	97
V.3.2	Un mécanisme d'inférence.....	97
V.3.3	Interface de fuzzification.....	100
V.3.4	Interface de défuzzification	100
V.4	Application de la logique floue au contrôle de la séparateur électrostatique.....	102
V.4.1	Fuzzification de l'entrée.....	102
V.4.2	Règles d'inférence.....	104
V.4.3	Défuzzification	105
V.5	Mécanisme d'application du contrôle flou au séparateur électrostatique.....	106
V.6	Résultats de la simulation et discussion.....	107
V.6.1	Étudier la réponse du système en contrôlant deux variables avec distorsion intentionnelle.....	108
V.6.2	Étudier la réponse du système en contrôlant deux variables avec distorsion intentionnelle en même temp.	110
V.7	Conclusion	112
Conclusion générale		114
Références Bibliographiques.....		117

Introduction générale

Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) ne cessent d'augmenter en raison de plusieurs facteurs, notamment l'augmentation de la population, l'augmentation du niveau de vie et l'essor des technologies de l'information et de la communication. Selon un rapport de l'Organisation des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), la quantité de DEEE générés dans le monde entier devrait augmenter de plus de 21% d'ici 2030, passant de 54,9 millions de tonnes en 2020 à 74,7 millions de tonnes en 2030 [1]. Cela souligne l'importance de mettre en place des systèmes de gestion des DEEE efficaces pour garantir que ces déchets sont collectés, triés, recyclés et éliminés de manière responsable et durable.

Le recyclage des DEEE est important pour plusieurs raisons. Tout d'abord, cela permet de récupérer des matériaux précieux qui peuvent être réutilisés dans la production de nouveaux équipements, ce qui réduit la nécessité d'extraire de nouvelles ressources naturelles. En outre, le recyclage des DEEE permet également de réduire les impacts environnementaux négatifs associés à leur élimination. Les équipements électroniques contiennent souvent des substances dangereuses telles que le plomb, le mercure et le cadmium, qui peuvent contaminer l'environnement s'ils sont jetés dans des décharges ou incinérés.

Afin de répondre à ces enjeux, de nombreuses technologies ont été développées pour la séparation des matériaux usagés, parmi lesquelles les technologies électrostatiques ont prouvé leur efficacité et leur pertinence. Ces technologies ont été initialement conçues pour le traitement des minerais [2], mais elles trouvent aujourd'hui leur place dans le traitement des DEEE. Les améliorations et optimisations constantes de ces technologies en font l'une des solutions les plus efficaces pour la séparation des particules des mélanges granulaires, en se basant sur les caractéristiques électriques des particules. Les applications de ces technologies sont variées et incluent notamment la séparation électrostatique du cuivre et du Polychlorure de vinyle (PVC) des déchets de câbles électriques et de cartes électroniques, la séparation tribo-électrostatique à chute libre pour le traitement des mélanges de plastiques granulaires et la séparation tribo-aéro électrostatique des déchets de plastiques granulaires micronisés. Ces technologies peuvent

Introduction générale

également être combinées avec d'autres techniques de séparation mécanique, magnétique, hydraulique, pour augmenter la capacité de production des chaînes de tri.

Le processus d'électro-séparation est complexe et multifactoriel, impliquant à la fois des caractéristiques de construction et des paramètres variables. La difficulté de contrôler ce processus réside dans le grand nombre de variables impliquées et dans les nombreux phénomènes interactifs qui se produisent simultanément. Les chercheurs sont donc confrontés à des défis importants pour optimiser le fonctionnement de cette technologie. Pour atteindre le point optimal de fonctionnement, il est nécessaire de mettre en place une stratégie de contrôle efficace qui prend en compte l'ensemble des variables impliquées dans le processus. Cependant, les méthodes de contrôle traditionnelles ne sont souvent pas suffisantes pour optimiser le fonctionnement de ces équipements en raison de la complexité de leur fonctionnement. Le séparateur électrostatique à tambour pour trier les mélanges granulaires contenant des particules en plastique et en métal. Cette technologie permet une séparation efficace des différentes particules en utilisant des forces électrostatiques. Cependant, pour obtenir des résultats optimaux, il est crucial de mettre en place une stratégie de contrôle adéquate.

L'efficacité de l'intelligence artificielle dans le contrôle du séparateur électrostatique a été prouvée à maintes reprises. Certaines études ont proposé l'utilisation d'algorithmes génétiques, comme mentionné dans [3]. Cependant, cette approche peut s'avérer chronophage lors de l'évaluation et est donc moins recommandée que l'utilisation de la logique floue ou des réseaux neuronaux, préférés par de nombreux experts dans le domaine du contrôle [4]. Plus récemment, un contrôleur intelligent a été développé en utilisant une approche basée sur l'optimisation biogéographique (BBO) et les réseaux neuronaux [5]. Cette technique est une preuve supplémentaire de l'efficacité de l'intelligence artificielle dans le contrôle du séparateur électrostatique. Cependant, il est important de noter que ces techniques sont très sensibles à l'exactitude des modèles utilisés. Toute variation dans les modèles peut avoir des conséquences importantes sur les résultats, ce qui est particulièrement vrai dans le cas d'un séparateur électrostatique [6].

En effet, les conditions environnementales et expérimentales peuvent varier considérablement, notamment la granulométrie des déchets, ce qui peut affecter considérablement le processus de séparation. Il est donc crucial de prendre en compte ces facteurs lors de l'élaboration

Introduction générale

des modèles d'intelligence artificielle et de les adapter constamment pour garantir l'efficacité du contrôle du séparateur électrostatique.

L'objectif principal de cette thèse est d'améliorer le processus de séparation électrostatique des mélanges granulaires issus des déchets des câbles industriels en exploitant deux techniques d'intelligence artificielle, à savoir l'optimisation multi-objectifs génétiques (MOGA) et la logique floue, tout en adoptant une méthodologie basée sur des plans d'expérience

Traditionnellement, la logique floue a été utilisée pour intégrer la connaissance de l'expert dans le processus de contrôle. Cependant, avec la variété de modèles de séparateurs électrostatiques disponibles, chacun ayant ses propres caractéristiques, il est difficile de se fier uniquement à l'expertise ou même à d'autres études pour le contrôle flou. Pour surmonter ce problème, nous avons mené une étude statistique pour créer une base de connaissances pour une utilisation en contrôle basée sur des expériences, comme décrit dans [6]. Nous avons utilisé la technique de plans d'expérience [7], qui a été largement utilisée dans le domaine des séparateurs électrostatiques, comme indiqué dans de nombreux articles de recherche tels que [8][9].

Le travail présenté dans cette thèse est réparti en cinq chapitres :

Le premier chapitre présente une vue d'ensemble des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Tout d'abord, une définition précise des DEEE est donnée, suivie d'une classification des équipements électriques et électroniques par fonction. Ensuite, des statistiques sur la quantité de déchets électroniques dans le monde sont fournies, ainsi que des informations sur les activités de recyclage et le potentiel des déchets électroniques dans une économie circulaire. Le chapitre aborde également l'impact des déchets électroniques sur la santé. De plus, une discussion spécifique sur la situation des DEEE en Algérie est incluse, avec une présentation de la législation et des politiques d'importation et d'exportation de déchets électroniques en Algérie. Enfin, nous avons fourni un aperçu technique complet du processus de traitement des déchets électriques et électroniques.

Le second chapitre est une synthèse bibliographique sur la séparation électrostatique et les séparateurs électrostatiques et leurs principes de fonctionnement.

Le troisième chapitre de cette thèse se concentre sur la modélisation expérimentale du processus de séparation électrostatique étudié. Il explore la méthodologie des plans d'expériences,

Introduction générale

mettant particulièrement l'accent sur la méthode du plan composite centré. Ce chapitre approfondit également l'analyse de variance pour les réponses (ANOVA), les modèles mathématiques utilisés, la qualité descriptive des modèles, ainsi que la vérification de leur validité.

Le quatrième chapitre est consacré à l'optimisation d'un séparateur électrostatique étudié en utilisant deux méthodes distinctes : 1) l'optimisation par plans d'expérience, mentionnée précédemment, et 2) l'optimisation multi-objectif par algorithme génétique (MOGA). Il débute par l'introduction des concepts liés à l'optimisation par plans d'expérience et à l'optimisation multi-objectif, avec un aperçu de la classification des problèmes multi-objectifs. Ensuite, les avantages et les inconvénients de l'approche MOGA sont discutés, suivis des étapes principales de l'implémentation d'un MOGA. Le chapitre se termine par la présentation des données relatives à l'algorithme génétique, les résultats obtenus, et leur interprétation.

Le dernier chapitre de ce document se focalise sur la mise en œuvre du contrôle intelligent du séparateur électrostatique. Il détaille méticuleusement les différentes étapes de l'application de la logique floue pour réguler le fonctionnement de notre séparateur. Ce chapitre s'initie en présentant la formulation du problème, suivi de l'exposition du mécanisme d'application du contrôle flou au séparateur électrostatique. Les résultats de la simulation et la discussion sont ensuite exposés, englobant une analyse approfondie de la réponse du système en manipulant deux variables (tension, vitesse) ainsi que la mesure de la durabilité du contrôleur par distorsion intentionnelle à l'état stable.

Enfin nous terminons par une conclusion générale.

Chapitre : I

**Généralité sur les déchets d'équipements
électriques et électroniques (DEEE)**



Introduction

La consommation d'Equipements Electriques et Electroniques (EEE) est fortement liée au développement économique mondial généralisé. Les EEE sont devenus indispensables dans les sociétés modernes et améliorent le niveau de vie, mais leur production et leur utilisation peuvent être très exigeantes en ressources, ce qui illustre également un obstacle à cette amélioration même du niveau de vie. Des niveaux plus élevés de revenus disponibles, une urbanisation et une mobilité croissantes et une industrialisation plus poussée dans certaines parties du monde entraînent une augmentation des quantités déchets d'équipements électriques et électroniques.

Après leur utilisation, les EEE sont éliminés, générant un flux de déchets contenant des matières dangereuses et précieuses. Ce flux de déchets est appelé déchets électroniques ou déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), terme utilisé principalement en Europe.

I.1 Définition, classification et caractéristiques des déchets électriques et électroniques.

Il n'y a pas une définition standard pour les déchets électriques et électroniques (DEEE), ce terme est généralement défini comme des équipements qui ont atteint la fin de leur durée de vie, et ils ne représentent aucune valeur pour leurs propriétaires [10].

EEE est un terme utilisé pour décrire la grande variété de produits qui contiennent des circuits ou des composants électriques et électroniques qui nécessitent une alimentation ou une alimentation par batterie pour remplir leurs fonctions. Une fois que les EEE sont jetés par leur propriétaire sans intention de les réutiliser, ils deviennent des déchets électroniques, qui nécessitent une collecte et un traitement séparés car ils contiennent des matériaux rares, précieux et dangereux [11].

Les déchets électroniques peuvent être classés de différentes manières, notamment par type ou taille de produit. La directive européenne 2012/19/UE relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (connue sous le nom de directive DEEE) et les lignes directrices sur la classification, les rapports et les indicateurs pour les statistiques sur les déchets électroniques utilisent une catégorisation axée sur le traitement, avec six catégories principales comme indiqué ci-dessous :

1. Équipement d'échange de température, y compris réfrigérateurs, congélateurs, climatiseurs et pompes à chaleur.
2. Écrans et moniteurs, comprenant des écrans à cristaux liquides (LCD) et des diodes électroluminescentes (DEL) utilisés dans les téléviseurs, les moniteurs, les ordinateurs portables et les tablettes.
3. Lampes, y compris les lampes à DEL, les lampes à décharge à haute intensité, les lampes fluorescentes compactes et les lampes fluorescentes à tube droit.
4. Gros équipements, y compris les lave-vaisselles, les machines à laver, les fours, les systèmes de chauffage central, les grands systèmes d'impression et les panneaux photovoltaïques.
5. Petit équipement, comprenant les micro-ondes, les grils, les grille-pains, les produits de soins personnels, les haut-parleurs, les caméras, les ensembles audios, les écouteurs, les jouets, les outils ménagers, l'équipement médical et les systèmes de surveillance.
6. Petits équipements de technologie de l'information et de télécommunication (TIC), y compris les ordinateurs personnels de bureau, les imprimantes, les téléphones mobiles, les téléphones sans fil, les claviers, les routeurs et les consoles.

Pour chaque catégorie, sa fonction d'origine, son poids, sa taille, sa composition matérielle diffèrent. Ces attributs de fin de vie déterminent que chaque catégorie a des quantités de déchets, des valeurs économiques différentes, ainsi que des impacts potentiels sur l'environnement et la santé en raison d'un recyclage inapproprié. Par conséquent, les moyens de collecte, de logistique et de recyclage sont différents pour chaque catégorie au même titre que l'attitude des consommateurs face à l'élimination des équipements électriques et électroniques [11].

I.2 Aperçu des statistiques sur les déchets électroniques dans le monde

En 2019, le monde a généré 53,6 Mt de déchets électroniques, soit une moyenne de 7,3 kg par habitant. La production mondiale de déchets électroniques a augmenté de 9,2 Mt depuis 2014 et devrait atteindre 74,7 Mt d'ici 2030, soit presque le double en seulement 16 ans (figure I.1) [12]



Figure I.1 : Déchets électroniques mondiaux générés par an [12]

La quantité croissante de déchets électroniques est principalement alimentée par des taux de consommation plus élevés d'EEE, des cycles de vie courts et peu d'options de réparation. L'Asie a généré la plus grande quantité de déchets électroniques en 2019 avec 24,9 Mt, suivie des Amériques (13,1 Mt) et de l'Europe (12 Mt), tandis que l'Afrique et l'Océanie ont généré respectivement 2,9 Mt et 0,7 Mt. L'Europe se classe au premier rang mondial en termes de production de déchets électroniques par habitant, avec 16,2 kg par habitant. L'Océanie arrivait en deuxième place (16,1 kg par habitant), suivie des Amériques (13,3 kg par habitant), tandis que l'Asie et l'Afrique n'en produisaient respectivement que 5,6 et 2,5 kg par habitant (Figure I.2)[12]

En 2019, la collecte et le recyclage formels documentés étaient de 9,3 Mt, soit 17,4 % par rapport aux e-déchets générés. Il a augmenté de 1,8 Mt depuis 2014, soit une croissance annuelle de près de 0,4 Mt. Cependant, la production totale de déchets électroniques a augmenté de 9,2 Mt, avec une croissance annuelle de près de 2 Mt.

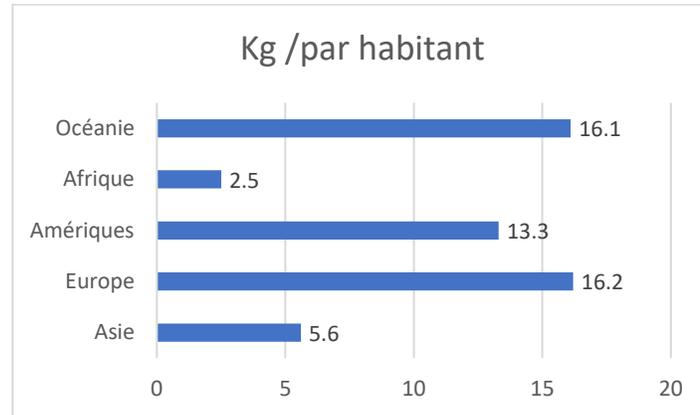


Figure I.2 : Déchets électroniques mondiaux générés par habitant [12]

Ainsi, les activités de recyclage ne suivent pas le rythme de la croissance mondiale des déchets électroniques. Les statistiques montrent qu'en 2019, le continent avec le taux de collecte et de recyclage le plus élevé était l'Europe avec 42,5 %, l'Asie au deuxième rang avec 11,7 %, les Amériques et l'Océanie étaient similaires à 9,4 % et 8,8 %, respectivement, et l'Afrique avait le taux le plus bas à 0,9 %. Le sort de 82,6 % (44,3 Mt) des déchets électroniques générés en 2019 est incertain, et leur localisation et leur impact environnemental varient selon les différentes régions voir figure I.3.

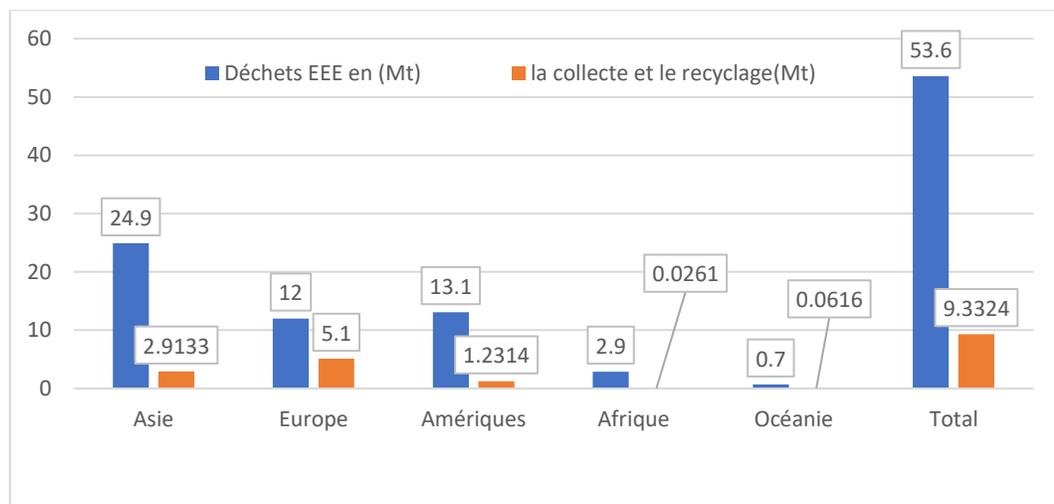


Figure I.3 : Le taux de collecte et de recyclage de DEEE en 2019 [12]

I.3 Le potentiel des déchets électroniques dans une économie circulaire.

Du point de vue de la conception des matériaux, EEE est très complexe. Jusqu'à 69 éléments du tableau périodique peuvent être trouvés dans les EEE, y compris les métaux précieux (par exemple l'or, l'argent, le cuivre, le platine, le palladium, le ruthénium, le rhodium, l'iridium et l'osmium), les matières premières critiques (par exemple cobalt, palladium, indium, germanium, bismuth et antimoine) et des métaux non critiques, tels que l'aluminium et le fer.

En recyclant les déchets électroniques, les pays pourraient au moins atténuer leur demande de matériaux de manière sûre et durable. Dans le monde, seuls 17,4 % des déchets électroniques sont officiellement collectés et recyclés. Les taux de collecte et de recyclage doivent être améliorés dans le monde entier.

Dans l'ensemble, la valeur des matières premières sélectionnées contenues dans les déchets électroniques en 2019 était égale à environ 57 milliards de dollars américains, correspondant à un total de 25 Mt comme il est montré dans figure I.4 [12].

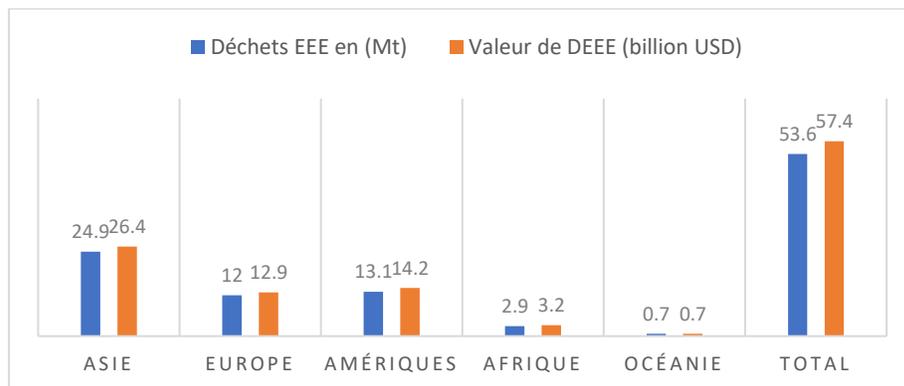


Figure I.4 : Valeur des matières premières dans les DEEE en 2019 [12].

Le fer, l'aluminium et le cuivre représentent la majorité du poids total de déchets bruts pouvant se retrouver dans les e-déchets, le tableau I.1 montre les informations sur le pourcentage des matériaux qui peuvent être récupérés à partir de quatre équipements électriques et électroniques [13]

Tableau I.1 : Pourcentage des matériaux utilisés dans la fabrication de quatre EEE différents[13]

Matériaux	Télévision	Machine a lavé	Climatiseur	Réfrigérateur
Verre	57	-	-	-
Plastique	23	36	11	40
Fer	10	53	55	50
Cuivre	3	4	17	4
Aluminium	2	3	7	3
Autres	5	4	10	3

En outre, le recyclage des matériaux issus des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) permet de réaliser d'importantes économies d'énergie et de préserver les ressources. Le tableau I.2 présente les économies d'énergie pour divers types de matériaux recyclés, avec des taux de récupération des déchets plastiques dépassant 80 % [14].

Le tableau I.2 : Energie économisée par le recyclage des DEEE [14]

Matériaux	Energie économisé (%)
Aluminium	95
Cuivre	85
Fer et acier	74
Plomb	65
Zinc	60
Papier	64
Divers plastiques	>80

I.4 Impact des déchets électroniques sur la santé

Les EEE contiennent également des substances dangereuses, généralement des métaux lourds tels que le mercure, le cadmium ou le plomb et des produits chimiques tels que les chlorofluorocarbures (CFC), les hydro chlorofluorocarbures (HCFC) et les retardateurs de flamme BFR (agents ignifuges bromés) voir figure I.5.

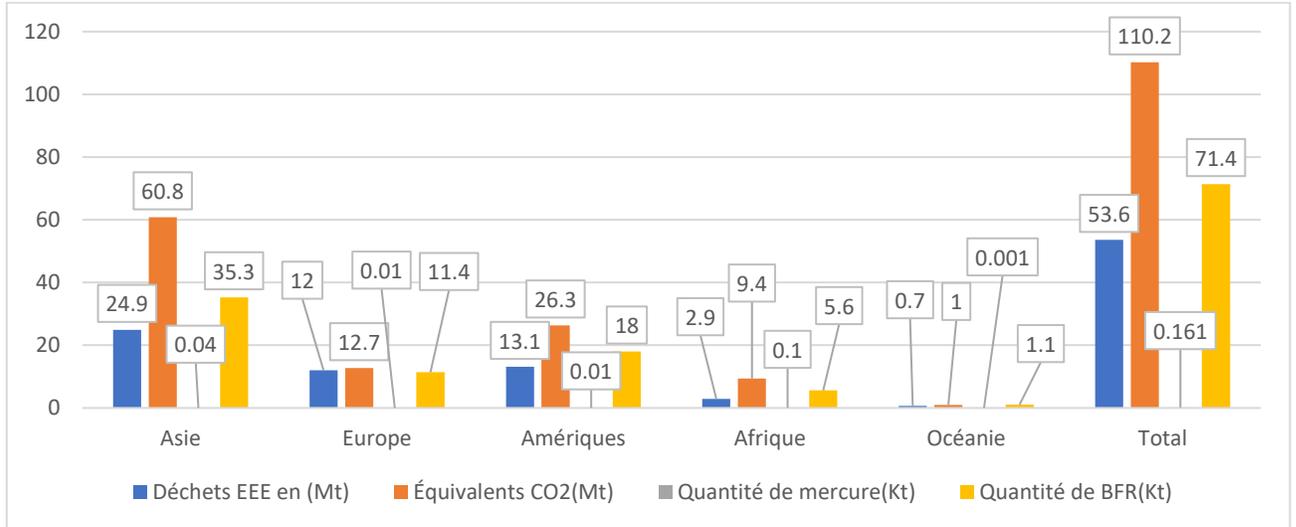


Figure I.5 : Pourcentage de composants toxiques dans les DEEE sur différents continents en 2019 [12]

Récemment, des recherches ont montré que le recyclage non réglementé des déchets électroniques est associé à un nombre croissant d'effets néfastes sur la santé. Ceux-ci incluent des résultats défavorables à la naissance, un développement neurologique altéré, des résultats d'apprentissage défavorables, des dommages à l'ADN, des troubles cardiovasculaires effets indésirables, effets indésirables respiratoires, effets indésirables sur le système immunitaire, maladies de la peau, la perte auditive et le cancer [15]- [25].

Les enfants vivent, travaillent et jouent dans des sites informels de recyclage des déchets électroniques. Les adultes et les enfants peuvent être exposés en inhalant des vapeurs toxiques et des particules, par contact cutané avec des agents corrosifs et des produits chimiques, et en ingérant des aliments et de l'eau contaminés. Les enfants sont également exposés à d'autres voies d'exposition. Certains produits chimiques dangereux peuvent être transmis de la mère à l'enfant pendant la grossesse et l'allaitement. Les jeunes enfants jouant à l'extérieur ou dans la nature mettent fréquemment leurs mains, des objets et de la terre dans leur bouche, ce qui augmente le risque d'exposition. Les fœtus, les nourrissons, les enfants et les adolescents sont particulièrement vulnérables aux dommages causés par l'exposition aux substances toxiques présentes dans les déchets électroniques en raison de leur physiologie, de leur comportement et des voies d'exposition supplémentaires [26]

Bien qu'il existe une quantité croissante d'informations sur les effets sur la santé de l'exposition aux déchets électroniques, les données disponibles sur le nombre de personnes souffrant de ces effets sont limitées. Les études universitaires sur l'exposition et les effets sur la santé ont principalement été de petites études de 50 à 450 participants [27]-[29],[15]. Certaines de ces études ont rapporté la contamination de groupes témoins, suggérant le transport généralisé de contaminants [30,28] Aucune étude longitudinale à grande échelle n'a été publiée. La collecte de statistiques sur la santé liées aux déchets électroniques présente des défis importants, tels que le grand nombre de résultats potentiels pour la santé, les défis de l'étude des mélanges chimiques, le manque de relations exposition-résultat confirmées et les longues périodes de latence de certaines maladies. Des indicateurs harmonisés au niveau international peuvent aider à mesurer le nombre de personnes à risque d'effets sur la santé liés aux déchets électroniques et à suivre les tendances dans le temps.

I.5 Déchets d'Équipement Électriques et Électroniques en Algérie

En l'Algérie L'Agence Nationale des Déchets (AND) est chargée, dans le cadre d'une mission de sujétion de service public d'informer et de vulgariser les techniques de tri, de collecte, de transport, de traitement, de valorisation et d'élimination des déchets. Elle doit capitaliser et constituer un fond documentaire sur la gestion des déchets et en assurer la diffusion aux collectivités locales et au secteur d'activités. A été créé par le décret exécutif n° 02 – 175 du 20 Mai 2002. Placée sous la tutelle du Ministère de l'Environnement et des Energies Renouvelable.

Depuis la fin 2017, l'AND a mis en place, un dispositif spécifique de collecte et de traitement des données sur les déchets spéciaux (huiles usagées, pneus, batteries, DASRI (Déchets d'activités de soins à risque infectieux) et DEEE), au niveau des Wilayas suivantes : 'Alger, Chlef, Oran, Batna, Annaba, Sétif, Constantine, Ouargla et Béchar. En mai 2018, 3700 canevas ont été renseignés auprès des ménages, des conducteurs, des entreprises et des structures sanitaires.

L'Agence Nationale des Déchets a acquis ces dernières années une expérience concrète en matière de collecte et de données et de production d'indicateurs dans le domaine des Déchets Ménagers et Assimilés (DMA). Elle a mobilisé une partie de ses moyens pour étendre cette expérience au domaine des déchets spéciaux et spéciaux dangereux.

Dans une première phase, des expérimentations de collecte de données sur plusieurs types de déchets spéciaux et spéciaux dangereux ont été lancées dans trois wilayas (Alger, Chlef et Oran) .

Dans une seconde phase, la collecte de données a été étendue à 6 autres wilayas (Annaba, Batna, Béchar, Constantine, Ouargla et Sétif) qui appartiennent également au panel de wilayas pilotes pour l'étude de la Stratégie Nationale de la Gestion Intégrée des Déchets à l'horizon 2035 "SNGID" [31].

Concernant les DEEE, les gros et les petits appareils ménagers représentent 2/3 de la quantité produite globale des DEEE (voir figures I.6), quoique les ratios des appareils ménagers sont inférieurs aux autres catégories de DEEE comme les matériels d'éclairage et, cela est dû au poids élevé des appareils ménagers [32].

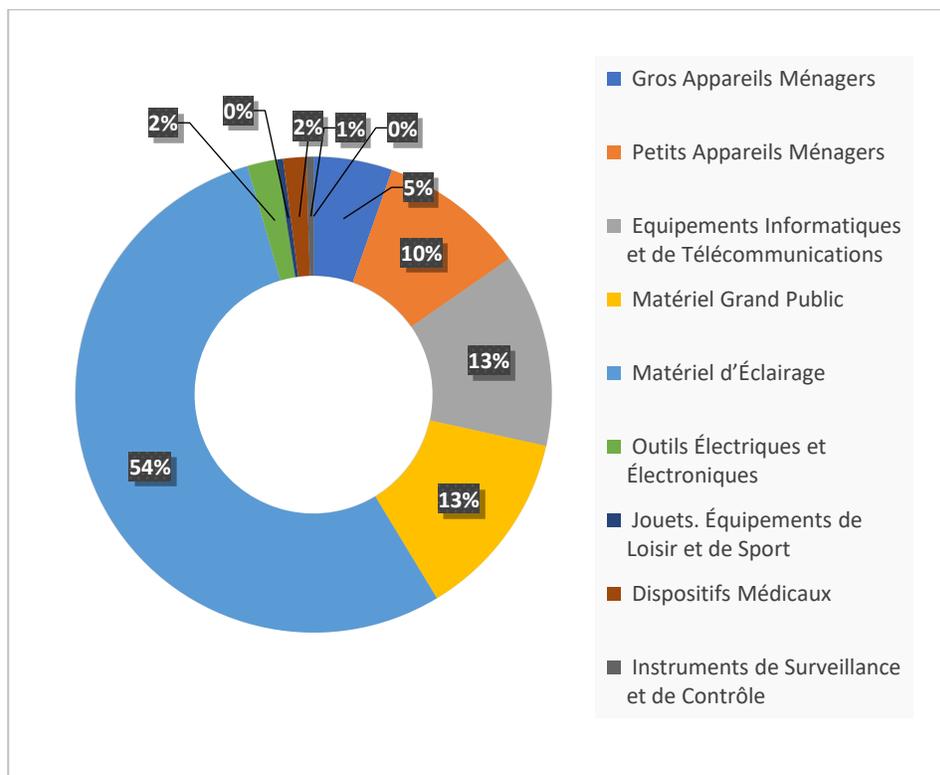


Figure I.6: Répartition de la quantité des DEEE par catégorie [32]

Les DEEE répartis sur territoire national comme le montre la figure I.7, où les Wilayas les plus peuplées arrivent en tête (Alger, Oran, Sétif), suivies des Wilayas les moins peuplées. Alors que la figure I.8 montre l'évolution quantitative des Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques à l'échelle nationale [33].

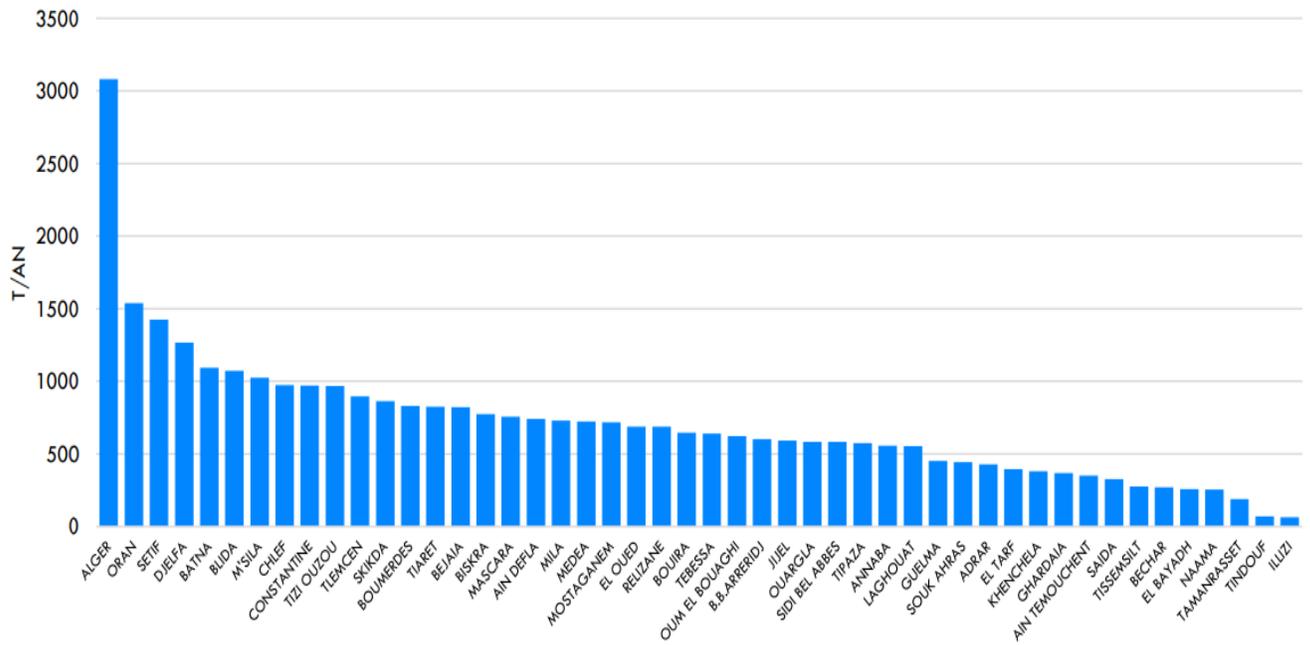


Figure I.7: Répartition spatiale de la quantité des DEEE sur le territoire national (Exercice 2018) [33]

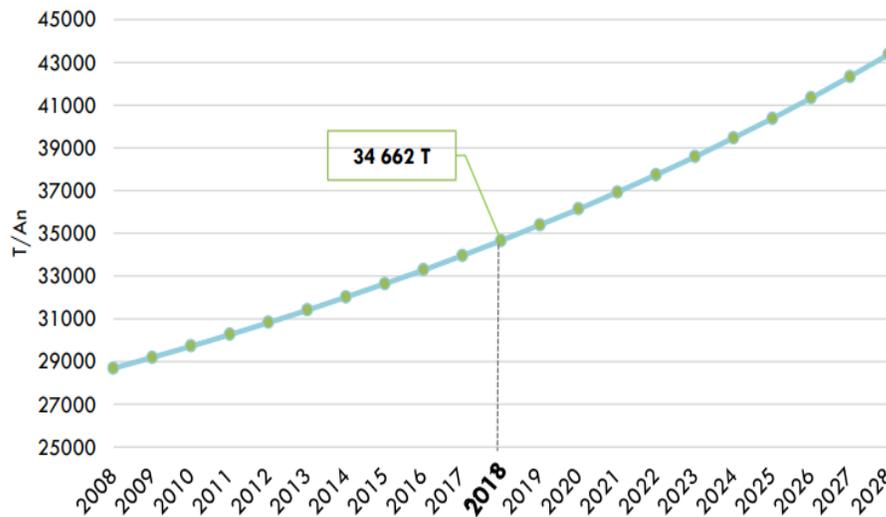


Figure I.8 : Evolution quantitative des DEEE à l'échelle nationale [33]

I.6 Législation sur les déchets électroniques et mouvement transfrontalier

Les gouvernements du monde entier élaborent des politiques et une législation nationale sur les déchets électroniques pour faire face à la croissance des produits électriques et électroniques en fin de vie. Ces politiques établissent des plans ou des plans d'action et indiquent, de manière non contraignante, ce qui peut être réalisé par une société, une institution ou une entreprise. Les lois

sont promulguées au niveau national ou municipal et appliquées par les régulateurs, et un règlement indique la manière dont une législation est appliquée par les régulateurs.

En octobre 2019, 78 pays avaient mis en place une politique, une législation ou une réglementation régissant les déchets électroniques. Avec ceux-ci, 71% de la population mondiale est actuellement couverte. Il s'agit d'une augmentation de 5 % par rapport à 66 % en 2017. Mais le taux de couverture peut être trompeur, car il donne l'impression qu'il reste peu à faire en termes de réglementation de la gestion des déchets électroniques : dans de nombreux pays, les politiques sont des stratégies non juridiquement contraignantes, mais uniquement des stratégies programmatiques. En Afrique et en Asie, par exemple, 19 pays ont une législation juridiquement contraignante sur les déchets électroniques, 5 pays ont une politique en matière de déchets électroniques mais une législation non contraignante et 31 pays ont une politique en cours d'élaboration [34].

Dans la région des États arabes, il n'existe pas encore de lois spécifiques sur les déchets électroniques. Par conséquent, les déchets électroniques ne peuvent être gérés que par le biais de la législation existante sur les déchets généraux. Dix des 11 États qui faisaient partie de l'examen plus large (Algérie, Égypte, Jordanie, Liban, Oman, Qatar, État de Palestine, Arabie saoudite, Soudan et Émirats arabes unis) disposent de cadres juridiques et réglementaires bien développés dans le domaine de la gestion des déchets et/ou plus spécifiquement sur les déchets dangereux, qui devrait également s'appliquer aux déchets électroniques [35]. En Algérie, les e-déchets sont classés comme déchets spéciaux ou déchets spéciaux dangereux, en vertu de la loi 01-19 et ses textes d'application, et le décret exécutif n° 09-19 du 20 Janvier 2009 , portant réglementation de l'activité de collecte des déchets spéciaux [32].

I.6.1 Aperçu de la législation et des politiques d'importation et d'exportation de déchets électroniques en Algérie.

Habituellement, l'exportation de déchets électroniques dans la région des États arabes est effectuée conformément aux règles de la Convention de Bâle. En Algérie, cependant, l'exportation et le transit de déchets spéciaux dangereux (y compris les e-déchets) sont, dans tous les cas, soumis à une autorisation préalable du ministre de l'environnement et ne sont autorisés que sous certaines conditions, notamment :

- le respect des règles et normes d'emballage et d'étiquetage convenues au niveau international ;

- la présentation d'un contrat écrit entre l'opérateur économique exportateur et le centre de transformation ;
- la présentation d'un contrat d'assurance avec toutes les garanties financières nécessaires ;
- la présentation d'un document de mouvement signé par le responsable de l'opération de transport transfrontalier ;
- la présentation d'un document de notification signé confirmant l'accord préalable de l'autorité compétente du pays importateur.

L'importation de déchets spéciaux dangereux (y compris les e-déchets) est strictement interdite en Algérie, conformément aux dispositions de la loi n° 01-19 du 12 décembre 2001, relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets [36].

I.7 Traitement des DEEE

La gestion des déchets est la collecte, le transport, le traitement, le recyclage ou l'élimination des déchets. La gestion des déchets est également effectuée pour réduire l'effet des matériaux sur l'environnement et en récupérer les ressources. Les déchets électroniques doivent être traités selon les principes de gestion des déchets pour deux raisons principales : les substances toxiques et les matériaux précieux. Les substances toxiques, comme le cadmium, le mercure, le plomb, etc., menacent l'environnement et la santé humaine. D'un autre côté, les matériaux précieux, comme l'or, le cuivre, etc., doivent être économisés afin d'éviter l'épuisement des ressources, qui constitue l'un des problèmes majeurs d'aujourd'hui. Il existe généralement trois manières différentes de traiter les DEEE : la réutilisation, le recyclage et l'élimination (telle que l'incinération, la mise en décharge)[37].

Le traitement des déchets électroniques est complexe en raison de leur composition variée et de leur impact environnemental. Les technologies standards de recyclage des métaux et plastiques issus des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) impliquent une série d'opérations (Figure I.8) : démontage et tri manuels, déchiquetage et/ou broyage pour réaliser une dissociation mécanique des constituants, et criblage, suivis de processus aérogravitaires, magnétiques, électrostatiques ou autres processus physiques [38].

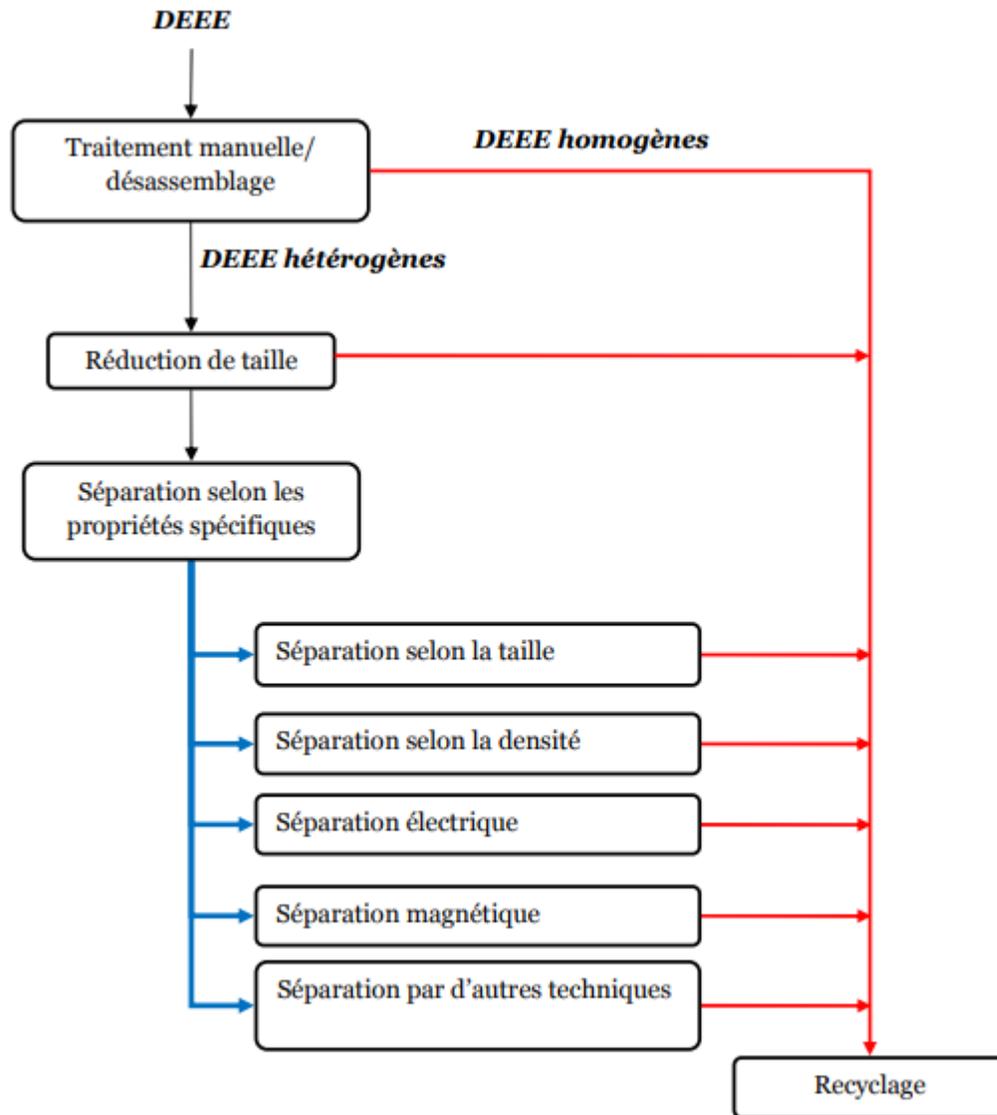


Figure I.9 : Méthodes de sélection et de séparation des matériaux basées sur les techniques de traitement des minéraux [38]

I.7.1 Traitement et désassemblage

Le tri manuel des déchets implique des opérateurs humains triant les déchets à la main sur des bandes transporteuses, atteignant une efficacité jusqu'à 95 % avec un faible investissement en capital. Cependant, cela demande beaucoup de main d'œuvre et nécessite une formation efficace pour réduire la contamination. Dans les pays à faibles coûts de main d'œuvre, le tri manuel est courant. Les pays développés envoient souvent leurs déchets vers des pays à bas salaires pour les trier et les recycler manuellement.

Les méthodes de séparation automatisées utilisent des équipements pour trier les déchets en fonction de leurs caractéristiques physiques. Bien que plus rentable, la qualité des déchets séparés

peut être inférieure lorsque la source de matière première est variable. Lorsqu'un seul type de produit est traité avec un contrôle strict, le matériau récupéré est d'une plus grande pureté [14].

Le processus de désassemblage dans le contexte du recyclage des équipements électriques et électroniques (EEE) est une approche systématique utilisée pour retirer les composants et les matériaux des dispositifs électroniques. Ce processus est essentiel pour diverses raisons, notamment la réutilisation des composants, l'élimination des composants dangereux et la récupération de matériaux précieux tels que les cartes de circuits imprimés, les câbles et les plastiques d'ingénierie. Bien que des recherches soient en cours pour développer des méthodes de désassemblage automatisé, le désassemblage manuel, soutenu par une gamme d'outils, reste l'approche prédominante en raison de sa flexibilité [39].

I.7.2 Réduction de la taille des DEEE.

La réduction de taille, ou granulation, ou broyage sont des termes synonymes qui représentent la fragmentation du matériau par la force brute exercée par le mouvement de "marteaux", "billes" ou "couteaux" dans un compartiment clos. Il s'agit d'une des plus anciennes opérations unitaires pour la réduction de matériaux solides, en plus d'être une étape importante dans de nombreux processus de conversion de matière première en produits intermédiaires ou finaux.

Dans le cas des déchets électroniques, les processus de broyage visent à atteindre un degré de libération adéquat des différents métaux qui le composent, permettant ainsi l'utilisation ultérieure de processus de séparation.

Il est important de noter que le degré de dissociation est un facteur critique pour le succès de tout processus de séparation dans le traitement des DEEE. La taille des particules obtenues après le broyage est un paramètre essentiel à prendre en compte. Cela a un impact direct sur la qualité et la pureté des matériaux récupérés [40,41], et elle influe également sur la quantité d'énergie consommée, comme le démontrent les travaux de H. Masuda et al [42].

Actuellement, diverses installations sont disponibles pour le broyage des DEEE, et le choix de l'installation appropriée dépend de plusieurs facteurs, tels que la nature des déchets à traiter (qu'ils soient métalliques ou non métalliques), les caractéristiques des particules recherchées, la capacité de production et la consommation d'énergie. Parmi les installations couramment utilisées pour le recyclage des DEEE, on trouve les broyeurs à marteaux, les broyeurs à cylindres dentés et les broyeurs à lames.

Le "Broyeur à marteaux" fonctionne en introduisant les matériaux à broyer dans une chambre de broyage par une ouverture située sous l'installation, où ils sont soumis à un impact à grande vitesse par des marteaux attachés au rotor. Le réglage de l'espace entre les barres d'impact et la vitesse de rotation du rotor permet de contrôler la taille des particules. Dans le "Broyeur à cylindre denté", les DEEE sont introduits à l'aide d'un bras hydraulique vers un cylindre rotatif et une lame dentée fixe, où les matériaux sont coupés et réduits en taille. Le "Broyeur à lames" comporte un tambour rotatif équipé d'une série de lames qui coupent finement les DEEE introduits dans la chambre de broyage. Le choix du diamètre des trous de l'écran perforé permet de contrôler la taille des particules obtenues à la sortie du broyeur.

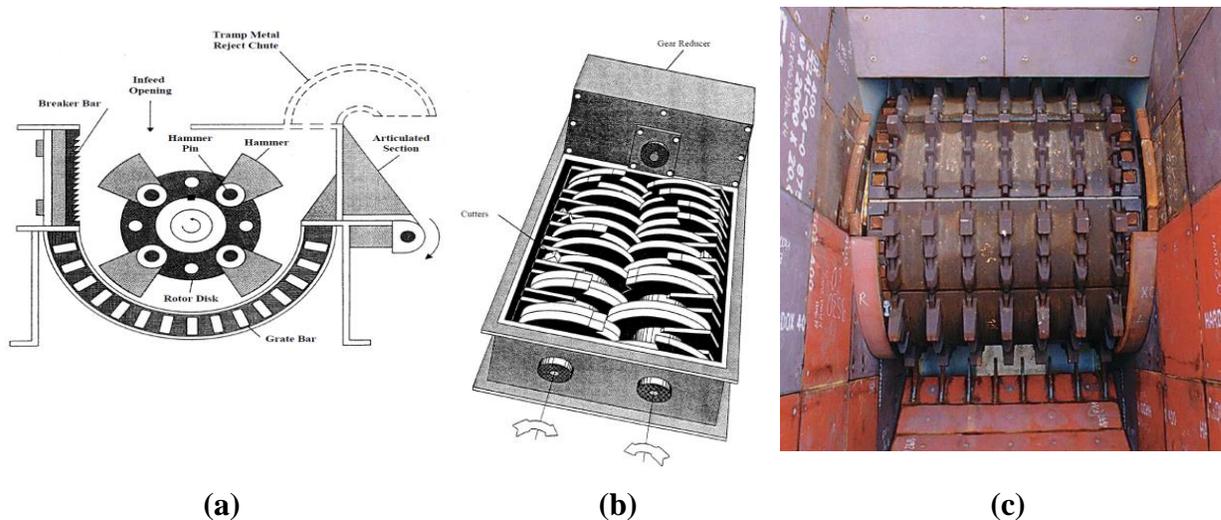


Figure I.10 : Les installations utilisées dans le broyage des DEEE, (a) Broyeur à marteau, (b) Broyeur à lames, (c) Broyeur à cylindre denté.

I.7.3 La séparation par propriétés spécifiques

Cette section décrit les diverses technologies employées pour le tri des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Ces technologies se basent sur diverses caractéristiques telles que la taille, la densité, l'électrostatique, etc. Elles sont fréquemment utilisées de manière individuelle, en tant qu'étapes multiples d'un même processus, ou en combinaison avec d'autres processus pour affiner la séparation des matériaux de façon continue

➤ Séparation par taille

Après avoir franchi la phase de broyage, le matériau doit généralement être classifié. La classification par taille repose sur la séparation des particules en fonction de leur taille différente.

L'une des formes les plus simples et les plus largement utilisées pour la séparation par taille est le tamisage. Cela s'effectue à l'aide de tamis constitués de surfaces perforées sur lesquelles les particules sont déplacées. Les particules plus petites passent à travers ces perforations tandis que les particules plus grandes restent sur le tamis. Ce processus sépare le matériau uniquement en fonction de la taille de ses particules, sans prendre en compte d'autres propriétés. Par conséquent, les tamis sont fréquemment utilisés dans la récupération des matériaux comme une étape de classification avant un processus de séparation des matériaux. Parfois, il est possible d'obtenir des fractions enrichies en certains matériaux après cette étape, qui peuvent ensuite être séparées du flux principal [38].

Les principaux équipements utilisés pour le tamisage sont les tamis vibrants, les tamis rotatifs et les machines vibrantes avec injection d'air. Selon Kasper [43], l'efficacité du tamisage peut être influencée par des facteurs liés au matériau, aux caractéristiques de l'équipement et au type de mouvement appliqué au tamis.

Les principaux facteurs concernant le matériau incluent

- La densité
- La distribution de la taille des particules
- La forme des particules
- La surface des particules.

Les facteurs clés liés à l'équipement sont la surface du tamis :

- Le pourcentage de la surface perforée
- Le diamètre des trous
- La forme des trous
- L'épaisseur du tamis.

Les facteurs liés au mouvement appliqué au tamis comprennent :

- La fréquence
- L'amplitude et la direction des vibrations
- L'angle d'inclinaison
- Le temps de traitement.

➤ **La séparation par différence de densité**

La séparation par différence de densité, également connue sous le nom de séparation gravimétrique, est une méthode de traitement ancienne, ayant été utilisée pour séparer l'or dès 3000

av. J.-C. en Égypte antique. Bien que largement employée dans le traitement des minéraux, cette technique repose sur des mécanismes qui ne sont pas entièrement compris.

Les principaux mécanismes en jeu incluent l'accélération différentielle, les taux de sédimentation, la vitesse différentielle en écoulement laminaire, la consolidation interstitielle et les effets des forces de cisaillement. La séparation par densité vise à séparer les matériaux en fonction de leurs densités, tailles et formes. Elle trouve des applications dans le recyclage des déchets solides, notamment les déchets électroniques, qui peuvent contenir des polymères, des métaux légers comme l'aluminium, et des métaux lourds tels que le cuivre, le fer, le nickel et le plomb. Cette méthode permet de libérer et de séparer les composants des composites et assemblages.

Divers systèmes de séparation par densité sont utilisés, tels que les classificateurs d'air pour les composants non métalliques et les procédés de milieu dense pour les métaux non ferreux, parmi d'autres, comme la séparation en milieu dense, les suspensions, les gabarits et les concentrateurs à film fluide. Pour plus de détails, veuillez consulter [38].

➤ **La séparation magnétique**

La séparation magnétique est une méthode largement utilisée pour séparer et concentrer des matériaux, couramment employée dans la production de minéraux et le recyclage d'équipements électriques et électroniques ainsi que de divers types de déchets, ce qui en fait une technique respectueuse de l'environnement. Cette technique est régie par deux facteurs clés : la manière dont différents matériaux réagissent lorsqu'ils sont exposés au même champ magnétique et les forces magnétiques qui agissent sur eux. Ces réponses peuvent entraîner une attraction ou une répulsion au sein du champ magnétique. La susceptibilité magnétique (X), une propriété déterminant la réaction d'un matériau à un champ magnétique externe, peut être décrite en fonction de l'intensité de la magnétisation (M) et du champ magnétique appliqué (H).

$$X = M/H \quad (I.1)$$

L'intensité du champ à l'intérieur du matériau soumis à un champ magnétique est donnée par l'équation.

$$B = \mu_0(H + M) \text{ (Tesla)} \quad (I.2)$$

où : B est l'intensité du champ et μ_0 est la perméabilité magnétique du vide. Un Tesla (T) équivaut à 10^4 Gauss, ce qui correspond à $1 \text{ N A}^{-1} \text{ m}^{-1}$.

Les matériaux peuvent être classés en fonction de leur susceptibilité magnétique en matériaux diamagnétiques, paramagnétiques et ferromagnétiques. **Les matériaux diamagnétiques** sont repoussés par le champ magnétique externe, tandis que **les matériaux paramagnétiques** sont faiblement attirés en raison de l'alignement des dipôles magnétiques atomiques avec le champ. **Les matériaux ferromagnétiques** présentent des interactions fortes entre les dipôles magnétiques atomiques, s'alignant fortement sur les aimants et étant attirés par eux. Les matériaux ferromagnétiques, tels que le fer, le cobalt et le nickel, revêtent une importance particulière pour les techniques de séparation magnétique [38].

➤ **La séparation électrostatique.**

Bien que la séparation magnétique ait été utilisée avec succès pour détecter les matériaux ferreux, la séparation électrostatique, définie comme le tri sélectif des corps chargés électriquement ou polarisés sous l'action des forces du champ électrique, est la solution privilégiée pour traiter les particules non ferreuses contenues dans les DEEE granulaires [44]. Différents mécanismes physiques (induction électrostatique, chargement par couronne et effet triboélectrique) et différents dispositifs (plaque, rouleau, chute libre, à deux convoyeurs, à courroie et de type disque) sont utilisés pour la séparation des divers mélanges de matériaux métalliques et isolants qui composent ces déchets [45].

Les séparateurs électrostatiques offrent plusieurs avantages dans le contexte du recyclage des déchets électroniques. Ils sont efficaces pour séparer divers matériaux en fonction de leur conductivité et de leur capacité à être chargés électriquement, ce qui est particulièrement utile pour les dispositifs électroniques complexes. De plus, cette méthode de séparation est non destructive, préservant la qualité des matériaux. Elle est respectueuse de l'environnement en ne produisant pas d'émissions nocives, elle est polyvalente, permettant de gérer divers types de déchets électroniques, et peut atteindre des niveaux élevés de pureté [39,40], essentiels pour récupérer des matériaux de valeur. De plus, elle est économe en énergie, réduit le tri manuel et les coûts de main-d'œuvre, améliorant ainsi l'efficacité du recyclage [44]. Cependant, le choix de la méthode de séparation dépend des matériaux spécifiques et des objectifs du recyclage, avec d'autres méthodes comme la séparation magnétique et la séparation par gravité pouvant être utilisées en complément.

Dans le prochain chapitre, la séparation électrostatique sera discutée en détail

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE). Bien que les déchets de câbles électriques soient tout aussi significatifs, nous les incluons dans la catégorie des DEEE, car la plupart des aspects associés aux DEEE sont également pertinents pour les déchets de câbles électriques. Cela concerne notamment les considérations économiques, les approches de gestion, ainsi que les méthodes de traitement.

Une conclusion qui peut être tirée à propos des DEEE est qu'il existe un besoin de stratégies de gestion et d'élimination efficaces pour réduire les impacts négatifs de ces appareils sur l'environnement et la santé humaine. Cela peut impliquer des initiatives telles que des programmes de recyclage, des lois et des réglementations pour encourager l'élimination appropriée des DEEE, et des campagnes d'éducation et de sensibilisation pour promouvoir un comportement respectueux de l'environnement. Il est également important pour les fabricants de concevoir des produits plus faciles à recycler et moins dangereux pour l'environnement tout au long de leur cycle de vie.

La séparation électrostatique du cuivre, de l'aluminium et des matériaux isolants électriques se positionne comme une technologie économiquement viable pour la préservation de l'environnement. Cette méthode offre du plastique recyclé de qualité élevée et une efficacité accrue dans le recouvrement des métaux par rapport aux méthodes conventionnelles de traitement des déchets. Au chapitre suivant, nous fournirons des informations générales sur les séparateurs électrostatiques.

Chapitre II

II. Généralités sur les séparateurs électrostatiques.



Introduction

La séparation électrostatique est un terme générique donné à une importante classe de technologies de traitement de matériel largement utilisée pour le tirage des mélanges granulaires de grâce à des forces électriques agissant sur des particules chargées ou polarisées[46].

En revanche, un séparateur électrostatique est l'appareil conçu pour mettre en œuvre la séparation électrostatique. Il comprend généralement des dispositifs pour charger les particules, des électrodes pour créer des champs électrostatiques, et des mécanismes pour diriger les particules chargées vers des zones spécifiques en fonction de leur nature électrique.

Ces séparateurs électrostatiques sont couramment utilisés dans le traitement des déchets électroniques, des câbles électriques et d'autres flux de matériaux complexes, offrant une méthode efficace pour récupérer des métaux précieux tout en séparant d'autres composants en vue d'un recyclage plus ciblé. En applications industrielles, on distingue trois classes « standard » de séparateurs électrostatiques : (1) de type à plaques, basé sur le chargement par induction électrostatique de particules conductrices ; (2) de type rouleau, qui tire parti de la décharge corona comme mécanisme de charge pour les particules non conductrices ; et (3) de type à chute libre, utilisant l'effet triboélectrique pour différencier la charge des matériaux isolants [44].

II.1 Principes de la séparation électrostatique

La séparation électrostatique est une méthode de tri ou de concentration des matériaux qui repose sur les différences de conductivité électrique (résistivité) entre les composants d'un mélange de particules, sous l'influence d'un champ électrique. L'origine de l'appellation "séparation électrostatique" remonte aux premiers séparateurs purement électrostatiques qui ont été développés, sans recourir au prétendu "flux ionique". Cependant, de nos jours, des dispositifs sont utilisés dans lesquels l'énergie est appliquée sous forme de flux ionique [47].

Deux conditions essentielles sont nécessaires pour la séparation électrostatique : un champ électrique d'une intensité suffisante pour séparer une particule électriquement chargée, et des particules présentant une charge électrique superficielle ou susceptibles de subir une polarisation induite, ce qui leur permet de réagir à l'influence du champ électrique. L'électrification par induction se produit lorsqu'une particule non chargée entre en contact avec une surface conductrice mise à la terre (rotor) en présence d'un champ électrique, en supposant la même polarité et le même potentiel que toute surface. L'électrification dans ce cas dépend de l'intensité du champ et de la

nature des particules. Par le biais de l'induction, à la fois le matériau conducteur et le matériau diélectrique acquièrent une charge électrique, ce dernier acquérant une polarisation due au transfert de charges. Ainsi, les particules conductrices prennent rapidement le potentiel du rotor (opposé à l'électrode de décharge) et sont attirées vers l'électrode, tandis que les particules non conductrices, celles qui sont incapables d'acquérir une charge, sont attirées vers le rotor ou restent polarisées, traversant largement le champ électrique sans être altérées. Cela permet la séparation des matériaux contenant des particules conductrices de ceux contenant des particules non conductrices. Les particules peuvent acquérir une charge de surface principalement par trois mécanismes : l'attrition (séparation triboélectrique), le bombardement ionique (effet couronne) [38].

II.1.1 Mécanismes de chargement électrique

La séparation électrostatique d'un mélange granulaire est réalisable lorsque les composants de ce mélange portent des charges électriques différentes. Ces charges peuvent être générées par un ou plusieurs des trois mécanismes physiques distincts, à savoir l'effet tribo-électrique, l'effet couronne et l'induction électrostatique.

II.1.1.1 La triboélectricité

La triboélectricité, dérivée du terme grec "tribein" signifiant frotter, représente un phénomène électrostatique qui émerge du contact et du frottement entre deux matériaux de natures différentes. Lorsque ces matériaux, à l'origine électriquement neutres, entrent en contact et sont soumis au frottement, des charges électriques sont transférées de l'un à l'autre, induisant une charge électrique de polarité différente (Figure II.1). La polarité et la quantité de ces charges triboélectriques varient en fonction de divers facteurs, tels que la nature chimique des matériaux, leur taille, leur rugosité de surface, la température, les contraintes mécaniques, les polluants gazeux et les champs électriques externes [44].

Plusieurs mécanismes physiques ont été avancés pour expliquer ce transfert de charges, impliquant des processus tels que le transfert d'électrons, d'ions ou de matériau en raison de différences dans les propriétés de surface et de masse des matériaux en contact[48]. Quel que soit le mécanisme sous-jacent, les matériaux peuvent être classés dans des "séries triboélectriques" en fonction de la quantité de charges positives ou négatives transférées. Chaque matériau dans une telle série se charge négativement par rapport à ceux à sa gauche dans le tableau II 1. Par exemple,

après une collision avec un matériau en ABS, une particule en HIPS se charge négativement, mais la même particule se chargera positivement au contact d'un matériau en PVC [44].

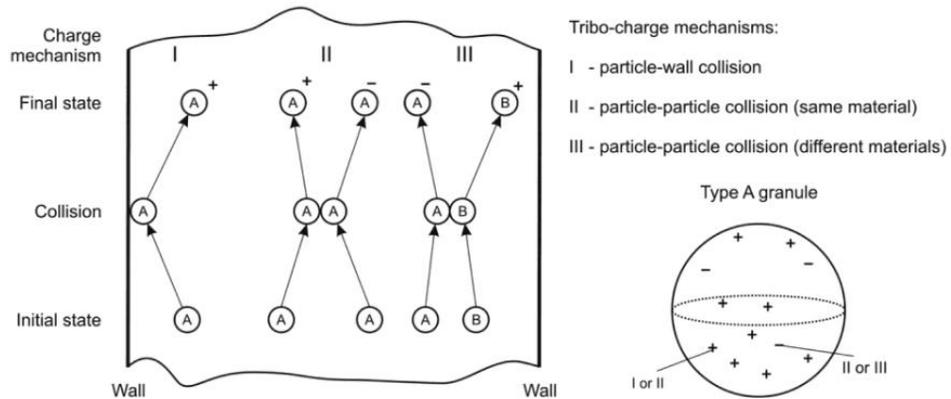


Figure II.1 : Représentation schématique des trois mécanismes de tribocharge d'un mélange binaire de plastiques granulaires A et B en vue d'une séparation électrostatique; I : collision particules-parois ; II : collision particule-particule (même matériau A) ; III : collision particule-particule (différents matériaux A et B)[49].

Tableau II-1 : Exemples de séries triboélectriques établies par divers groupes de recherche [44].

		(+)		Charge							(-)	
Al	PMMA					PE	PET	PP	PVC			
PA	PMMA	PC	PS			PE	PP	PET	PVC	PTFE		
	PMMA		PS	ABS		PET	PE	PP	PVC	PTFE		
	PMMA		GPPS	ABS	HIPS	PET	PE	PP	PVC			

GPPS, General Purpose Polystyrene ; **HIPS**, High Impact Polystyrene ; **PMMA**, Polymethylmetacrylate ; **PTFE**, Polytet- rafluoroethylene.

En réalité, il existe un désaccord parmi les chercheurs concernant la classification des matériaux, et il n'y a pas de série triboélectrique universellement acceptée. Cependant, des avancées récentes dans la recherche [50] ont introduit une méthode standardisée pour quantifier la série triboélectrique pour une large gamme de polymères, établissant ainsi la triboélectrification quantitative comme une propriété fondamentale des matériaux. Cette méthode normalise les conditions expérimentales en mesurant les matériaux testés avec un métal liquide dans un environnement spécifique. Elle permet d'évaluer de manière uniforme la triboélectrification de surface des matériaux généraux. La densité de charge triboélectrique normalisée est calculée pour mettre en évidence la capacité intrinsèque des polymères à gagner ou à perdre des électrons.

Cette série triboélectrique quantitative peut servir de référence pour l'application de la triboélectrification dans des domaines tels que la récupération d'énergie et la détection auto-alimentée. Le résultat est présenté dans la figure II.2.

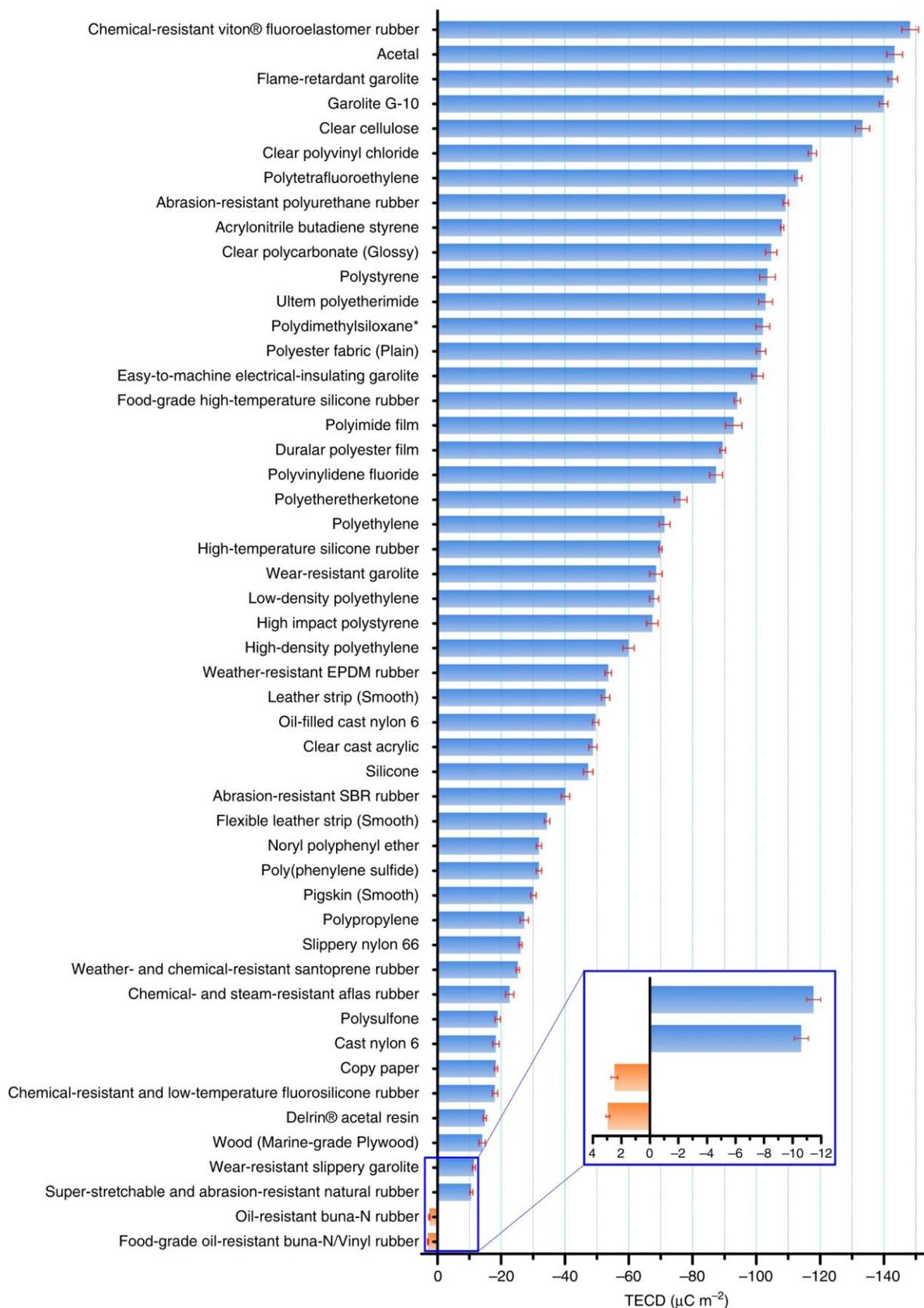
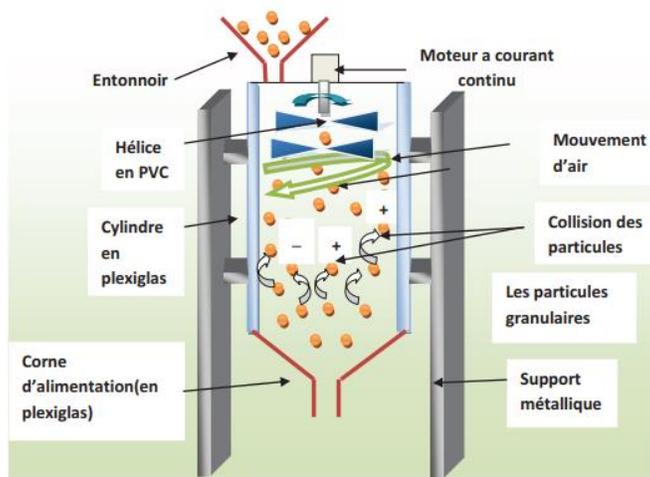


Figure II.2 : La série triboélectrique quantifiée. La barre d'erreur indique la plage dans un écart type [50].

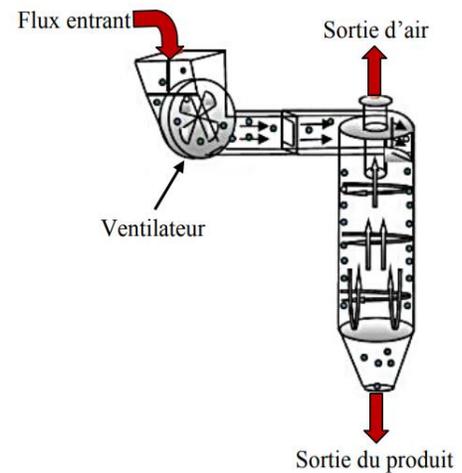
Dispositifs de chargement triboélectrique :

Dans les applications industrielles de la technologie de séparation électrostatique, le mélange granulaire plastique, dépourvu de contaminants métalliques, subit un processus de tribochargement après l'élimination des impuretés. Les granules acquièrent leur charge par des collisions et des frottements entre eux ou avec les parois du dispositif de tribochargement.

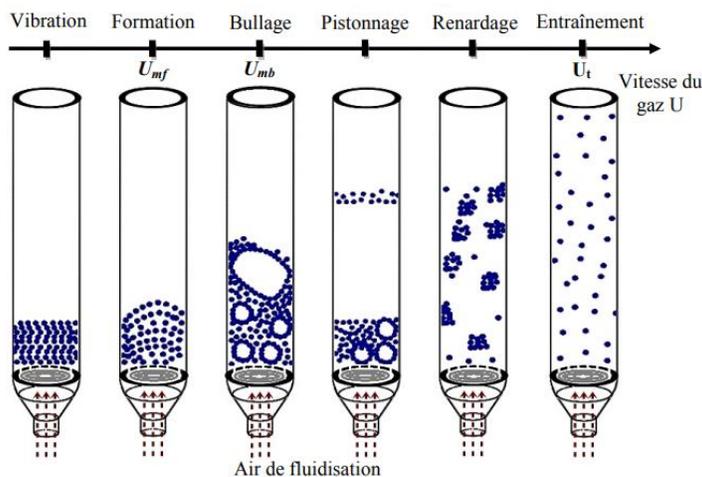
Divers dispositifs de tribochargement (Figure II.3), tels que le chargement par ventilateur [51] (Figure II.3a), les cyclones [52] (Figure II.3b), le chargement à lit fluidisé [53] (Figure II.3c), le chargement statique (Figure II.3d) [54], chargement à cylindre rotatif [55](Figure II.3e), et le chargement tribo-aéro-électrostatique[56,53] (Figure II.3f).



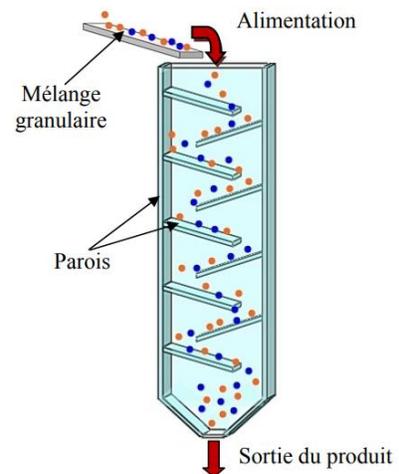
(a)



(b)



(c)



(d)

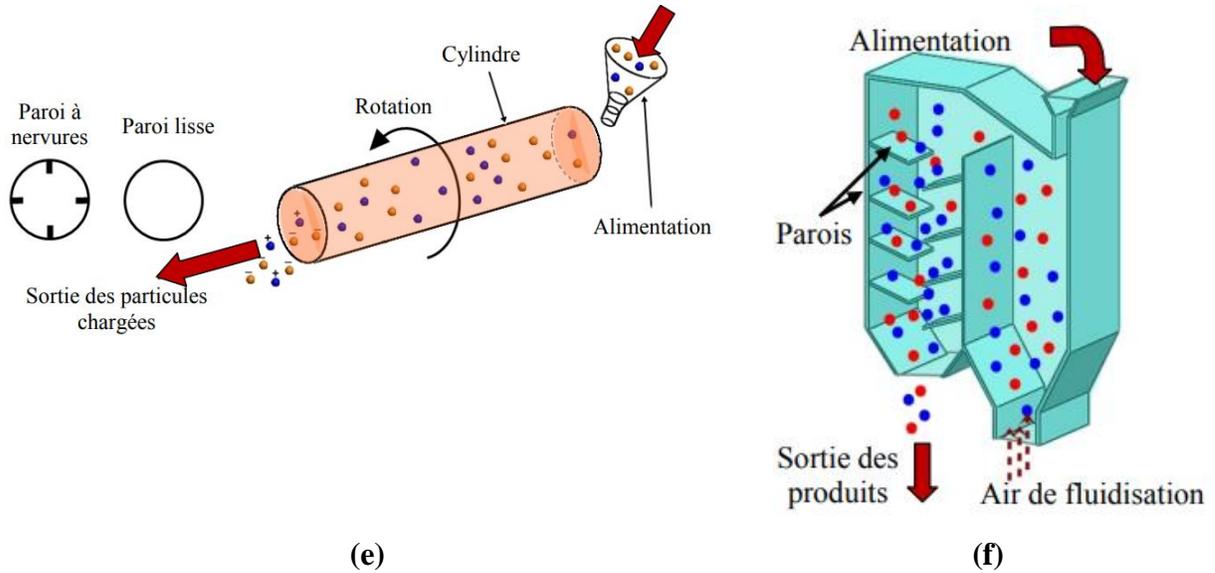


Figure II.3 :Divers dispositifs de tribochargement (a) dispositif de chargement par ventilateur [57],(b) dispositif de chargement par cyclone [55],(c) Régimes d'un lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation,(d) dispositif de chargement statique [54],(e) Dispositif de chargement à cylindre rotatif [55],(f) dispositif de chargement tribo-aéro-statique

II.1.1.2 La décharge de couronne

La décharge de couronne est un phénomène électrique de faible puissance qui se produit à pression atmosphérique ou à proximité de celle-ci. La couronne est généralement générée par des champs électriques intensifs associés à des fils, des pointes ou des arêtes vives de faible diamètre présents sur une électrode (Figure II.9). Le nom "corona" trouve son origine dans l'observation par les marins des décharges provenant des mâts de leurs navires lors d'orages électriques. La couronne se manifeste sous la forme d'une faible décharge filamenteuse qui s'étend vers l'extérieur depuis l'électrode de décharge. En raison de sa facilité à être générée, la couronne a trouvé de nombreuses applications dans divers processus. [58].

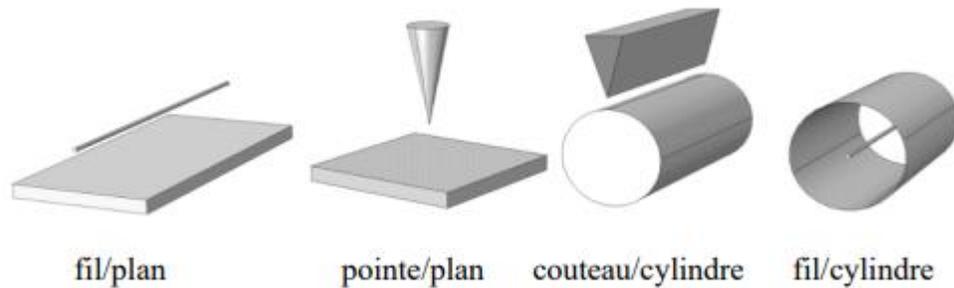


Figure II.4 : Configuration d'électrodes pour la génération de la décharge couronne [59]

Description

L'effet couronne est lié à l'ionisation de l'air dans une zone de champ électrique très intense produite entre deux électrodes métalliques : l'une dite active, se présente généralement sous la forme d'une pointe ou d'un fil de petit diamètre, et est reliée à une source de haute tension de plusieurs kilo volts, et l'autre passive qui n'est autre qu'une plaque ou une grille métallique reliée à la terre. À proximité de l'électrode active la tension varie fortement sur une courte distance créant ainsi un fort champ électrique, responsable de l'accélération des quelques électrons issus de l'ionisation naturelle de l'air. L'avalanche électronique a lieu à proximité de l'électrode active quelle que soit la polarité qui lui est appliquée. (Figure II.5).

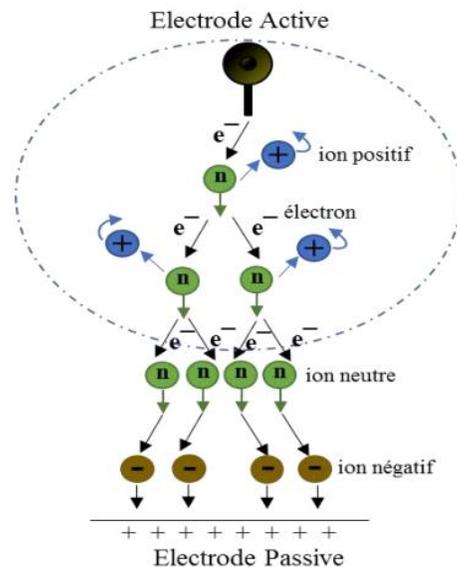


Figure II.5: Génération d'une avalanche électronique et de la décharge couronne [59].

Des électrons libérés parviennent à interagir avec les molécules d'air, provoquant la libération d'autres électrons. Ces électrons se dirigent ensuite vers une électrode opposée, tout en provoquant la multiplication des électrons libérés en heurtant d'autres molécules de gaz. Les molécules initialement libératrices d'électrons deviennent des ions positifs et sont attirés vers l'électrode active, où elles retrouvent leur neutralité. Ce phénomène se produit dans une zone définie par un fort champ électrique, appelée zone d'ionisation, située à quelques micromètres de l'électrode. Au-delà de cette zone, le champ électrique n'est plus suffisamment puissant pour que les électrons puissent libérer d'autres électrons des molécules d'air. À la place, les électrons s'associent aux molécules d'air pour former des ions chargés négativement. Ces ions interagissent

avec les particules et, en raison de leur durée de vie prolongée, contribuent à la séparation des matériaux, les chargeant négativement.

Types de décharge couronne.

La décharge couronne présente l'avantage de permettre le dépôt de charges positives ou négatives en fonction de la polarité de l'électrode de faible rayon de courbure, appelée "électrode active". Si l'électrode est positive, on parle de décharge couronne positive, sinon de décharge couronne négative. En raison des différences de masse entre les électrons (négatifs) et les ions (positifs), la physique de ces deux types de décharge couronne est fondamentalement distincte.

Un champ électrique intense entoure la pointe de l'électrode, provoquant l'ionisation du gaz environnant (Figure II.6 (a)). Dans le cas d'une électrode active positive, les électrons proches de la pointe sont attirés vers celle-ci, créant une zone fortement ionisée en pointillé sur la Figure II.5. Les ions positifs générés sont repoussés par l'anode et se dirigent vers la région à faible champ électrique, appelée zone de dérive.

Lorsque l'électrode est portée à un potentiel négatif élevé, les ions positifs créés dans la zone d'ionisation se déplacent dans le sens du champ électrique et convergent vers la pointe (Figure II.6 (b)). Des électrons sont éjectés de la cathode par collision, déclenchant ainsi une nouvelle avalanche d'électrons. Les électrons et les ions négatifs sont repoussés par la pointe vers la zone de faible champ électrique, appelée zone de dérive. En présence d'un gaz électronégatif, comme l'air, les électrons se lient aux molécules électronégatives en cours de déplacement, créant ainsi des ions négatifs dans la zone de dérive. L'avalanche électronique progresse de l'électrode vers le plan de masse et s'arrête à une distance où le champ électrique n'est plus suffisant pour maintenir l'ionisation du gaz.

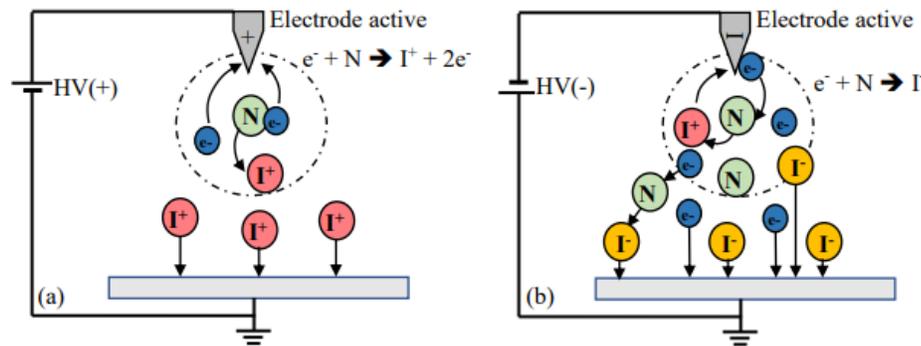


Figure II.6: Décharge couronne négative pour une configuration pointe-plan, (a) cas de décharge couronne positive et (b) cas de décharge couronne négative [59].

Facteurs influençant la décharge couronne

Plusieurs facteurs peuvent influencer le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne, on distingue trois facteurs essentiels :

- Facteurs géométriques : formes des électrodes et distance inter-électrodes
- Facteurs physico-chimiques : pression, humidité et température.
- Facteurs électriques : valeur ; polarité et forme de la tension appliquée.

II.1.1.3 L'induction électrostatique

L'induction électrostatique est une méthode qui permet de déplacer des charges électriques dans un objet neutre en utilisant un objet électriquement chargé sans contact direct entre les deux. L'objet chargé génère un champ électrique qui induit la polarisation de l'objet neutre, provoquant la séparation des charges positives et négatives. Si l'objet neutre est conducteur et temporairement en contact avec une électrode reliée à la masse, les charges polarisées près du point de contact sont évacuées vers la terre. Ainsi, lorsque l'objet est déconnecté de la terre, il conserve une charge nette non nulle. Les objets isolants ne sont jamais chargés par induction électrostatique, car les charges ne peuvent pas s'écouler à travers eux [60].

Ce mécanisme explique, par exemple, la charge d'une particule conductrice placée entre deux électrodes de polarités différentes. Dans la situation illustrée sur la Figure II.7, une particule conductrice initialement neutre, déposée sur la surface d'une électrode connectée à la terre, se polarise dans le champ électrique créé par une autre électrode sous haute tension de polarité négative. La particule, étant conductrice, acquiert finalement une charge positive (du même signe que l'électrode avec laquelle elle est en contact)[61].

Pour améliorer les performances de la séparation électrostatique des mélanges conducteurs/isolants, l'induction électrostatique peut être combinée avec l'effet couronne en ajoutant une seconde électrode qui produit un champ électrique étendu, intense et presque uniforme. Cela augmente la force électrique de décollage des particules conductrices déposées sur une surface métallique reliée à la terre.

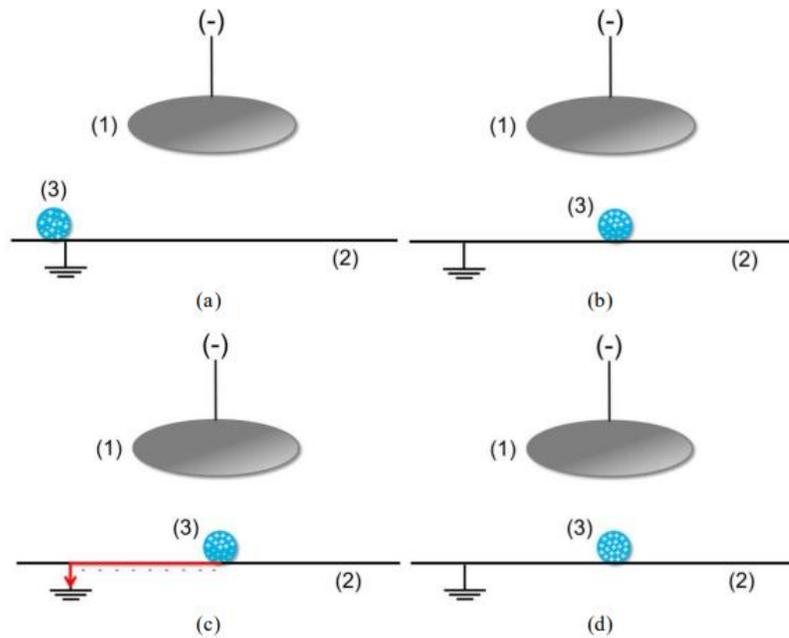


Figure II.7: Représentation schématique de l'induction électrostatique. (a) Particule conductrice initialement neutre ; (b) Particule conductrice polarisée sous l'action du champ électrique ; (c) Ecoulement des charges négatives vers la terre ; (d) Particule conductrice chargée positivement. (1) Electrode elliptique reliée à une source de haute tension négative ; (2) Electrode plaque reliée à la terre ; (3) Particule conductrice [61]

Les électrodes utilisées pour générer ce champ électrique sont souvent de forme tubulaire ou elliptique, car cette forme est idéale pour étendre et uniformiser le champ généré, qu'elles soient statiques ou rotatives. La Figure II.8 présente une électrode statique de forme elliptique utilisée dans le séparateur CARPCO pour des mélanges conducteurs/isolants (cuivre, PVC), ainsi qu'une électrode rotative de forme cylindrique utilisée dans le séparateur de l'INRA de Montpellier en laboratoire pour des mélanges végétaux.



(a)



(b)

Figure II.8: Différentes électrodes électrostatiques ; (a) : Electrode elliptique ; (b) : Electrode cylindrique tournante.

II.2 Bibliographie sur les applications des processus de séparations électrostatiques.

Actuellement, les processus de séparations électrostatiques sont considérés parmi les plus performants dans le tri des mélanges granulaires en fonction de leur conductivité électrique. Cette technique utilise les forces qui agissent sur les particules chargées ou polarisées soumises à un champ électrique intense généré entre deux électrodes alimentées en haute tension. Les tensions des sources utilisées dans ce type de processus varient de 10 à 100kV DC. L'ensemble des applications réalisées jusqu'à ce jour montre l'intérêt grandissant de l'exploitation des processus de séparation électrostatique dans l'industrie du traitement des DEEE [62].

Il existe plusieurs types de séparateurs électrostatiques, traitants différentes catégories de mélanges, la tableau II.1 regroupe des applications déjà réalisées.

Tableau II-2: Applications des séparateurs électrostatiques [62]

Installations	Application			
	Produit	Source	Taille	Réf
Chute libre	PVC/HDPE	Matières premières d'extrudeuse	1-4 mm	[63]
	Charbon/sandre	Mines de Ramagundam, Inde	<300µm	[64]
	PS/PE	NAPOCHIM S.A., Cluj-Napoca	PS 3x3x2 mm PE 2,5x2x2	[65]
	PE/PS	Inconnue	inconnue	[66]
	PVC / caoutchouc	Câbles de communication	1.6mm<Ø <4mm	[67]
	PP/(PS, HDPE)	Déchets industriels	2-5mm	[68]
	PVC/(PET,PP ,PE,PS)	Inconnue	1.4-2mm	[66]
	PVC/PE	inconnue	1-2mm	[69]
	PET/PVC	Matières premières d'extrudeuse	PET 4x2x2 mm PVC 4x2x2	[70]
À deux étages	PA/PC	Matières premières d'extrudeuse	2,5-3,6 mm	[71]
	HDPE/PVC/PC	Matières premières d'extrudeuse	inconnue	[56]
A deux cylindres	ABS/HIPS	Matières premières d'extrudeuse	≈ 1 - 3mm	[72]
	PVC/PVC	Matières premières d'extrudeuse	Poudre	[73]
A deux disques	PVC/PVC	Matières premières d'extrudeuse	Poudre	[74]
A plaque en S	Sel/verre/sable	Sel de table/ sable de construction / verre inconnu	0.125mm<Ø <0.25mm	[75]

	Sel/(verre, sable)	inconnue	<0.1mm	[69]
	Quartz/Magnetite	Quartz : Valenii de Munte, Romania / Magnetite : Teliuc, Romania	Poudre	[76]
Cylindre tournant	PE/PVC/Cu	Déchets de câbles électriques	<5mm	[77] [78]
	Conducteur/isolant	Cartes électroniques	0.6-1.2mm	[79]
	Conducteur/isolant	Cartes électroniques	0.3-0.45mm	[80]
	PVC/ (Cu fine, Cu massive)	Déchets de câbles électriques	<1cm	[69]
	PVC/Cu	Déchet de câbles électriques	inconnue	[81]
A 2 bandes transporteuse	ABS/HIPS	DEEE	<2mm	[82]

II.3 Types de séparateurs électrostatiques

II.3.1 Séparateur triboélectrique à chute libre

Le schéma de la Figure II.9 résume le fonctionnement d'un séparateur triboélectrique à cylindre tournant [83] :

Un flux de particules en plastiques propres, secs et broyés 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.

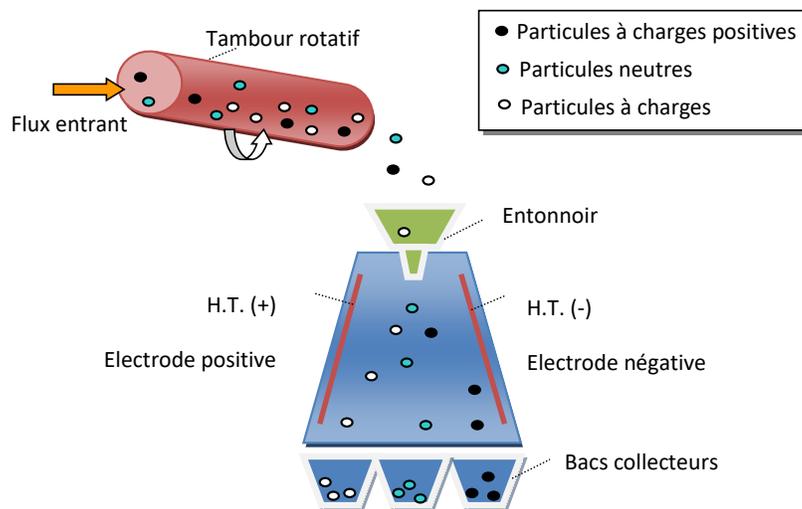


Figure II.9 : Principe de fonctionnement d'un séparateur à chute libre avec chargement triboélectrique par cylindre tournant [83].

Les particules chargées tombent ensuite dans un fort champ électrique horizontal produit entre deux électrodes et situé dans une tour séparée. Les particules chargées sont alors déviées dans leur chute car celles-ci sont attirées par l'électrode du signe opposé à leur charge.

Les granules chargés positivement sont attirés vers l'électrode négative, et contrairement, les granules chargés négativement sont attirés vers l'électrode positive. Les produits purifiés tombent près de l'électrode positive et de l'électrode négative, alors que les produits tombant au milieu sont récupérés et peuvent être retraités.

De nombreuses études ont été réalisées dans le but de connaître les caractéristiques de ce séparateur et d'atteindre le point de fonctionnement optimal. Dans l'article [84], les chercheurs ont analysé la possibilité de contrôler les trajectoires des particules dans de tels séparateurs en modifiant les conditions d'admission des particules dans l'espace entre les électrodes. La modélisation numérique et l'étude expérimentale ont démontré que l'angle d'entrée de l'alimentation, influence de manière significative le résultat de la séparation électrostatique.

Dans l'article [85], les chercheurs se sont penchés sur l'identification du point de consigne et ont effectué des tests de robustesse d'un processus de séparation triboélectrostatique pour les plastiques granulaires mélangés. En [86], l'article met en évidence que le tri des particules est plus efficace lorsqu'il est effectué dans un séparateur électrostatique à tambour pour les granulés grossiers (taille > 2 mm).

De plus, les chercheurs ont développé un modèle mathématique pour calculer les trajectoires des particules de taille millimétrique dans ce séparateur dans l'étude [87]. L'algorithme de résolution a été implémenté sous la forme d'un programme MATLAB, utilisant les résultats du calcul du champ électrique effectué avec le logiciel COMSOL.

Dans l'article [88], les chercheurs ont résolu un problème de tri de particules millimétriques en étudiant une configuration modifiée avec des électrodes cylindriques rotatives au lieu d'électrodes verticales plates, afin de surmonter l'effet d'impact des particules.

II.3.2 Séparateur triboélectrique à tapis roulant

Le schéma de la figure II.10 explique le fonctionnement d'un séparateur triboélectrique à tapis roulant. Les particules chargées par triboélectricité 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 permettant ainsi la séparation [89].

Et pour une meilleure exploitation, dans [90], les chercheurs ont réalisé une étude dans le but d'optimiser la conception et le fonctionnement d'une telle installation, composée d'un séparateur électrostatique de type ceinture associé à un dispositif de tribochargement de type hélice. De meilleurs résultats sont obtenus pour des mélanges équilibrés, composés à parts égales de chaque constituant.

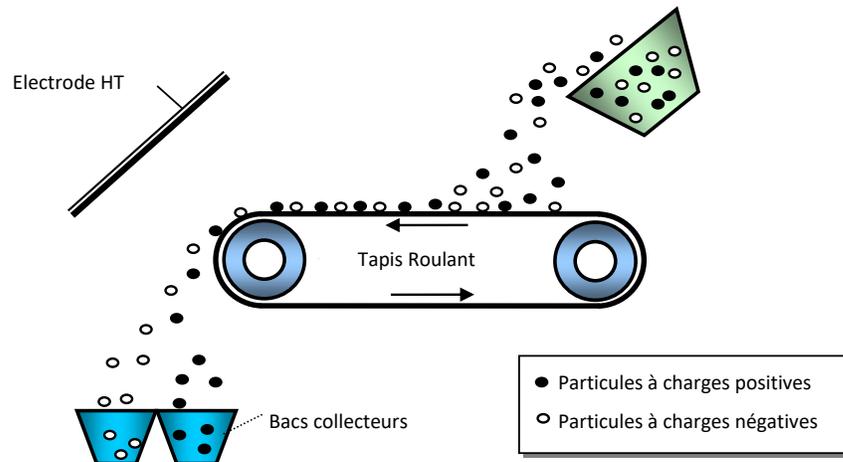


Figure II.10.Principe de fonctionnement d'un séparateur triboélectrique à tapis roulant

II.3.3 Séparateur tribo-aéro-électrostatique à tambours transporteurs.

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[91].

Les résultats obtenus de l'expérience [74], où les granules à séparer sont chargés dans un lit fluidisé affecté par un champ électrique généré par deux électrodes à rouleaux rotatifs, démontrent l'efficacité de cette méthode pour séparer les plastiques des déchets granulaires.

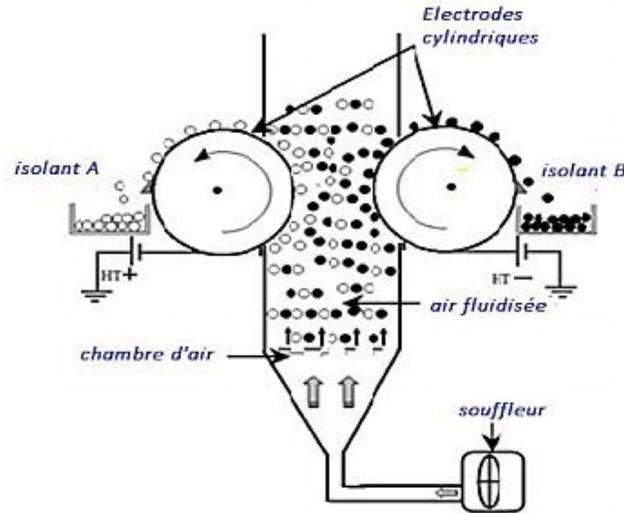


Figure II.11.Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à tambours transporteurs[92]

II.3.4 Séparateur tribo-aéro-électrostatique à 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.12). Elles s'appuient sur des 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 [93] .

On [82] Les chercheurs ont mené une étude visant à améliorer le fonctionnement, ce qui les a conduits à établir un ensemble de directives, notamment la méthode de stockage du produit et les facteurs ayant le plus d'impact sur le résultat du tri. L'étude [94] a porté sur l'amélioration du pilote industriel pour la séparation de mélanges binaires de matériaux isolants granulaires à l'aide du même séparateur. Les essais effectués avec ce pilote ont été prometteurs et ont conduit aux conclusions suivantes :

- L'efficacité de la séparation tribo-aéro-électrostatique des particules dans le mélange plastique peut être accrue en réduisant la surface transversale du lit fluidisé.

-Le choix des matériaux pour les parois latérales revêt une grande importance dans l'amélioration des performances du dispositif de séparation. Il est donc recommandé d'utiliser des matériaux qui, dans la série triboélectrique, sont équidistants de ceux présents dans le mélange granulaire, afin de ne pas favoriser la récupération d'un composant du mélange par rapport à l'autre.

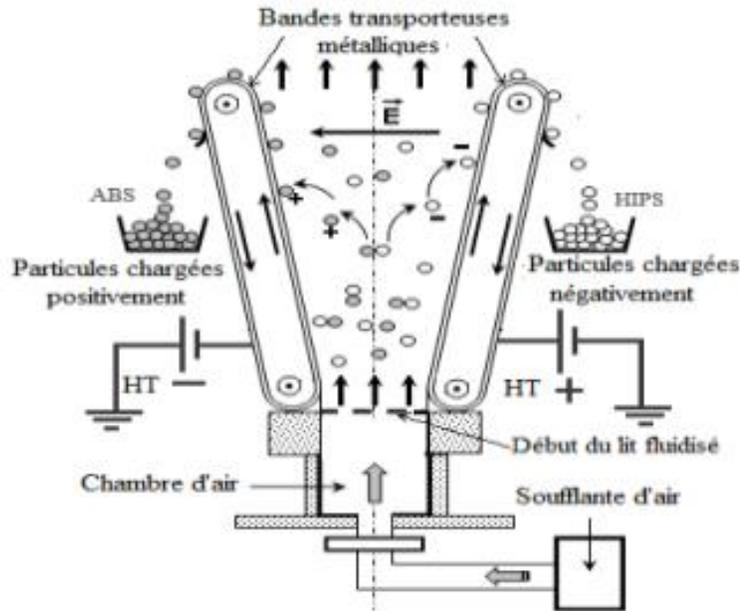


Figure II.12.Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteur [91]

II.3.5 Séparateur triboélectrique à deux disques

Deux disques métalliques sont montés sur un même arbre, celui-ci étant fixé à l'arbre d'un moteur électrique tournant à une vitesse modérée de quelques dizaines de tours par minutes. L'arbre étant maintenu par deux paliers. Les deux disques sont plongés en partie dans un lit fluidisé 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. Un flux d'air généré par un compresseur et entrant à travers la boîte de répartition située en dessous du lit fluidisé provoque la fluidisation. Le flux d'air est délivré avec un débit déterminé et réglable. 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 matériau, permet de collecter les produits après leur séparation[95].

Dans une étude expérimentale [44], les résultats obtenus sont prometteurs, car les mélanges de différents plastiques de taille micrométrique ont été séparés avec succès, atteignant des niveaux de pureté élevés.

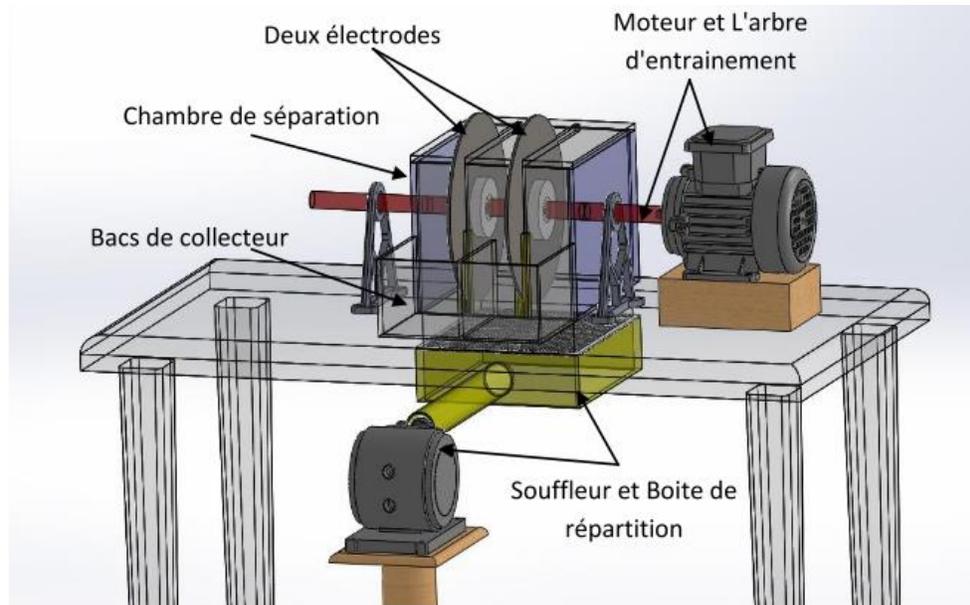


Figure II.13. schéma descriptif global de séparateur à deux disques rotatifs [95]

II.3.6 Séparateur électrostatique à tapis roulant

Un chargement par effet de couronne est appliqué aux matériaux sur une courroie transporteuse conductrice. Ceci permet aux particules de coller plus ou moins à la courroie. La charge acquise par les particules va diminuer petit à petit et va permettre aux particules de tomber dans des réceptacles (Figure II.14).

Les particules les plus isolantes retiennent la charge et colle au tapis plus longtemps, tandis que les particules lourdes ne collent pas et tombent à la fin du convoyeur [89].

Comme les chercheurs l'ont prouvé dans l'étude [96], un séparateur corona-électrostatique à bande pourrait être une solution appropriée pour le tri sélectif des produits conducteurs et non conducteurs contenus dans les déchets micronisés.

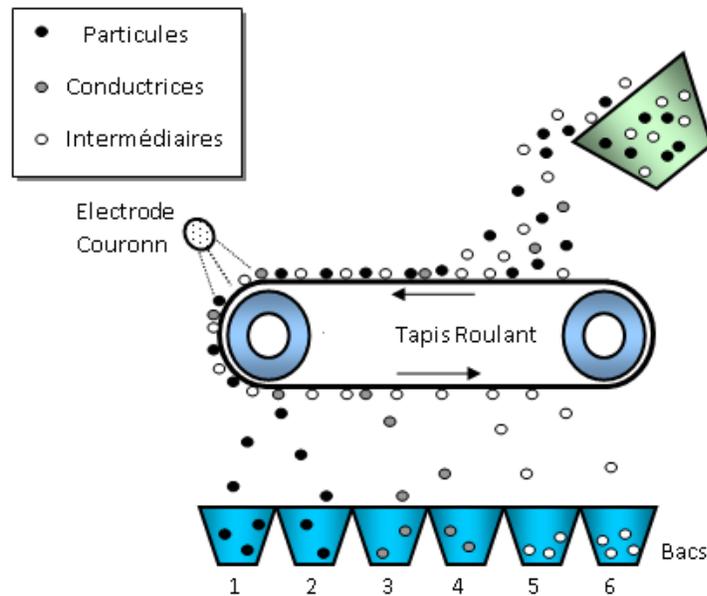


Figure II.14.Séparateur à Tapis Roulant chargé par effet couronne

II.3.7 Séparation électrostatique à électrode plaque

Principe de fonctionnement du séparateur électrostatique à électrode plaque.

Le principe de fonctionnement de l'électro-séparateur à plaque (Figure II.15) peut être décrit comme suit : les granules semi-conducteurs (mauvais et bon conducteurs) sont transportés par le vibro-transporteur électromagnétique (1) et déposés sur l'électrode plaque reliée à la terre (2). Les particules « glissent » ensuite à la surface de la plaque et se comportent différemment suivant qu'elles sont électriquement plus ou moins bonnes conductrices.

Granules conducteurs : en arrivant dans la zone du champ électrique généré par l'électrode statique de forme elliptique (3), acquièrent par induction électrostatique une charge de signe opposé au potentiel de la haute tension continue. Ils subissent alors une force d'attraction électrique exercée par cette électrode et se déposent dans la partie droite du collecteur (4).

Granules non conducteurs : vu leur constante de relaxation élevée, n'acquièrent pas de charge par induction électrostatique. Ils ne sont donc pas attirés par l'électrode elliptique et tombent sous l'action de leur poids et de leur vitesse dans la partie gauche du collecteur qui leur est destinée[54].

Les chercheurs cités en référence [97] ont identifié les conditions dans lesquelles un séparateur électrostatique à tambour pourrait être efficacement utilisé pour récupérer distinctement

le cuivre et l'aluminium à partir des déchets de fils électriques. Ils ont utilisé un modèle numérique de trajectoires de particules pour préétablir ces conditions et orienter l'étude expérimentale.

Le séparateur a également été testé sur un échantillon prélevé dans un produit granulaire d'acrylonitrile butadiène styrène (ABS). Son efficacité a été comparée à celle du type séparateur à tambour, et les résultats montrent que le séparateur électrostatique à plaques est plus facile à construire, à utiliser et à entretenir, car il comporte moins de pièces mobiles. Cependant, ses performances sont moins impressionnantes que celles du séparateur électrostatique corona à tambour. En effet, dans ce dernier, il est possible d'ajuster à la fois les forces électriques et mécaniques agissant sur les particules, ce qui représente un avantage majeur dans des applications aux spécifications très exigeantes[98].

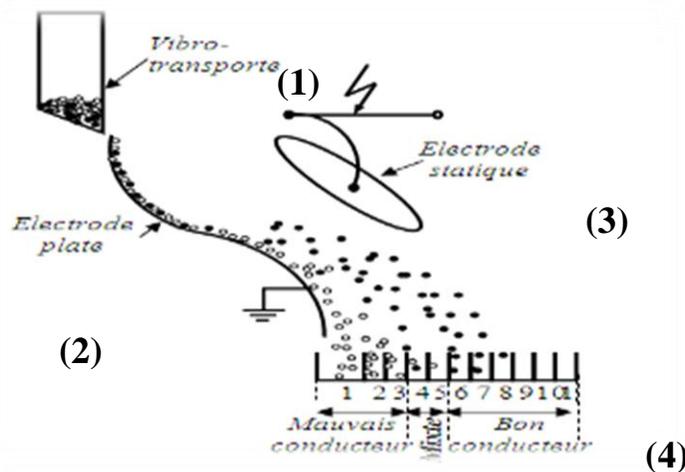


Figure II.15:Schéma simplifié du principe de l'électro-séparation à plaque[75]

II.3.8 séparateur électrostatique à cylindre tournant [83]

Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de l'électro-séparateur peut être décrit comme suit :

Les granules isolants et métalliques sont déposés par le vibro-transporteur électromagnétique sur le cylindre tournant relié à la terre, des charges électriques sont créées par ionisation de l'air grâce à la décharge couronne générée par l'électrode à pointes, appelé couronne, reliée à une source de haute tension continue.

Toutes les particules acquièrent une charge électrique "q" du même signe que le potentiel de la haute tension et se comportent différemment en fonction de leur conductivité électrique. Le schéma de la Figure II.16 présente les différents éléments composant le séparateur ainsi que le rôle de chacun d'eux .

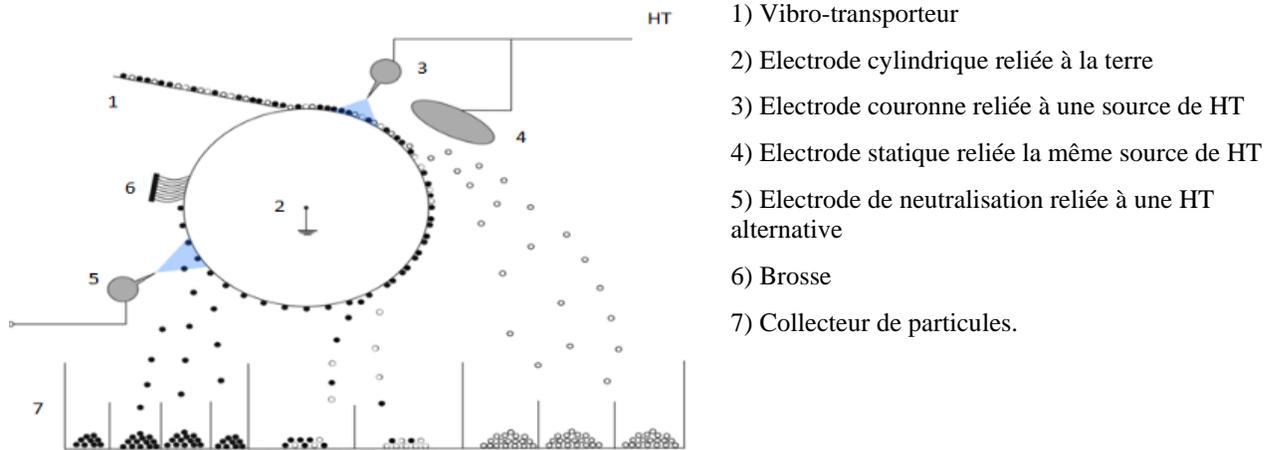


Figure II.16 : Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour

a) Granules isolants

Ils collent à la surface du tambour grâce à la force d'image électrique qui est définie par l'équation suivant :

$$F_i = \frac{q^2}{4\pi\epsilon_0(2r)^2} \quad (\text{II-1})$$

Avec : r : rayon du granule isolant .

q : charge du granule isolant acquise par effet couronne.

ϵ_0 : permittivité diélectrique du vide $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m .

Les granules isolants tombent ensuite dans la partie gauche du collecteur qui leur est destinée, à la condition que la force de la pesanteur devienne supérieure à la force d'image, pour assurer le détachement et la chute des particules qui sont fortement attachés au cylindre certaines électro-séparateurs sont équipés par une seconde à points reliée à une source de haute tension alternative, appelée électrode de neutralisation dont le rôle consiste à neutraliser la charge « q » acquise sous l'électrode couronne, les particules qui ne tombent pas et qui restent malgré cela collées, sont éliminées de la surface du tambour mécaniquement par une brosse [46].

b) Granules conducteurs

Ils perdent rapidement la charge « q » acquise par effet couronne à travers le cylindre relié à la terre, en arrivant dans la zone du champ électrostatique généré par l'électrode statique de forme elliptique (4), ils acquièrent par influence électrique une charge de signe opposé au potentiel de la haute tension continue. Ils subissent alors l'**attraction** électrique par l'électrode statique et sont déposés dans la partie droite du collecteur [46].

Forces agissants sur les particules [99]

Les particules sont soumises à deux types de force

Forces électriques

- Force du champ électrostatique

$$F_e = qindE \quad (II-2)$$

qui n'agit pratiquement que sur les granules métalliques, avec :

E: champ électrostatique généré par l'électrode statique elliptique.

qind: charge du granule métallique acquise par induction électrique, sous l'action de E, de signe opposé au potentiel haute tension de l'électrode.

- Force d'image électrique

$$F = q^2 4\pi\epsilon_0(2d)^2 \quad (II-3)$$

Qui n'agit pratiquement que sur les particules isolantes, avec :

q: charge du granule acquise par bombardement ionique dans la zone à effet couronne,

d: distance séparant le centre du granule à la surface du tambour.

Forces mécaniques

- Force centrifuge

$$F_c = m\omega^2 R \quad (II-4)$$

- Force de pesanteur

$$F_g = mg \quad (II-5)$$

avec: m: masse de la particule ; ω : vitesse angulaire du cylindre ; R : rayon du cylindre ; g: gravitation universelle

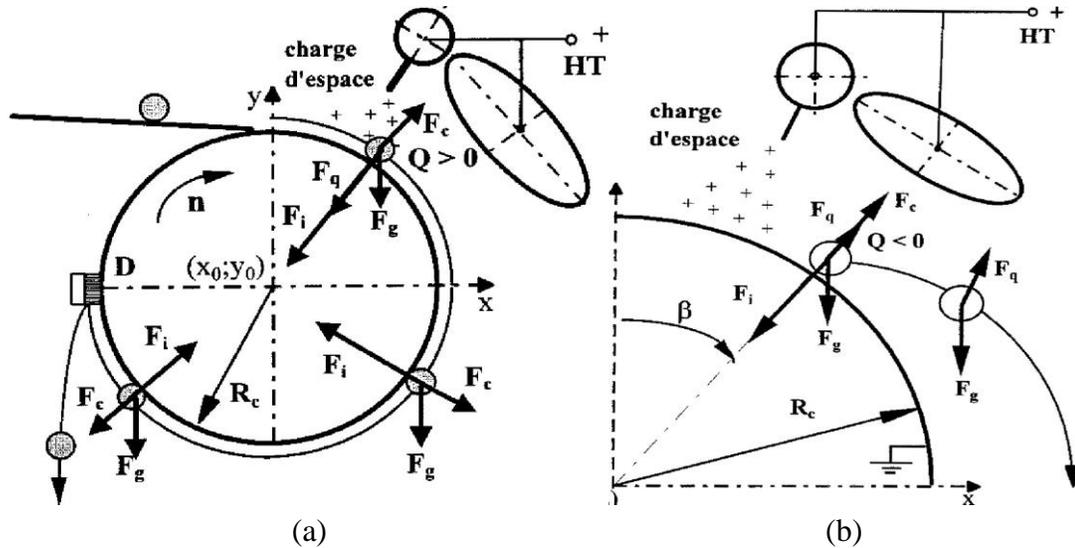


Figure II.17. Forces électriques et mécaniques qui agissent sur les particules : (a) particule conductrice, (b) particule isolante [99]

Paramètres influençant du séparateur électrostatique

Les paramètres influençant du séparateur sont rassemblés dans le tableau. II.3.

Tableau II-3: Paramètres variables de l'électro-séparateur [46]

Mécaniques	Produit	Ambiance	Electriques
-Vibro-transporteur <ul style="list-style-type: none"> • Type • Position • Débit -Cylindre <ul style="list-style-type: none"> • Rayon • Vitesse -Collecteur <ul style="list-style-type: none"> • Type • Position 	-Conductivité -Forme et dimensions -Densité volumique	-Température -Humidité -Poussière	-Electrode actives <ul style="list-style-type: none"> • Type • Position • Nombre -Electrode de neutralisation <ul style="list-style-type: none"> • Type • Position -Haute tension <ul style="list-style-type: none"> • Forme de la tension • polarité • niveau

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 quatre paramètres importants qui sont : le niveau et la polarité de la haute tension appliquée, la vitesse de rotation du tambour, le débit du vibro-transporteur et les conditions ambiantes (humidité et température du produit granulaire)[46].

Plusieurs articles ont examiné les phénomènes de charge des particules dans les séparateurs électrostatiques à cylindre tournant, en se concentrant sur l'effet couronne et l'induction

électrostatique. Des principes fondamentaux ont été présentés, et des contributions significatives ont été apportées par des laboratoires en Roumanie et en Algérie, notamment le Laboratoire des Champs Électriques Intenses de l'Université Technique de Cluj-Napoca et l'équipe de haute tension du laboratoire IRECOM de l'Université Djilai Liabes de Sidi Bel Abbes. Ces recherches ont exploré divers aspects tels que la taille des particules, l'intensité du champ électrique et la trajectoire des particules dans le but d'améliorer l'efficacité de la séparation électrostatique. Ces facteurs ont un impact sur la pureté du produit séparé et l'efficacité globale du processus de séparation électrostatique.

Dans sa thèse de doctorat, le Prof. Tilmatine aborde la complexité du processus de développement de nouvelles applications en utilisant l'installation pilote-industriel SELMEG. Il souligne que ce processus est multifactoriel, ce qui nécessite une optimisation du régime de fonctionnement en ajustant chaque élément de l'appareil pour chaque type de mélange granulaire à traiter. Une approche présentée par Medles et al. utilise la méthodologie des plans d'expériences pour identifier le point optimal de fonctionnement du séparateur électrostatique à cylindre tournant, avec le soutien du programme MODDE 5.0, montrant ainsi l'efficacité de cette technique pour l'optimisation des paramètres.

De plus, Younes et al. ont étudié la trajectoire des particules métalliques dans le séparateur électrostatique, un aspect crucial pour le rendement et la pureté des produits séparés. Une analyse numérique a été réalisée avec le logiciel spécialisé TRICOMP, permettant d'optimiser la distribution du champ électrique en fonction de la position de l'électrode statique. Il est souligné que l'application industrielle de ce type de processus est complexe, car même pour des structures simples comme le séparateur électrostatique à tambour, les opérateurs doivent contrôler de nombreux paramètres. Cette complexité explique les défis liés à l'optimisation de ces processus, en particulier pour ceux qui ne sont pas des spécialistes.

Dans le même sens, de nombreux articles scientifiques ont été consacrés au processus de contrôle intelligent de ce séparateur, comme mentionné dans l'introduction générale, tels que [100] utilisant des algorithmes génétiques, [5] utilisant l'optimisation basée sur la biogéographie (BBO) et les réseaux de neurones, En outre, dans un article précédent[101], la logique floue avait été rapportée comme un outil efficace pour le contrôle des séparateurs électrostatiques,

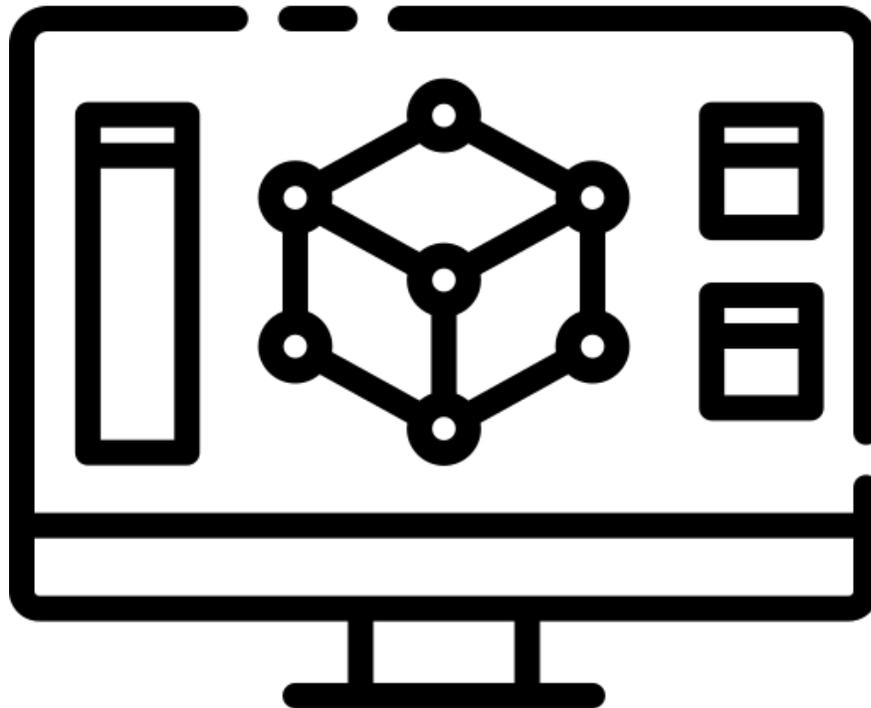
II.4 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la constitution générale des séparateurs électrostatiques et leur fonctionnement. La séparation électrostatique est un procédé de plus en plus utilisé dans les usines de traitements de déchets. Les avancées technologiques stimulés par une activité de recherche et de développement très soutenu ont permis aux séparateurs électrostatiques de dépasser le stade des modèles de laboratoire à l'utilisation industrielle.

Le côté industriel exige des résultats de séparation de haute qualité, le défi consiste maintenant à améliorer le processus de séparation, Tous les procédés de séparation électrostatique sont multifactoriels ; leur optimisation peut être obtenue en utilisant la méthodologie du plan d'expériences

Chapitre III

III Modélisation expérimentale des processus de séparation électrostatique



Introduction

La disponibilité d'un modèle mathématique sain est préalable à l'exécution des systèmes de commande. La séparation électrostatique est un processus complexe, car la dépendance du système à plusieurs variables, pas tous contrôlables, et que chaque application est caractérisée par un modèle différent, vu la complexité de ces phénomènes nous avons vu qu'il est envisageable de modéliser le comportement de cette installation par un modèle empirique.

Le présent chapitre est consacré à la mise en place d'une modélisation fine du comportement réel d'un séparateur électrostatique à cylindre tournant (Figure III. 1) à l'aide de méthodologie des plans d'expériences qualifiée de complexe à cause de l'interaction d'un ensemble de phénomènes, et formuler un ensemble de recommandations concernant le processus de la séparation, pour construire une base de connaissance à l'aide de la méthodologie des plans d'expériences, en vue d'être utilisé au contrôle de séparateur électrostatique à cylindre tournant.

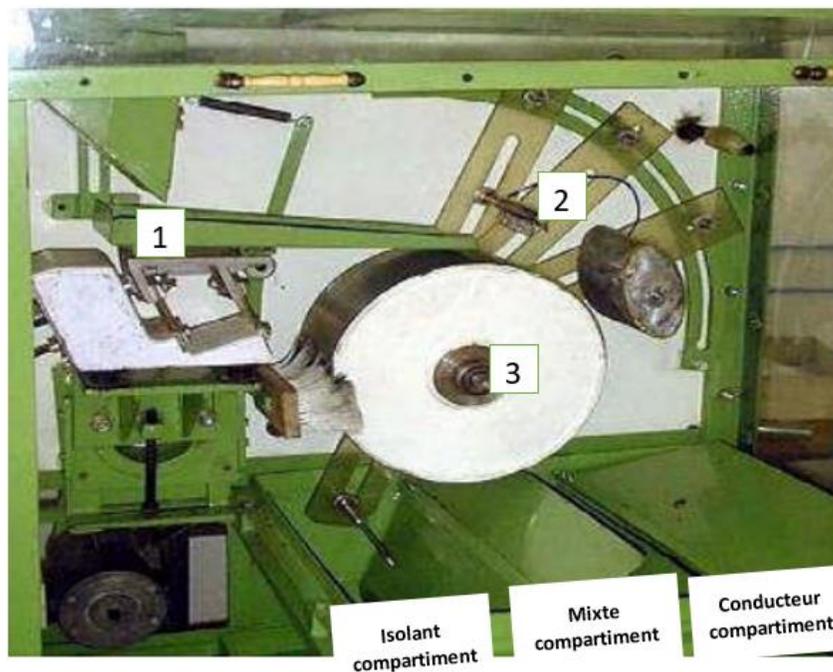


Figure III.1: Séparateur électrostatique à cylindre tournant SELMEG (Laboratoire IRECOM ; Université de Sidi Bel Abbess ; Algérie ; 1 : vibro-transporteur ; 2 : source de haute tension (HT) ; 3 : Electrode cylindrique reliée à la terre

III.1 Méthodologie des plans d'expériences

Dans toutes les entreprises, et quel que soit le secteur d'activité, le technicien ou l'ingénieur est amené à comprendre comment réagit un système en fonction des différents facteurs qui sont susceptibles de le modifier pour vérifier l'évolution du processus, il mesure une réponse et à partir de différents essais, il va tenter d'établir des relations de cause à effet entre la (ou les) réponse (réponses) et les différents facteurs.

Avec les plans d'expériences, il est possible d'obtenir le maximum de renseignements sur le fonctionnement d'un processus avec le minimum d'essais. Cette méthode prescrit le nombre d'expériences à accomplir afin d'atteindre un objectif bien déterminé et prédit le comportement des systèmes dans le domaine d'utilisation en fonction de plusieurs facteurs qui peuvent varier simultanément ; elle permet d'évaluer les effets de ces facteurs et leurs interactions [57].

Il existe de nombreux types de plans d'expérience, chacun adapté à des objectifs spécifiques. Certains types de plans d'expérience couramment utilisés comprennent le plan factoriel, le plan factoriel fractionnaire et le plan factoriel complet. Le type de plan d'expérience utilisé dans ce travail est la méthode du plan composite centré.

III.1.1 La méthode du plan composite centré

Le plan composite centré fait partie des plans d'expériences pour l'étude des surfaces de réponses. Leur usage est particulièrement destiné à la modélisation de la surface de réponse expérimental, c'est-à-dire l'évolution du critère de performance sur un univers de discours des variables bornées. Ce sont les plans les plus utilisés car ils présentent l'avantage de la facilité de construction. Ces plans sont construits en ajoutant des points de mesures à un plan factoriel complet.

Les plans pour l'étude d'une surface de réponse étant souvent utilisés après une étude des effets des facteurs, il suffit alors de réaliser seulement quelques expériences supplémentaires pour estimer la surface de réponse du critère étudié.

Un plan composite centré pour k facteurs est défini par :

- 1- Un plan factoriel complet de 2^k expériences ;
- 2- n_0 répétitions au centre du domaine expérimental, dédiées à l'analyse statistique ;

3- 2k points en étoile positionnés sur les axes de chaque paramètre. Ces points contribuent à l'évaluation des termes quadratiques du modèle polynomial, c'est-à-dire qu'ils donnent des informations sur la courbure de la surface de réponse [54].

Donc le nombre total d'essais devront être menés c'est :

$$N = 2^k + 2.k + n_0 \tag{III-1}$$

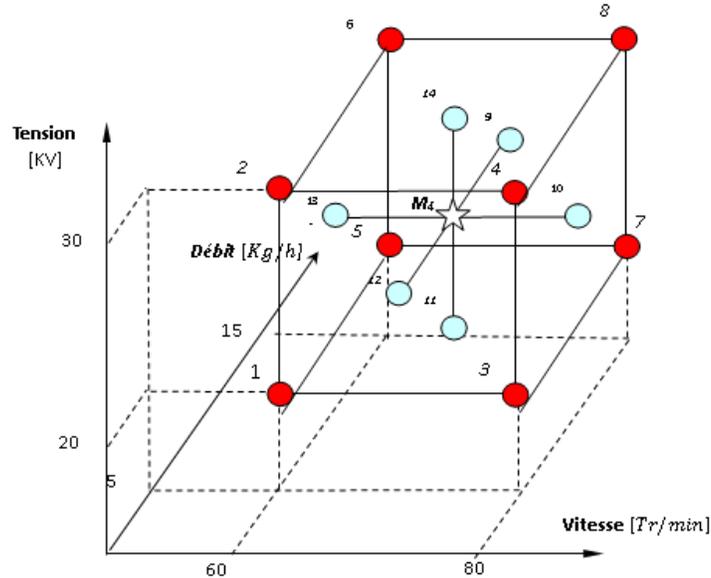


Figure III.2 : Représentation graphique des 17 points expérimentaux du plan composite

III.1.1.1 Représentation matricielle

La représentation matricielle d'un plan composite centré à trois facteurs et trois mesures au centre, est donnée par le Tableau III1. Cette matrice définit les niveaux de chacun des paramètres à chaque expérience. Chaque colonne de cette matrice est associée à un facteur.

III.1.1.2 Calcul des coefficients

A partir de cette matrice d'expériences, il est possible de définir la matrice X permettant de calculer les coefficients du modèle (III.2) Cette matrice est une extension de la matrice d'expérience. Elle regroupe dans chaque colonne les niveaux de chacun des coefficients de l'équation du modèle pour chaque essai.

Ces nouvelles colonnes sont calculées par multiplication des colonnes de la matrice d'expérience.

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^n a_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} (\sum_{j=i+1}^n a_{ij} x_i x_j) \tag{III-2}$$

Il est commode d'écrire ce système sous forme matricielle sans tenant compte des erreurs expérimentales :

$$Y = X \cdot a e$$

$$\hat{a} = (X^t X)^{-1} X^t Y \quad (\text{III-3})$$

III.2 Application de la méthode du plan composite centré

Les résultats des 17 expériences effectuées selon le plan d'expérience composite à faces centrées sont reportés au tableau III.1

Les résultats obtenue à partir des travaux réalisés dans [6], où les variables sont la vitesse de rotation du tambour (n), la haute tension appliquée (U) et le débit (m) ; l'échantillon était de 200 g (25 % de cuivre, 75 % de matériaux isolants, granulométrie > 1 mm et < 2 mm), tandis que le domaine de variation des trois variables est donné dans le tableau III.1

Tableau III-1: Domaine de variation des facteurs de contrôle

Facteurs	Tension (U) [KV]	Vitesse (n) [Tr/min]	Débit (m) [Kg/h]
Niveau -1	20	60	5
Niveau 0	25	70	10
Niveau 1	30	80	15

Tableau III-2 Matrice d'expérience et les résultats expérimentaux d'un plan composite centré [6]

	U [kV]	n [tr/Min]	m [kg/h]	Produite Isolant				Mixte	Produite conducteur			
				PVC [g]	Cu [g]	Pur %	Rec %	Mixte [g]	PVC [g]	Cu [g]	Pur %	Rec %
Plan factoriel «2 ³ »	20	60	5	141	1,6	98,88	94,07	10,5	0	46,9	100	93,8
	30	60	5	146,7	1,5	98,99	97,8	4,2	0	47,6	100	95,2
	20	80	5	130,3	0,2	99,85	86,87	20,3	0,1	49,1	99,8	98,2
	30	80	5	139,8	0,4	99,72	93,2	10,8	0	49	100	98
	20	60	15	137,6	5,6	96,09	91,73	17,1	0,1	39,6	99,75	79,2
	30	60	15	141,2	4,3	97,05	94,13	11,8	0,2	42,5	99,53	85
	20	80	15	129,1	1	99,23	86,07	22,7	0,4	47,3	99,16	94,6
	30	80	15	135,9	1,1	99,2	90,6	15,2	0,4	47,4	99,16	94,8
Points en étoiles «2×3»	20	70	10	136,8	1,7	98,77	91,2	15,2	0,1	46,2	99,78	92,4
	30	70	10	140,6	1,9	98,67	93,73	10,8	0,1	46,6	99,79	93,2
	25	60	10	144,4	4,4	97,04	96,27	7,7	0,1	43,3	99,77	86,6
	25	80	10	140,1	0,9	99,36	93,4	11	0,1	47,9	99,79	95,8
	25	70	5	145,6	1,1	99,25	97,07	5,2	0	48,1	100	96,2
Points au Centre	25	70	10	143,3	1,1	99,24	95,53	8,2	0	47,4	100	94,8
	25	70	10	142,7	1,3	99,1	95,13	8,8	0,1	47,1	99,79	94,2
	25	70	10	142,7	1,3	99,1	95,13	8,8	0,1	47,1	99,79	94,2

À la lumière de ces expériences, nous entreprendrons une étude statistique en vue de créer des modèles mathématiques et une base de connaissances pour une utilisation ultérieure dans le contrôle du séparateur électrostatique. Bien que le modèle mathématique pour la récupération de produits mixtes soit déjà établi dans [6], nous adaptons notre approche pour simuler les conditions industrielles spécifiques. Cela implique l'obtention de modèles mathématiques distincts pour la récupération du produit isolant et du produit conducteur, en maintenant les mêmes facteurs et en considérant la masse totale du compartiment, et non seulement la masse pure du produit isolant, comme réponse. À titre d'exemple, lors du premier essai, la réponse pour le produit isolant est calculée à 142.6, soulignant la réalité industrielle où il est souvent impossible de déterminer précisément le pourcentage de pureté.

III.2.1 Analyse de variance pour réponses (ANOVA)

L'analyse de variance pour déterminer si l'association entre la réponse et le terme est statistiquement significative

Le niveau de confiance choisi est de 95 % pour tous les tests ($\alpha = 5\%$), où les résultats des expériences ont été analysés à l'aide du logiciel statistique Minitab 18 (le logiciel MINITAB est un logiciel de statistiques. Il est développé par Minitab, est un programme exécutable sous Windows).

Pour déterminer si l'association entre la réponse et chacun des termes du modèle est statistiquement significative, nous comparons la valeur de p du terme au seuil de signification pour évaluer l'hypothèse nulle. L'hypothèse nulle est que le coefficient du terme est égal à zéro, ce qui implique qu'il n'existe aucune association entre le terme et la réponse. En général, un seuil de signification (noté alpha ou α) de 0,05 fonctionne bien. Un seuil de signification de 0,05 indique un risque de 5 % de conclure à tort qu'il existe une association.

Valeur de $p \leq \alpha$: l'association est statistiquement significative

Si la valeur de p est inférieure ou égale au seuil de signification, vous pouvez conclure qu'il existe une association statistiquement significative entre la variable de réponse et le terme.

Valeur de $p > \alpha$: l'association n'est pas statistiquement significative

Si la valeur de p est supérieure au seuil de signification, vous ne pouvez pas conclure qu'il existe une association statistiquement significative entre la variable de réponse et le terme. Il est sans doute nécessaire de réajuster le modèle sans le terme.

Tableau III-3. Analyse de variance pour les réponses

Source	DL	Mixte				Conducteur				Isolant			
		SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p	SomCar ajust	CM ajust	Valeur F	Valeur de p
Modèle	9	390.83	43.43	39.04	0.00	92.84	10.32	28.65	0.00	446.12	49.57	43.16	0.00
Linéaires	3	257.83	85.94	77.27	0.00	76.30	25.43	70.64	0.00	333.14	111.05	96.70	0.00
U	1	108.90	108.90	97.91	0.00	1.60	1.60	4.44	0.07	81.23	81.23	70.73	0.00
n	1	82.37	82.37	74.06	0.00	45.80	45.80	127.20	0.00	245.03	245.03	213.37	0.00
m	1	66.56	66.56	59.85	0.00	28.90	28.90	80.27	0.00	6.89	6.89	6.00	0.04
Carré	3	121.39	40.46	36.38	0.00	2.85	0.95	2.64	0.13	98.59	32.86	28.62	0.00
U* U	1	64.92	64.92	58.37	0.00	0.03	0.03	0.09	0.77	60.85	60.85	52.98	0.00
n* n	1	4.34	4.34	3.90	0.09	2.23	2.23	6.20	0.04	0.36	0.36	0.31	0.59
m* m	1	0.61	0.61	0.55	0.48	0.40	0.40	1.12	0.33	0.05	0.05	0.04	0.84
Interaction à 2 facteurs	3	11.62	3.87	3.48	0.08	13.70	4.57	12.68	0.00	14.39	4.80	4.18	0.05
U* n	1	3.65	3.65	3.28	0.11	1.81	1.81	5.01	0.06	9.46	9.46	8.24	0.02
U* m	1	1.13	1.13	1.01	0.35	0.85	0.85	2.35	0.17	4.65	4.65	4.05	0.08
n* m	1	6.85	6.85	6.15	0.04	11.05	11.05	30.68	0.00	0.28	0.28	0.24	0.64
Erreur	7	7.79	1.11			2.52	0.36			8.04	1.15		
Inadéquation de l'ajustement	5	7.55	1.51	12.58	0.08	2.49	0.50	37.40	0.03	7.93	1.59	29.74	0.03
Erreur pure	2	0.24	0.12			0.03	0.01			0.11	0.05		
Total	16	398.62				95.36				454.16			

DL : Le nombre total de degrés de liberté (DL) représente la quantité d'informations dans les données.

SomCar ajust : Les sommes des carrés ajustés sont des mesures de la variation des différentes composantes du modèle. L'ordre des prédicteurs dans le modèle n'a aucun effet sur le calcul des sommes des carrés ajustées.

CM ajust : Les carrés moyens ajustés mesurent la proportion de variation expliquée par un terme ou un modèle, en supposant que tous les autres termes sont dans le modèle, quel que soit l'ordre dans lequel ils ont été saisis.

Valeur F : Une valeur F apparaît pour chaque terme dans le tableau d'analyse de la variance :

Valeur F pour le modèle ou les termes : La valeur F est une statistique de test utilisée pour déterminer si le terme est associé à la réponse.

Valeur F pour le test d'inadéquation de l'ajustement : La valeur F est une statistique de test utilisée pour déterminer s'il manque au modèle des termes d'ordre supérieur comprenant les prédicteurs du modèle en cours [102].

III.2.2 Les modèles mathématiques

Après l'élimination de quelques effets non significatifs, les modèles mathématiques de la récupération des produits proposés par MINITAB 18 sont exprimées par les équations suivantes :

✓ **Pour le produit conducteur :**

$$Mc = 14 + 1.059 * n - 1.98 * m - 0.007 * n^2 + 0.023 * n * m \quad (\text{III-4})$$

✓ **Pour le produit isolant :**

$$Mi = 82.7 + 8.82 * U - 1.03 * n - 0.166 * m - 0.19 * U^2 + 0.02 * U * n \quad (\text{III-5})$$

✓ **Pour le produit mixte :**

$$Mm = 133.1 - 11.32 * U + 0.2870 * n + 0.51 * m + 0.213 * U^2 \quad (\text{III-6})$$

III.2.3 La qualité descriptive des modèles

La qualité descriptive du modèle présent en tableau III.4

Tableau III-4 : Tableau récapitulatif du modèle

	R-sq (%)	R-sq(adj) (%)	R-sq(pred) (%)
Mi	97,07	95.73	91.39
Mc	92,48	89,97	80,48
Mm	94,04	92,06	86,32

Où :

R^2 représente le pourcentage de variation de la réponse expliqué par le modèle.

Plus la valeur R^2 est élevée, plus le modèle est ajusté aux données. R^2 est toujours compris entre 0 et 100 %.

Le R^2 ajusté est le pourcentage de la variation de la réponse qui est expliqué par le modèle, ajusté au nombre de prédicteurs du modèle par rapport au nombre d'observations.

La valeur R^2 prévu permet de déterminer la capacité de modèle à prévoir la réponse pour de nouvelles observations. Les modèles ayant des valeurs de R^2 prévu élevées ont une meilleure capacité de prévision.

Dans le tableau III.5 nous avons présenté les valeurs récapitulatives des modèles avant avoir supprimé les facteurs non significatifs et après pour augmenter R^2 prévu, car la valeur R^2 prévu peut également être plus utile que R^2 ajusté pour comparer des modèles, car elle est calculée avec des observations qui ne sont pas incluses dans le calcul du modèle.

Tableau III-5 : valeurs récapitulatives des modèles avant et après avoir supprimé les facteurs non significatifs

	R-sq (%)		R-sq(adj) (%)		R-sq(pred) (%)	
	Après	Avant	Après	Avant	Après	Avant
Mi	97.07	98.23	95.73	95.73	91.39	88.26
Mc	92,48	97.36	89,97	93.96	80,48	74.68
Mm	94,04	98.05	92,06	95.54	86,32	84.63

III.2.4 Vérification de la validité des modèles

Une valeur de R^2 de test élevée n'indique pas en soi que le modèle répond à ses hypothèses. Nous devons vérifier les diagrammes des valeurs résiduelles pour vérifier les hypothèses.

Déterminer si le modèle vérifie les hypothèses de l'analyse. Il est très important de vérifier que ce modèle s'ajuste bien aux données. Si ce n'est pas le cas, toute analyse découlant de ce modèle serait à minima biaisée, voire totalement invalide.

Les vérifications à effectuer pour valider un modèle se font essentiellement graphiquement et tournent globalement autour de trois points :

- l'équivariance des résidus du modèle
- L'indépendance résidus du modèle
- La normalité des résidus du modèle

Les résidus étant les écarts entre les valeurs réellement observées et celles prédites par le modèle, ces dernières étant nommées fitted values.

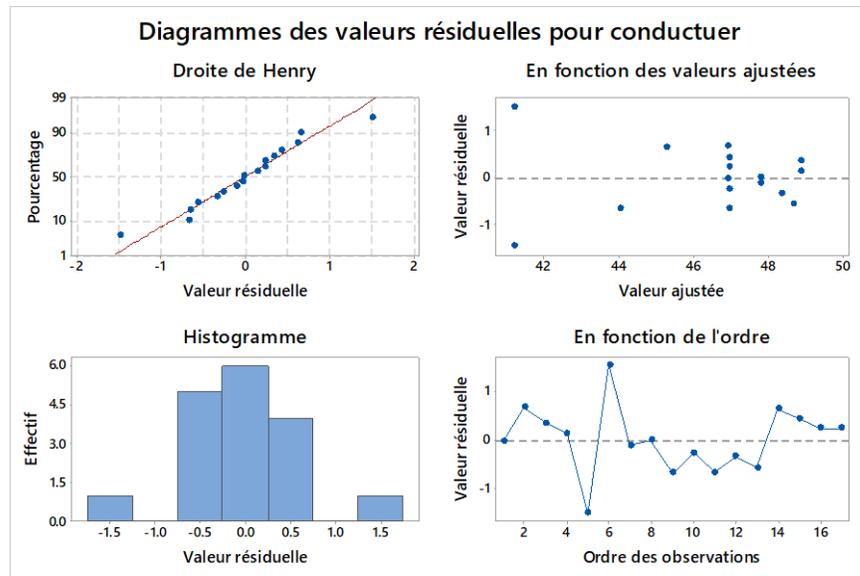


Figure III.3 : Diagrammes des valeurs résiduelles pour conducteur

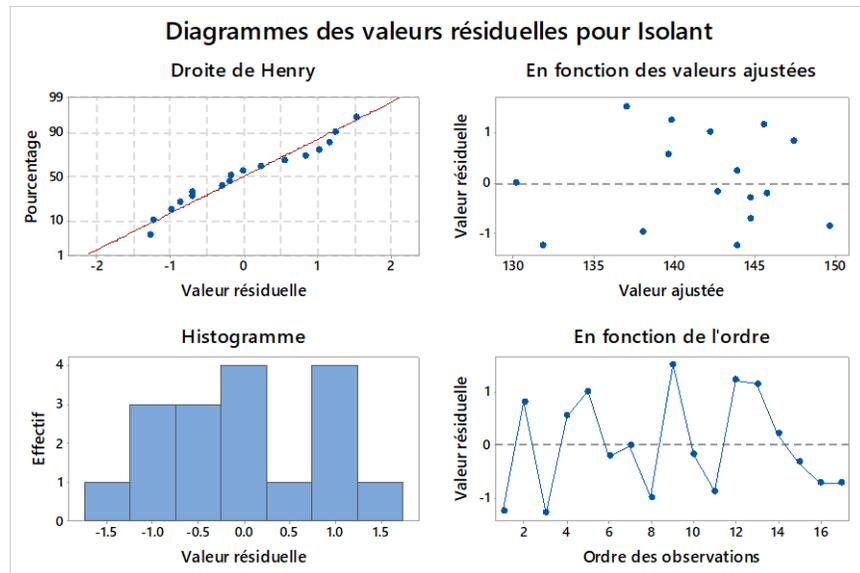


Figure III.4 : Diagrammes des valeurs résiduelles pour isolant

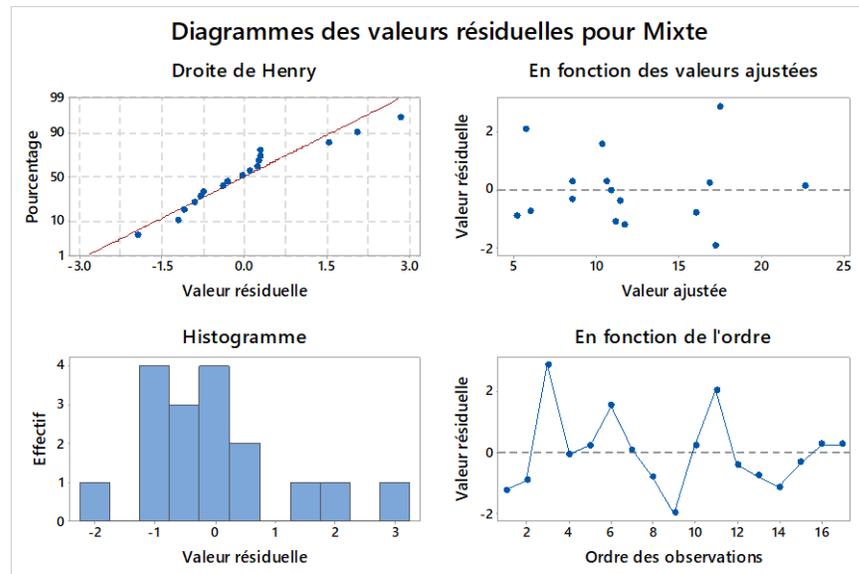


Figure III.5 : Diagrammes des valeurs résiduelles pour mixte

A partir des diagrammes des valeurs résiduelles des trois modèles (conducteur ; isolant et mixte) figure (III.3, III.4 ; III.5) on constate que :

1-Pour l'histogramme des valeurs résiduelles

La forme de l'histogramme est à peu près symétrique et a la forme d'une cloche pour tous les modèles.

Mais les résultats de l'histogramme sont plus pertinents lorsque nous avons au moins 20 points de données. Si l'échantillon est trop petit, les barres de l'histogramme ne contiennent pas assez de points de données pour afficher l'asymétrie ou les valeurs aberrantes de manière fiable.

2-Pour les droites de Henry des valeurs résiduelles

Les points forment une ligne à peu près droite, cela signifie que les valeurs résiduelles sont réparties normalement, sauf quelques points aberrants au produit conducteur et mixte ; on peut dire que ces graphiques traduisent la normalité des résidus.

3- pour les valeurs résiduelles en fonction des valeurs ajustées

Les valeurs résiduelles sont normalement distribuées de manière aléatoire autour de zéro. et la dispersion verticale des points est à peu près constante sur toute la longueur de l'axe des abscisses, sauf deux valeurs aberrantes au conducteur.

4-pour les valeurs résiduelles en fonction de l'ordre des données.

Les valeurs résiduelles ne forment aucun schéma visible sur tous les graphiques, et sont normalement distribuées de manière aléatoire autour de zéro alors la dépendance temporelle des valeurs résiduelles détecter.

Alors :

À partir de 2 On considère la normalité vérifiée.

À partir de 3 L'hypothèse d'équivariance est acceptée.

À partir de 4 on considère le postulat d'indépendance des erreurs vérifié

Le lecteur peut trouver plus de détails sur les méthodes et les formules de calcul pour chaque statistique du tableau d'analyse de la variance dans [103]

III.3 Influence des facteurs choisis sur les réponses

Pour étudier les Influence des facteurs, nous allons suivre les étapes ci-dessous :

Etape 1 : Détermination les termes qui contribuent le plus à la variabilité de la réponse.

Etape 2 : Examen des effets principaux.

Etape 3 : Examen des effets des interactions.

Pour la première étape, nous allons adopter le résultat du diagramme de Pareto (figure III.6), (figure III.9), (figure III.12), où il est contenu une barre pour chaque effet, trié du plus significatif au moins significatif [104]. Les barres qui traversent la ligne de référence t sont statistiquement significatives, où t est le quantile d'une distribution t avec des degrés de liberté égaux aux degrés de liberté pour le terme d'erreur.

On utilise alors une table dite de *Student* à $v = n-p$ degrés de liberté (n est le nombre d'expériences réalisées et p le nombre d'effets y compris la constante). On choisit un risque de première espèce α (le plus souvent 1% ou 5%) et on lit dans cette table la valeur $t_{crit}(\alpha, v)$, en utilisant la partie relative à un test bilatéral.

Un effet sera significatif avec un risque de 5% avec $v = n-p = 17-10 = 7$

$t_{crit}(0.05 ; 7) = 2.36$ (voir l'annexe 1).

Pour la deuxième étape, pour examiner les effets des interactions bidirectionnelles dans le diagramme des interactions (figure III.8), (figure III.11). Ce diagramme indique dans quelle mesure la relation entre la variable de réponse et un prédicteur dépend de la valeur d'un deuxième prédicteur.

III.3.1 Produit isolant

Dans (Figure III.6), le diagramme de Pareto indique que l'effet de B a l'effet standardisé le plus élevé sur le produit isolant suivi de A, AA, AB et C, quant à l'effet des facteurs AB et C, ils sont presque négligeables par rapport à l'effet de d'autres facteurs.

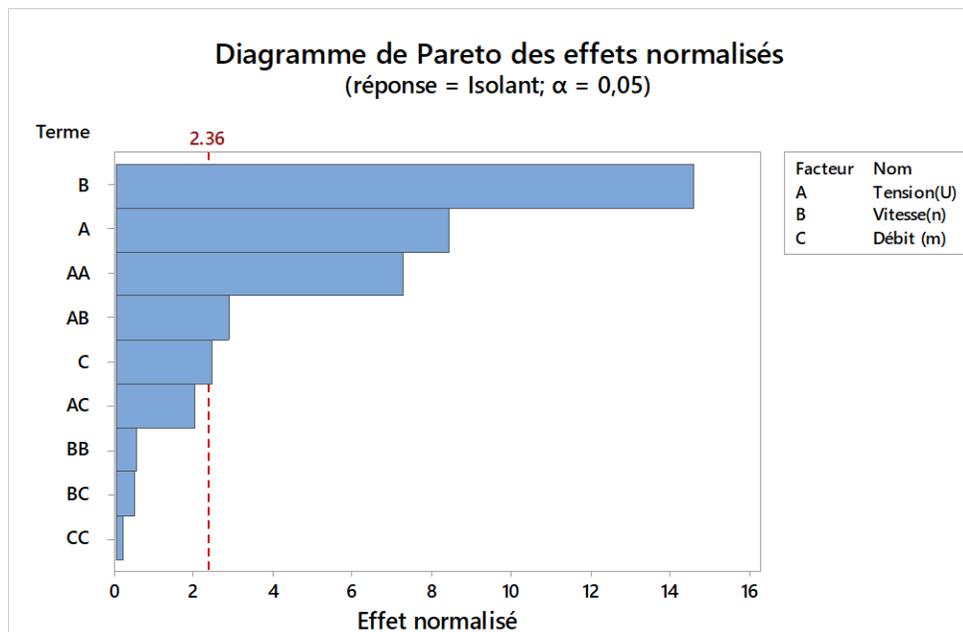


Figure III.6 : Diagramme de Pareto des effets normalisés pour le produit isolant

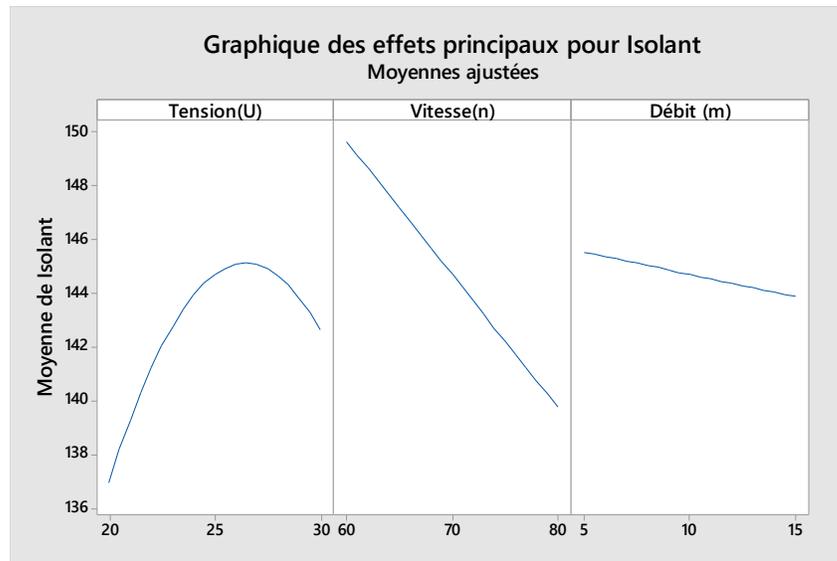


Figure III.7 : Graphique des effets principaux pour produit isolant.

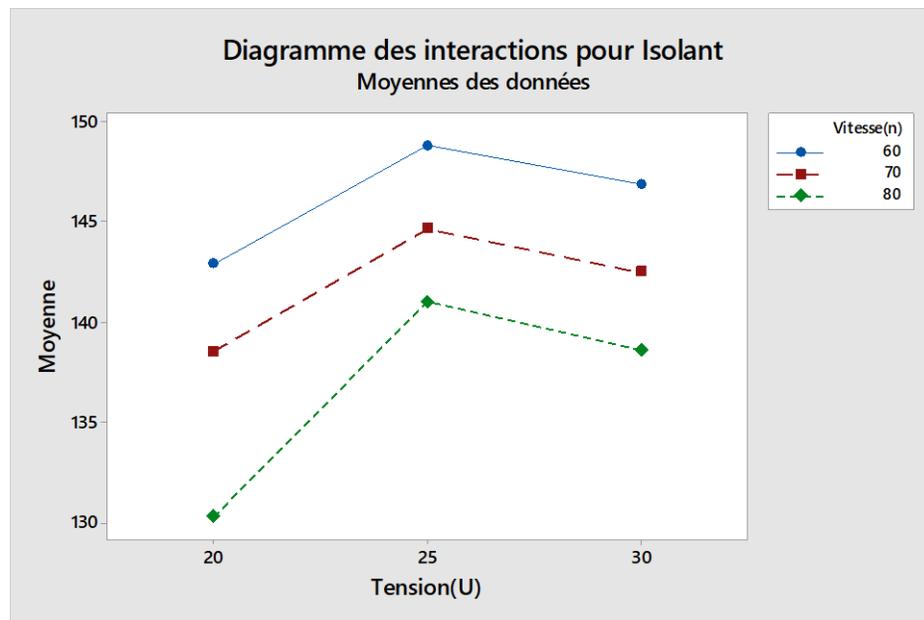


Figure III.8 : Diagramme des interactions pour produit isolant.

À partir de l'effet principal de la (figure III.7) notez d'abord que l'augmentation de la tension est compensée par une augmentation de la récupération du produit isolant qui dépend du fait de la bonne charge acquise par les particules d'isolant, donc aidez-le à se fixer à électrode cylindrique tournante par la force d'image électrique [105], mais l'effet de la haute tension sur le produit isolant devient négatif après une certaine valeur ceci probablement dû à des phénomènes

de claquage [106], qui pourraient avoir un impact négatif sur la charge acquise par les particules dans la zone de champ de décharge corona.

D'autre part, la vitesse de cylindre a un impact négatif sur le produit isolant ; ceci est dû au fait de la force centrifuge qui empêche la particule isolante de s'épingler. En ce qui concerne le débit a un petit impact négatif sur le produit isolant, probablement en raison de la contention des particules entre elles où elles s'empêchent mutuellement de gagner suffisamment de charge ou d'épingler sur le cylindre tournant [107].

Pour l'interaction entre les facteurs haute tension et vitesse de cylindre tournant, la (figure III.8) a montré que la vitesse de cylindre tournant a un petit impact négatif sur l'effet de la haute tension uniquement lorsque celle-ci est à un niveau bas et la vitesse dans le haut niveau. Cependant, l'effet d'interaction reste presque inexistant et ne peut pas être invoqué dans le processus de contrôle dans cet travaille. Contrairement à certains travaille antérieurs [100], qui dépendaient de cette interaction, le défaut était compensé dans une variable par l'autre.

Ce résultat est presque identique au côté théorique à l'exception de l'impact négatif de la haute tension, ceci probablement dû aux phénomènes de claquage comme mentionné ci-dessus, ceci est difficile à prévoir théoriquement.

Par conséquent, pour augmenter la récupération du produit isolant, nous devons diminuer la vitesse et le débit et augmenter la haute tension avec une valeur limite.

III.3.2 Produit conducteur

La (figure III.9) montre que les effets principaux B (vitesse de cylindre tournant) et C (débit), l'interaction entre la vitesse (B) et le débit (C) et les termes au carré pour la vitesse BB sont significatifs à un niveau de signification de 5 %. Contrairement à la haute tension qui n'a aucun effet.

Comme le montre la (figure III.10), il est clair que lorsque la vitesse de cylindre tournant augmente, le produit conducteur augmente ; d'autre part, le débit a un impact négatif sur la récupération du produit conducteur.

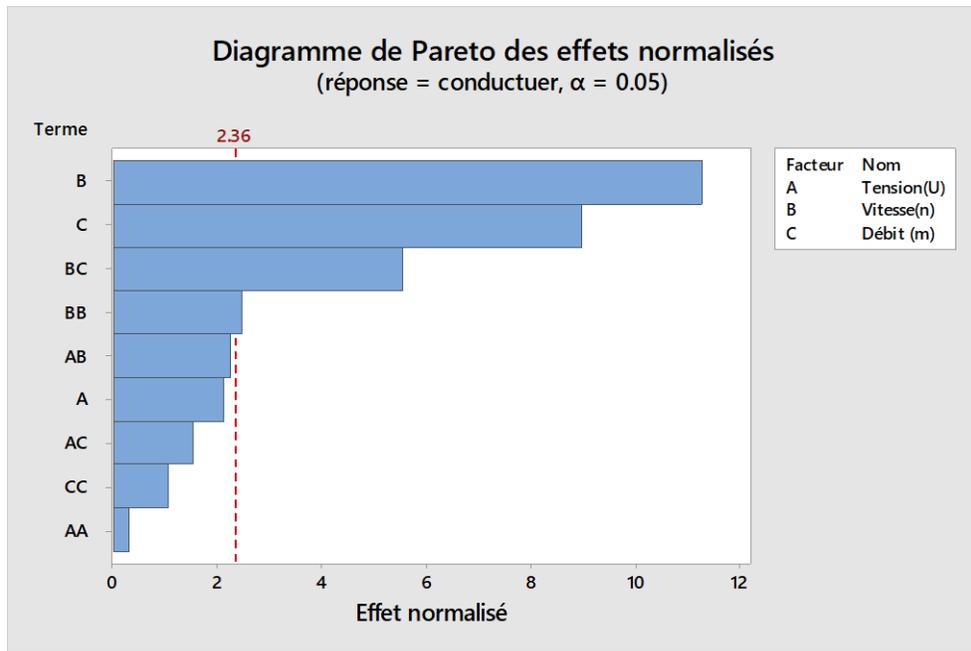


Figure III.9 : Diagramme de Pareto des effets normalisés pour le produit conducteur.

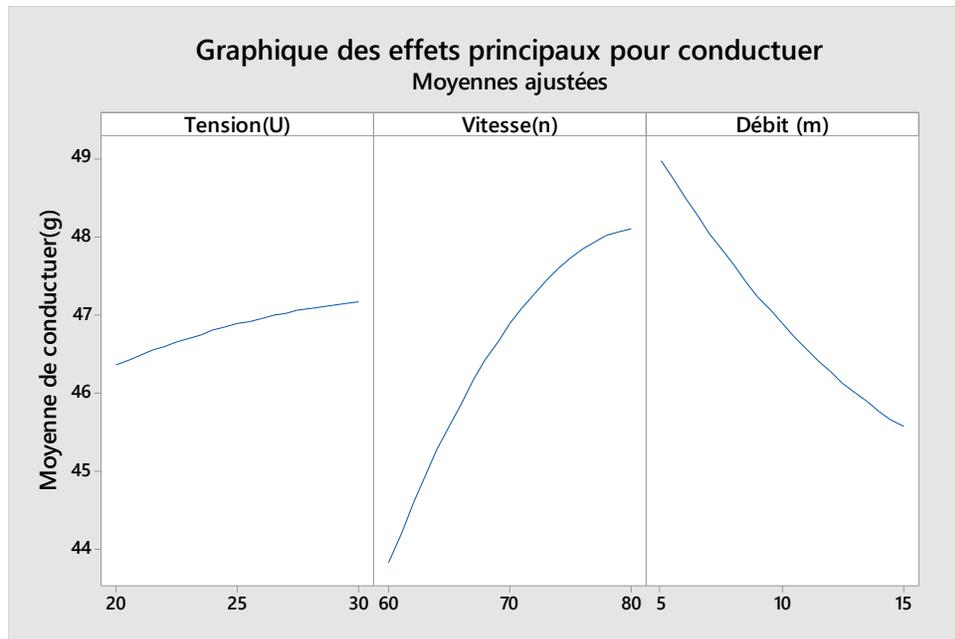


Figure III.10 : Graphique des effets principaux pour produit conducteur.

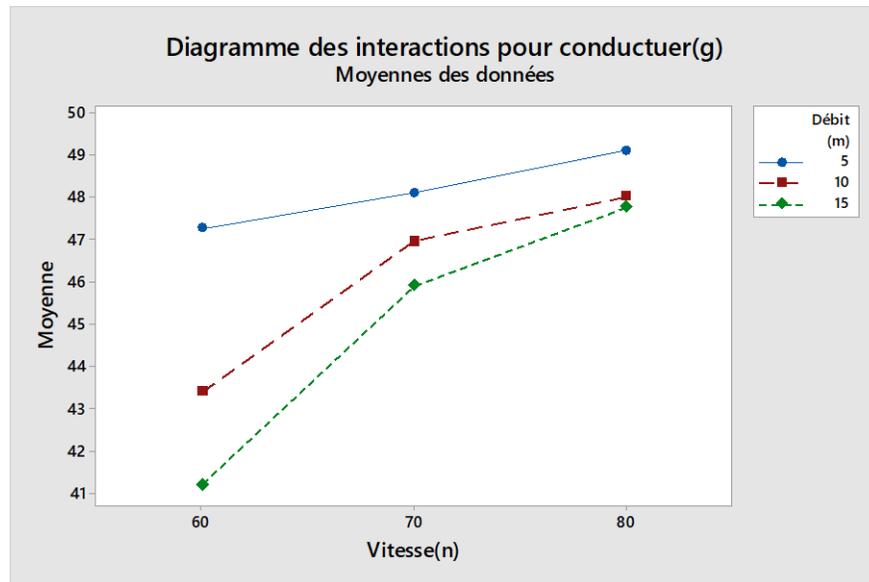


Figure III.11 : Diagramme des interactions pour produit conducteur

À partir des tracés d'interaction entre le débit et la vitesse (figure III.11) en augmentant la vitesse, nous réduisons l'effet négatif du débit.

L'effet de la vitesse de cylindre tournant sur le produit conducteur était attendu en raison de la force centrifuge [108], mais il est assez intéressant de noter que la haute tension en elle-même n'a pas d'impact significatif sur le produit conducteur, c'est le contraire de certains des résultats, à la fois théoriques [108] et expérimentaux [109], ceci probablement dû au domaine de variation de la haute tension considéré dans cette expérience [6].

Par conséquent, pour augmenter la récupération du produit conducteur, nous devons augmenter la vitesse de cylindre tournant et diminuer le débit.

III.3.3 Produit Mixte

Pour le mixte Le diagramme de Pareto de la (figure III.12) a indiqué que les facteurs significatifs totaux sur le produit conducteur et isolant sont significatifs pour le mixte et l'effet standardisé le plus élevé est la haute tension suivie de la vitesse (B) suivie de C, AA et BC.

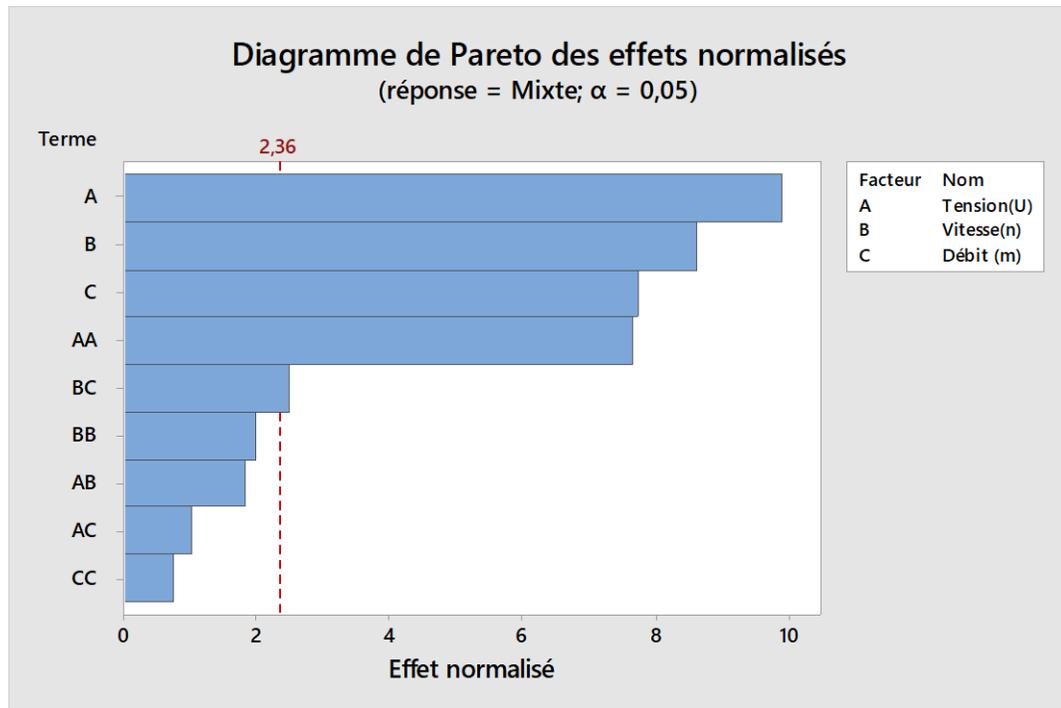


Figure III.12 : Diagramme de Pareto des effets normalisés pour le mixte

En fait, si nous combinons l'effet de la haute tension et les termes au carré pour la haute tension, nous constatons que la haute tension a le plus grand effet sur le mixte, c'est trop évident dans le graphique d'effet principal (figure III.13), car son effet sur le mixte est complètement opposé à son effet sur le produit isolant, cela indique que la majeure partie du produit isolant gaspillé est dirigée vers le compartiment de mixte.

D'autre part, nous remarquons que plus la vitesse de cylindre tournant est élevée, plus la masse du mixte augmente, qui est le produit isolant perdu, car avec une vitesse croissante, le produit isolant diminue et le produit conducteur augmente, comme nous l'avons expliqué précédemment. Par conséquent, la quantité de produit conducteur présente dans le compartiment mixte est uniquement due à l'augmentation du débit. Nous en concluons que le conducteur perdu en raison du manque de vitesse de rotation du tambour se dirige directement vers le compartiment de l'isolant ; ceci est évident dans la (figure III.14), tracé normal des effets normalisés du conducteur collectés dans le compartiment isolant. Là où le tracé normal des effets standardisés affiche des effets négatifs sur le côté gauche du graphique et des effets positifs sur le côté droit du graphique. En revanche, les effets non significatifs suivent une ligne droite et ont tendance à être centrés près de zéro [110].

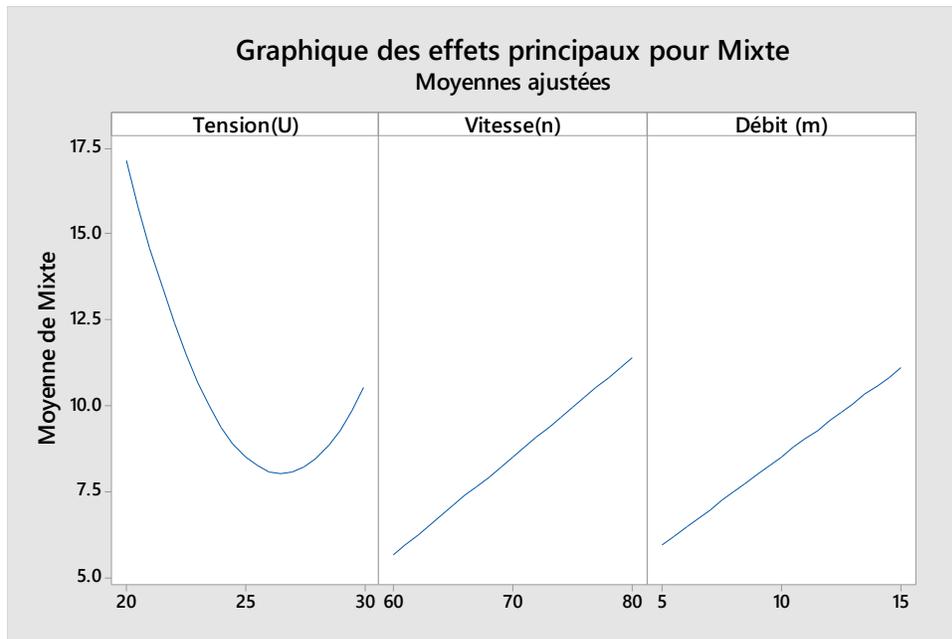


Figure III.13 : Graphique des effets principaux pour le mixte.

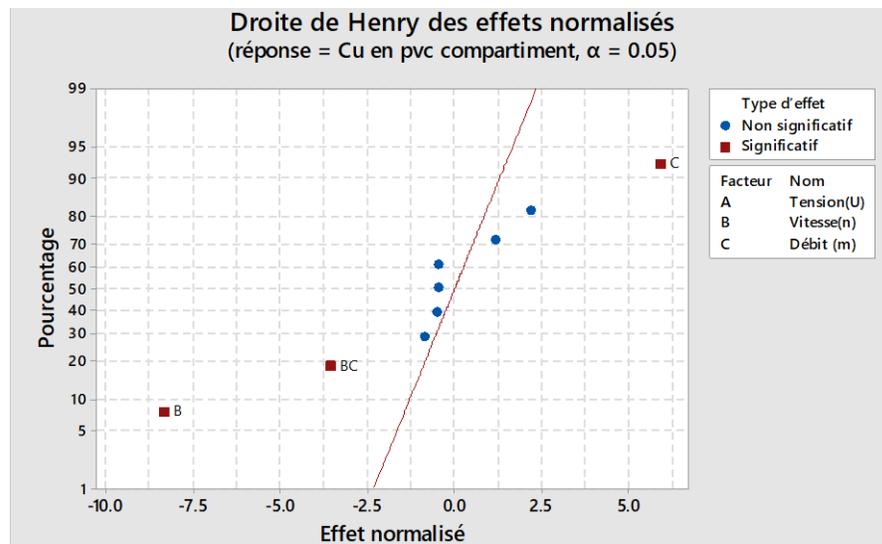


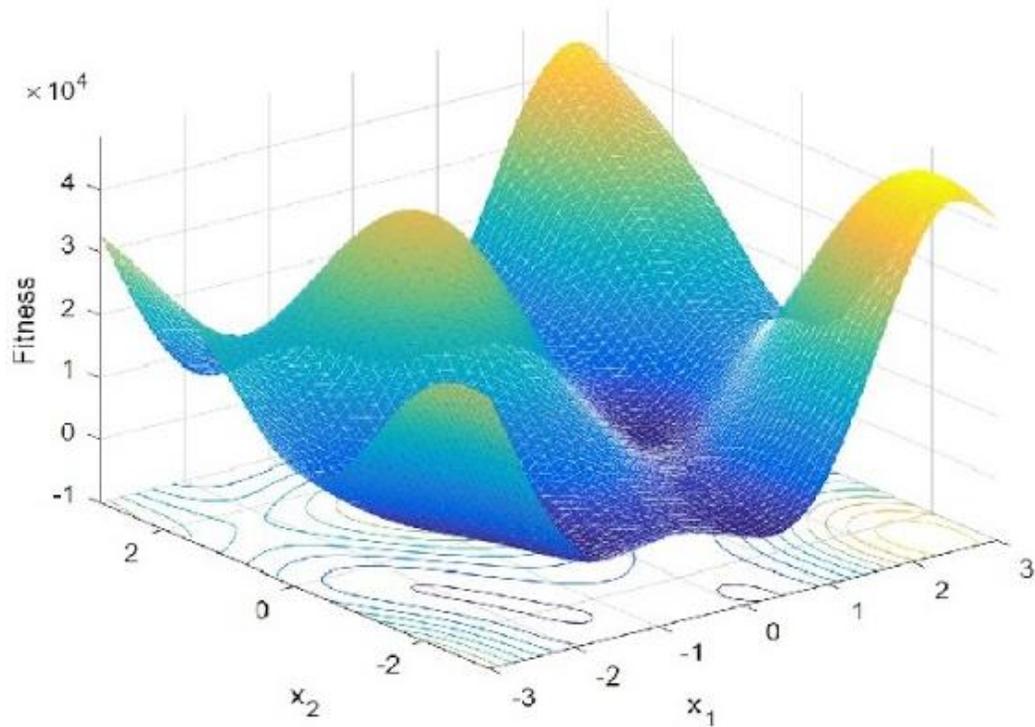
Figure III.14 : droite de Henry des effets normalisés pour conducteur collecté dans le compartiment isolant.

III.4 Conclusion

La méthode des plans d'expériences, permet de modéliser le rendement du séparateur électrostatique en proposant un modèle mathématique qui est validé en vérifiant des critères bien définis. Malgré que cette modélisation ne puisse représenter totalement le comportement réel du processus, car elle est basée sur la connaissance inachevée du système, mais elle nous donne une réelle base de connaissance et un modèle on peut être exploité dans diverses applications dès lors qu'il donne une description suffisamment précise du système.

Chapitre IV

IV. Optimisation d'un séparateur électrostatique



Introduction

L'optimisation est le processus de recherche des meilleures solutions pour atteindre un objectif ou un ensemble d'objectifs en utilisant les ressources disponibles de manière efficace. Il peut s'appliquer à de nombreux domaines, tels que la technologie, l'ingénierie, la finance, la gestion, etc. L'optimisation peut consister en la minimisation ou la maximisation d'une fonction mathématique donnée, qui représente la quantité à optimiser. Les algorithmes d'optimisation, tels que les algorithmes génétiques, les algorithmes de recherche en gradient, les algorithmes de programmation linéaire, etc., peuvent être utilisés pour trouver les meilleures solutions. L'optimisation peut également consister en la recherche des meilleures décisions à prendre en considérant les contraintes et les limites des ressources disponibles. Par exemple, dans le domaine de la gestion de projet, l'optimisation peut consister en la planification des tâches de manière à utiliser les ressources disponibles de manière efficace tout en respectant les délais impartis.

En général, l'optimisation peut aider à améliorer les processus, à économiser du temps et de l'argent, à atteindre des objectifs plus rapidement et à prendre des décisions plus judicieuses. Cependant, il est important de noter que les algorithmes d'optimisation ne peuvent fournir des solutions optimales que dans des limites précises et ne peuvent garantir une solution optimale pour tous les problèmes complexes [111]. Les méthodes d'optimisation, après avoir atteint un degré de maturité au cours des dernières années, sont largement utilisées dans le domaine des industries, notamment l'aérospatiale, l'automobile, la chimie, l'électricité, la construction et les industries de fabrication [112]. Cependant, l'optimisation si elle est faite manuellement, peut être extrêmement chronophage. De plus, elle n'offre aucune garantie des résultats appropriés [113].

En compagnie de l'évolution rapide de la technologie informatique, les ordinateurs sont de plus en plus puissants, et en conséquence, la taille et la complexité des problèmes des systèmes qui peuvent être résolus en utilisant des techniques d'optimisation sont également en évolution. La caractéristique la plus importante d'un ordinateur à grande vitesse est sa capacité à exécuter efficacement les opérations itératives. Afin d'exploiter cette caractéristique de base, la plupart des algorithmes visant à résoudre les grands problèmes d'optimisation sont donc de nature itérative [114].

Dans le chapitre précédent nous avons modélisé le séparateur électrostatique, Ce chapitre est consacré à la recherche du point de fonctionnement optimal de la séparation électrostatique

process, Où le défi est de réduire le mixte et de maximiser à la fois le produit conducteur et le produit isolant, notre problème peut être formulé mathématiquement par les relations suivantes :

$$\begin{aligned}
 &Max [Mc ; Mi (U, n, m)] ; Min[Mm (U, n, m)] \\
 &20 [Kv] \leq U \leq 30 [Kv] \\
 &60 [tr/min] \leq n \leq 80 [tr/min] \\
 &5 [kg/h] \leq m \leq 15 [kg/h]
 \end{aligned}
 \tag{IV-1}$$

IV.1 Optimisation par plans d'expérience

En utilisant la fonction de réponse pour la création et l'évaluation statistique des plans d'expériences. Il prédit les réponses prédites en fonction des paramètres : vitesse, tension et débit, comme le montre les figures (IV.1), (IV.2).

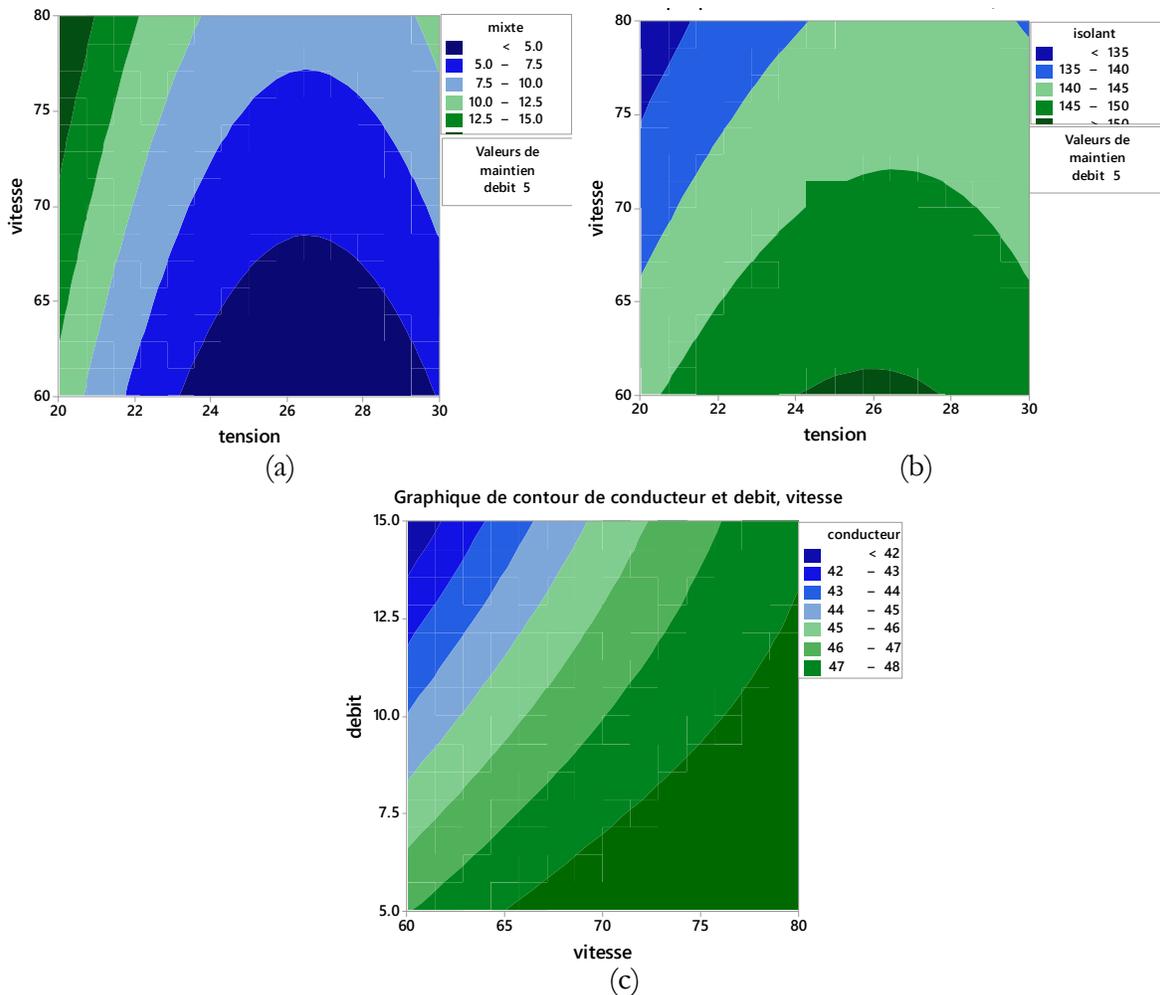


Figure IV.1 Graphiques de contour (a) le mixte et vitesse, tension avec débit =5 kg/h.(b) l'isolant et vitesse, tension avec débit =5 kg/h.(c) le conducteur et débit, vitesse.

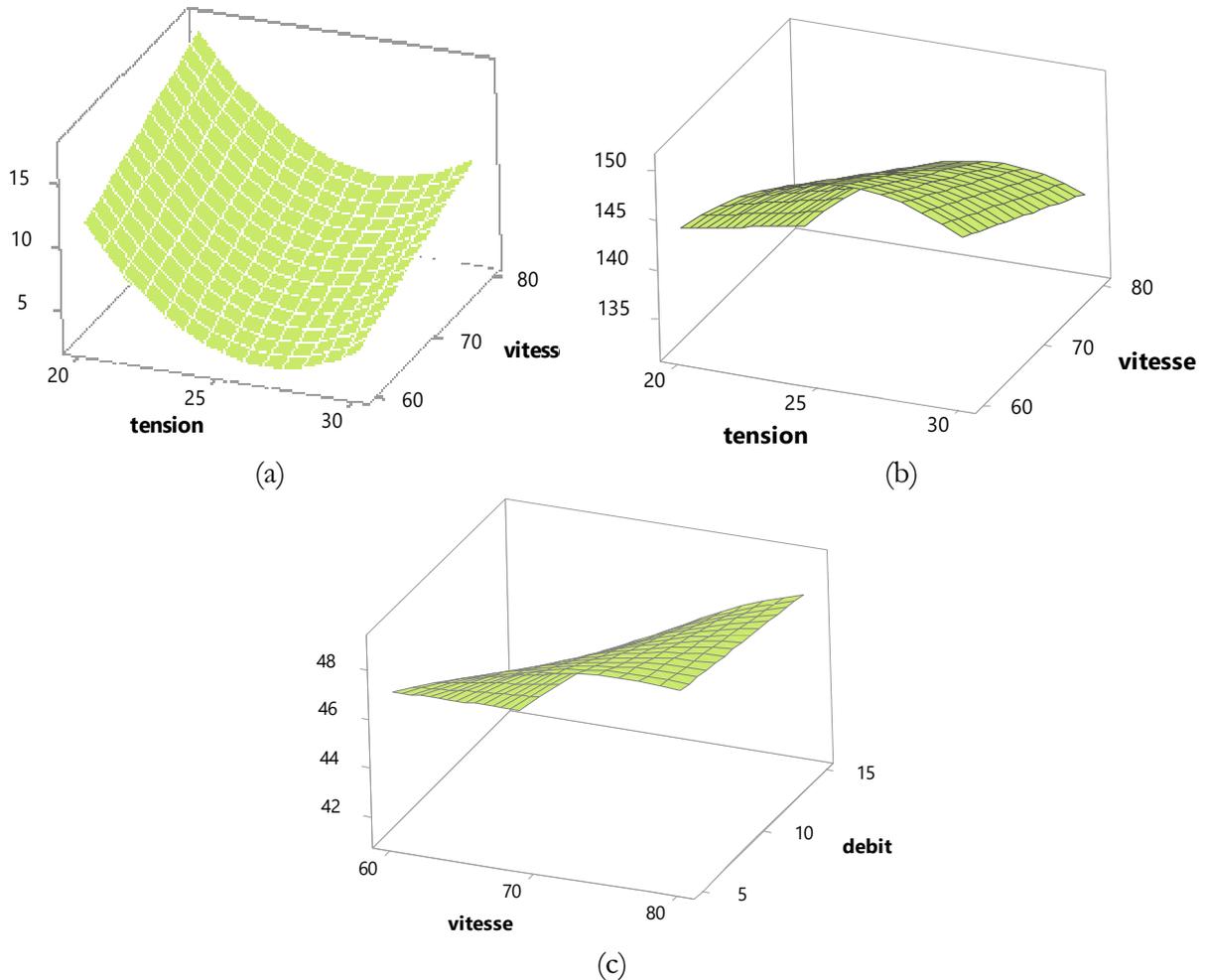


Figure IV.2. Diagrammes de surface (a) le mixte et vitesse, tension avec débit =5 kg/h. (b) l'isolant et vitesse, tension avec débit =5 kg/h. (c) le conducteur et débit, vitesse.

Selon la méthode de plans d'expérience, la meilleure séparation électrostatique correspond aux valeurs optimales suivantes :

- ✓ Une tension appliquée (U) de 26.16 kV
- ✓ Une vitesse de rotation du tambour (n) de : 64.04 tr/min.
- ✓ Un débit de : 5 kg/h.

Conformément à ce qui est illustré dans la figure (IV-3) du logiciel Minitab.

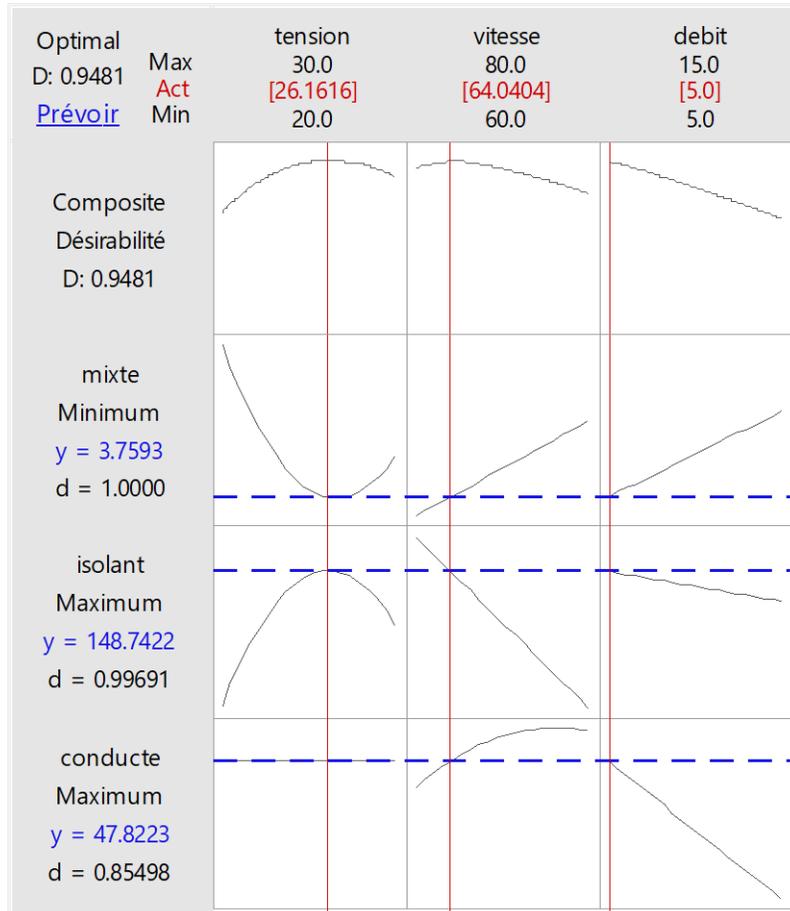


Figure IV.3. Optimisation des réponses : mixte, isolant, conducteur

IV.2 Optimisation multiobjectif.

L'optimisation multiobjectif est une technique mathématique utilisée pour optimiser un système qui a plusieurs objectifs conflictuels. C'est un problème important dans de nombreux domaines tels que l'ingénierie, l'économie et la recherche opérationnelle.

Dans l'optimisation traditionnelle, l'objectif est de trouver la solution optimale qui minimise ou maximise une seule fonction objective. Cependant, dans de nombreux problèmes du monde réel, plusieurs objectifs existent qui ne peuvent pas être optimisés simultanément avec une seule fonction objective. Par exemple, dans la conception d'un avion, un objectif peut être de minimiser le poids, tandis qu'un autre objectif peut être de maximiser la portée. Ces objectifs sont souvent en conflit et des compromis doivent être faits entre eux.

L'optimisation multiobjectif vise à trouver un ensemble de solutions, connu sous le nom de frontière de Pareto, qui représente les meilleurs compromis entre plusieurs objectifs. La frontière

de Pareto comprend toutes les solutions qui ne sont pas dominées par d'autres solutions, c'est-à-dire que aucune autre solution n'est meilleure dans tous les objectifs.

Il existe différentes approches pour résoudre les problèmes d'optimisation multiobjectif, y compris les algorithmes évolutionnaires, tels que les algorithmes génétiques et l'optimisation par essaim de particules, et les méthodes de programmation mathématique telles que la programmation linéaire et non linéaire.

L'un des principaux défis de l'optimisation multiobjectif est la complexité du problème. Contrairement à l'optimisation à objectif unique, il peut y avoir plusieurs solutions optimales et il n'est pas toujours possible de déterminer la "meilleure" solution. C'est pourquoi l'optimisation multiobjectif implique souvent la prise de décision et l'élaboration de préférences auprès des parties prenantes, qui doivent fournir leurs préférences pour les compromis entre les objectifs.

IV.2.1 Formulation générale du problème

L'optimisation multi-objectifs s'intéresse à ce type de problème que l'on peut définir de la manière suivante :

$$\begin{cases} \min (F(X) = (f_1(X), f_2(X) \dots f_n(X))) \\ X \in C \end{cases} \quad (IV-2)$$

Où n est le nombre de fonctions objectifs, $X = [x_1, x_2, \dots x_m]$ est le vecteur représentant les variables de décision. C représente l'ensemble des solutions réalisables associé à des contraintes d'égalité et d'inégalité et $F(X) = (f_1(X), f_2(X) \dots f_n(X))$ est le vecteur d'objectifs.

Dans un problème d'optimisation multi-objectifs, il y a plus qu'une fonction d'objectif ($n \geq 2$), lorsqu'il y a plusieurs objectifs, la notion d'optimum change, elle est remplacée par les notions de dominance et d'optimalité de Pareto [115].

Définition 1 (la dominance): une solution A domine une solution B pour un problème de minimisation (resp. maximisation) si et seulement si :

$$\begin{aligned} \forall i \in \{1, 2, \dots, n\} : f_i(A) \leq f_i(B) \text{ (resp. } f_i(A) \geq f_i(B)) \\ \text{et } \exists j \in \{1, 2, \dots, n\} : f_j(A) < f_j(B) \text{ (resp. } f_j(A) > f_j(B)) \end{aligned} \quad (IV-3)$$

On dit que B est dominée par A ou entre les deux solutions, A est la solution non dominée.

Dans l'exemple (Figure IV.4), les points 1,3 et 5 ne sont dominés par aucun autre. Alors que le point 2 est dominé par le point 1, et que le point 4 est dominé par les points 3 et 5 [116].

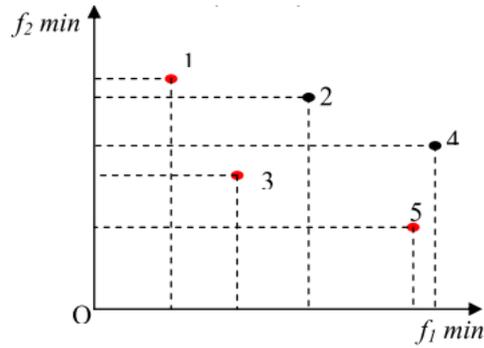


Figure IV.4: Exemple de dominance [116]

Définition 2 (Frontière de Pareto): un vecteur $X^* \in C$ est un optimum de Pareto s'il n'existe aucune solution X de C qui domine X^* . Dans l'exemple de la Figure IV.4, la frontière de Pareto est composée des points 1, 3 et 5.

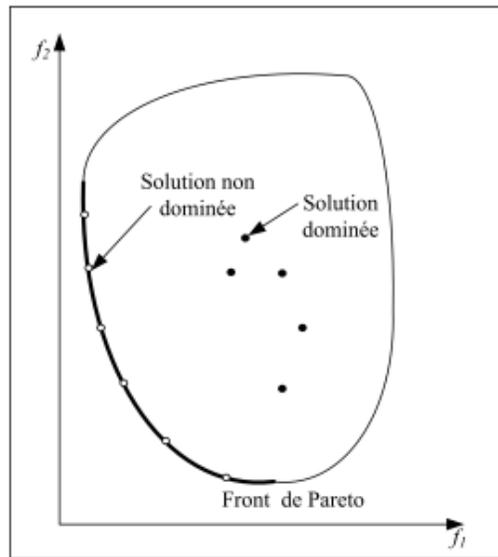


Figure IV.5 : Front de Pareto [115]

La figure IV.5 montre un exemple de front de Pareto pour un problème de minimisation à deux objectifs. L'ensemble de points blancs représentent le front de Pareto [115].

La frontière de Pareto est l'ensemble de tous les points 'Pareto-optimaux'. Le figure IV.6 présentent pour un problème à deux objectifs, les quatre frontières de Pareto en fonction du désir de l'utilisateur de minimiser ou maximiser les objectifs.

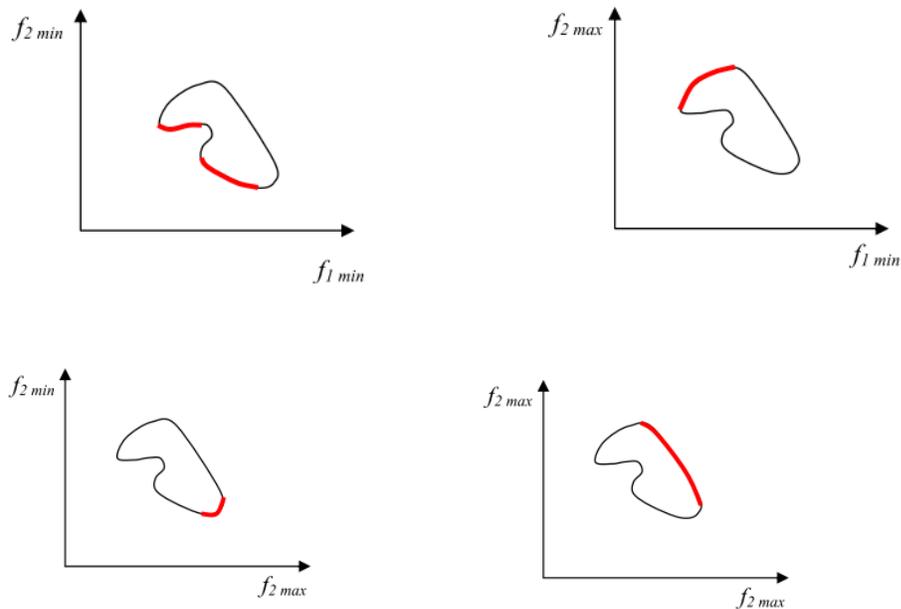


Figure IV.6: Frontière de Pareto pour l'ensemble des points Pareto-optimaux [115]

IV.2.2 La classification des problèmes multiobjectifs:

On peut classer les différents problèmes d'optimisation que l'on rencontre dans la vie courante en fonction de leurs caractéristiques [117] :

- 1- Nombre de variables de décision :
 - Une \Rightarrow mono variable.
 - Plusieurs \Rightarrow multi variable.
- 2- Type de variable de décision :
 - Nombre réel continu \Rightarrow continu.
 - Nombre entier \Rightarrow entier ou discret.
 - Permutation sur un ensemble fini de nombres \Rightarrow combinatoire.
- 3- Type de fonction objective :
 - Fonction linéaire des variables de décision \Rightarrow linéaire.
 - Fonction quadratique des variables de décision \Rightarrow quadratique.
 - Fonction non linéaire des variables de décision \Rightarrow non linéaire.

4- Formulation de problème :

- Avec contraintes \Rightarrow contraint.
- Sans contraintes \Rightarrow non contraint.

IV.3 L'optimisation multiobjectif par algorithme génétique (MOGA)

L'optimisation multiobjectif consiste à trouver un ensemble de solutions optimales pour un problème où plusieurs objectifs contradictoires sont présents. Les algorithmes génétiques (GA) sont un moyen courant pour résoudre ce genre de problèmes.

Le fonctionnement d'un GA pour l'optimisation multiobjectif est similaire à celui d'un GA standard, mais il utilise une technique de sélection de la meilleure solution qui tient compte de plusieurs critères d'optimisation simultanément. Cela peut être fait en utilisant des techniques telles que la domination Pareto, qui consiste à éliminer les solutions qui sont dominées par d'autres solutions selon les critères d'optimisation.

Le processus de sélection de la meilleure solution peut également inclure la minimisation de la distance entre les différents critères d'optimisation, ce qui peut aider à trouver des compromis entre les objectifs contradictoires.

En fin de compte, l'optimisation multiobjectif avec GA permet de trouver un ensemble de solutions optimales qui représentent différents compromis entre les objectifs contradictoires, ce qui peut être utile pour les décisions de prise en compte de plusieurs facteurs importants.

IV.3.1 Avantages et inconvénients des MOGA

Les avantages de l'optimisation multiobjectif par algorithme génétique (MOGA) incluent :

- Capacité à trouver des solutions optimales pour plusieurs objectifs simultanément, ce qui peut être très utile dans des situations où plusieurs critères de performance sont importants.
- Possibilité de trouver des solutions qui ne sont pas facilement accessibles avec d'autres méthodes d'optimisation, car les algorithmes génétiques peuvent explorer un large éventail de solutions potentielles.
- Flexibilité pour traiter différents types de variables de décision, y compris les variables continues, binaires ou discrètes.

Les inconvénients de MOGA incluent :

- Temps de calculs plus longs que les méthodes d'optimisation mono-objectif, car MOGA nécessite d'évaluer chaque solution sur plusieurs objectifs.
- Difficulté à choisir une solution unique optimale parmi un ensemble de solutions non-dominées, ce qui peut rendre le processus de prise de décision complexe.
- Sensibilité aux paramètres du modèle, tels que les méthodes de croisement et de mutation, qui peuvent affecter la qualité des solutions trouvées [118].

IV.3.2 Les étapes principales d'un (MOGA).

Les étapes principales d'un algorithme génétique multiobjectif (MOGA) sont les suivantes [119] :

- Initialisation : générer une population de solutions candidates aléatoires.
- Évaluation : évaluer chaque solution en utilisant des fonctions objectives qui mesurent la qualité de la solution sur chaque objectif.
- Sélection : sélectionner les solutions les plus prometteuses pour la reproduction. Les méthodes de sélection peuvent être basées sur la domination, la diversité ou un compromis entre les deux.
- Croisement et mutation : combiner des solutions sélectionnées pour produire une nouvelle population de solutions candidates. Les opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués pour créer de nouvelles solutions qui sont potentiellement meilleures que les solutions initiales.
- Évaluation de la population de solutions : évaluer les nouvelles solutions générées en utilisant les fonctions objectives.
- Maintien de la diversité : garantir que la population de solutions candidates est diversifiée pour assurer une bonne couverture de l'espace de recherche.
- Arrêt de l'algorithme : vérifier si une condition d'arrêt est satisfaite, par exemple si une solution optimale ou une certaine qualité de solution est atteinte ou si un nombre maximum d'itérations est atteint.
- Sortie des résultats : renvoyer l'ensemble de solutions non-dominées (front de Pareto) obtenu à partir de la dernière population de solutions.

Ces étapes sont répétées jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait. L'objectif de l'algorithme génétique multiobjectif est de trouver un ensemble de solutions qui sont optimales selon plusieurs objectifs simultanément, représentées par le front de Pareto. La figure IV.7 présente l'architecture de l'algorithme génétique multi-objectifs. Les principales étapes de l'AG proposé sont présentées. La population initiale de chromosomes est créée de manière aléatoire et entrée dans l'optimiseur GA. Une fois les solutions optimales de Pareto trouvées, la meilleure solution est sélectionnée à l'aide d'un critère prédéfini.

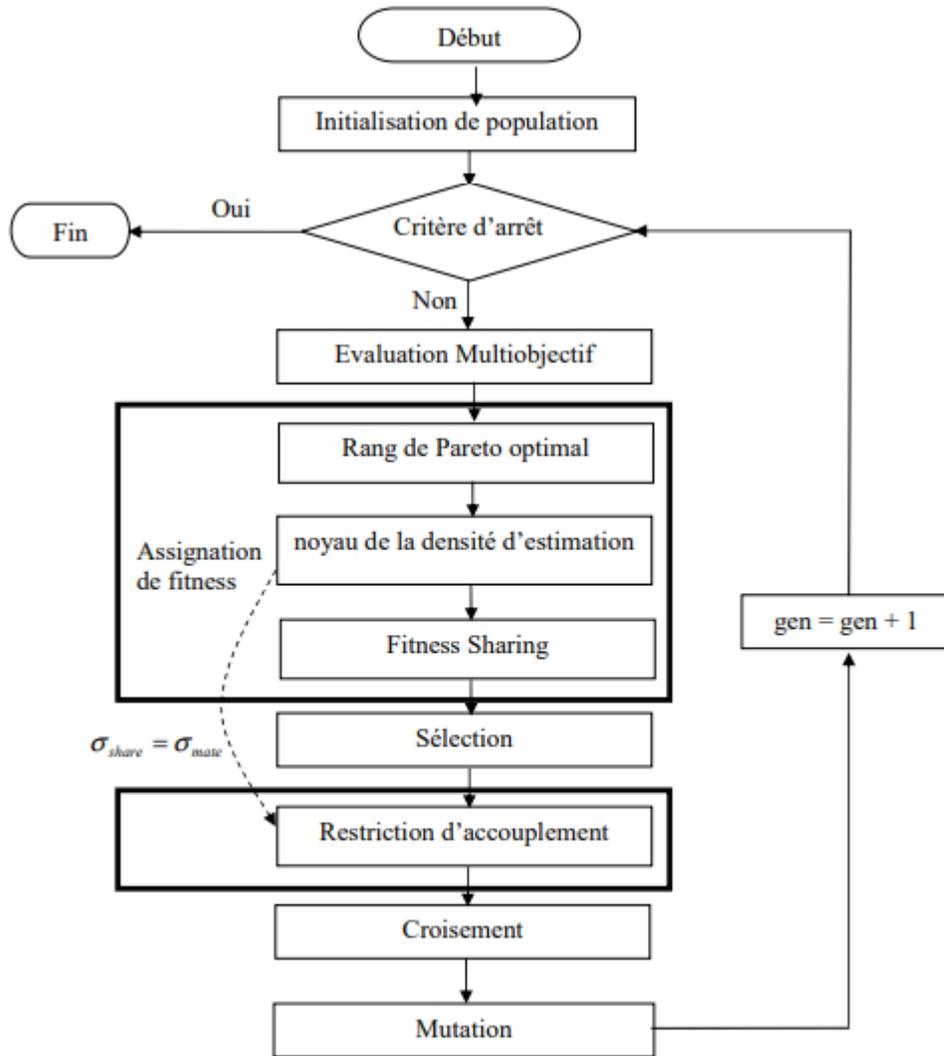


Figure IV.7 : Architecture de l'algorithme génétique multi-objectifs [120].

IV.4 Optimisation de séparateur électrostatique par MOGA.

Les problèmes d'optimisation multiobjectifs (MOOP) impliquent la recherche simultanée de plusieurs solutions optimales pour différentes fonctions objectives. Dans notre cas, l'objectif est de réduire la masse du produit mixte récupéré (Mm) tout en maximisant la récupération des masses de conducteur (Mc) et d'isolant (MI). Contrairement aux problèmes d'optimisation mono-objectif, les MOOP ne conduisent souvent pas à une solution unique optimale qui satisfait tous les objectifs simultanément. Au lieu de cela, ils génèrent un ensemble de solutions de compromis, où l'amélioration d'un objectif entraîne généralement une détérioration d'un autre.

L'algorithme MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) est utilisé pour explorer cet ensemble de solutions de compromis. Il génère le front optimal de Pareto, qui représente les meilleures solutions possibles compte tenu de la nature conflictuelle des objectifs. Les solutions sur le front de Pareto sont considérées comme non dominées, ce qui signifie qu'aucune ne peut être améliorée dans un objectif sans détériorer un autre. Ces solutions offrent ainsi une gamme de compromis, permettant au décideur de choisir celle qui correspond le mieux à ses priorités et aux compromis qu'il est prêt à accepter.

IV.4.1 Données relatives à l'algorithme génétique

- Initialisation : hypercube latin
- Stratégie de sélection : Pareto tournament
- Type de croisement : croisement intermédiaire
- Taille de la population $N_{pop} = 100$
- Probabilité de croisement $P_c = 0.8$
- Probabilité de mutation $P_m = 0.01$

IV.4.2 Plan exploratoire

Plusieurs essais ont été effectués avec une population de 100

- 1er test : individus évoluant pendant 10 générations.
- 2ème test : individus évoluant pendant 100 générations.
- 3ème test : individus évoluant pendant 200 générations.

IV.4.3 Résultats

Le front Pareto-optimal, illustré dans la Figure IV.8, résulte de la minimisation de la masse du produit mixte et de la maximisation des masses des produits conducteur et isolant pour les trois tests effectués. Les solutions non-dominées obtenues à partir de cet ensemble reflètent les compromis entre ces objectifs multiples.

Une analyse du temps de calcul CPU (TC) révèle des tendances intéressantes. Le premier test, malgré un petit nombre de générations, présente un temps de calcul remarquablement bas (TC

= 2.17 Sec). Le deuxième test affiche un temps de calcul intermédiaire de 3.3 Sec, tandis que le troisième test présente le temps de calcul le plus élevé, soit 4.18 Sec.

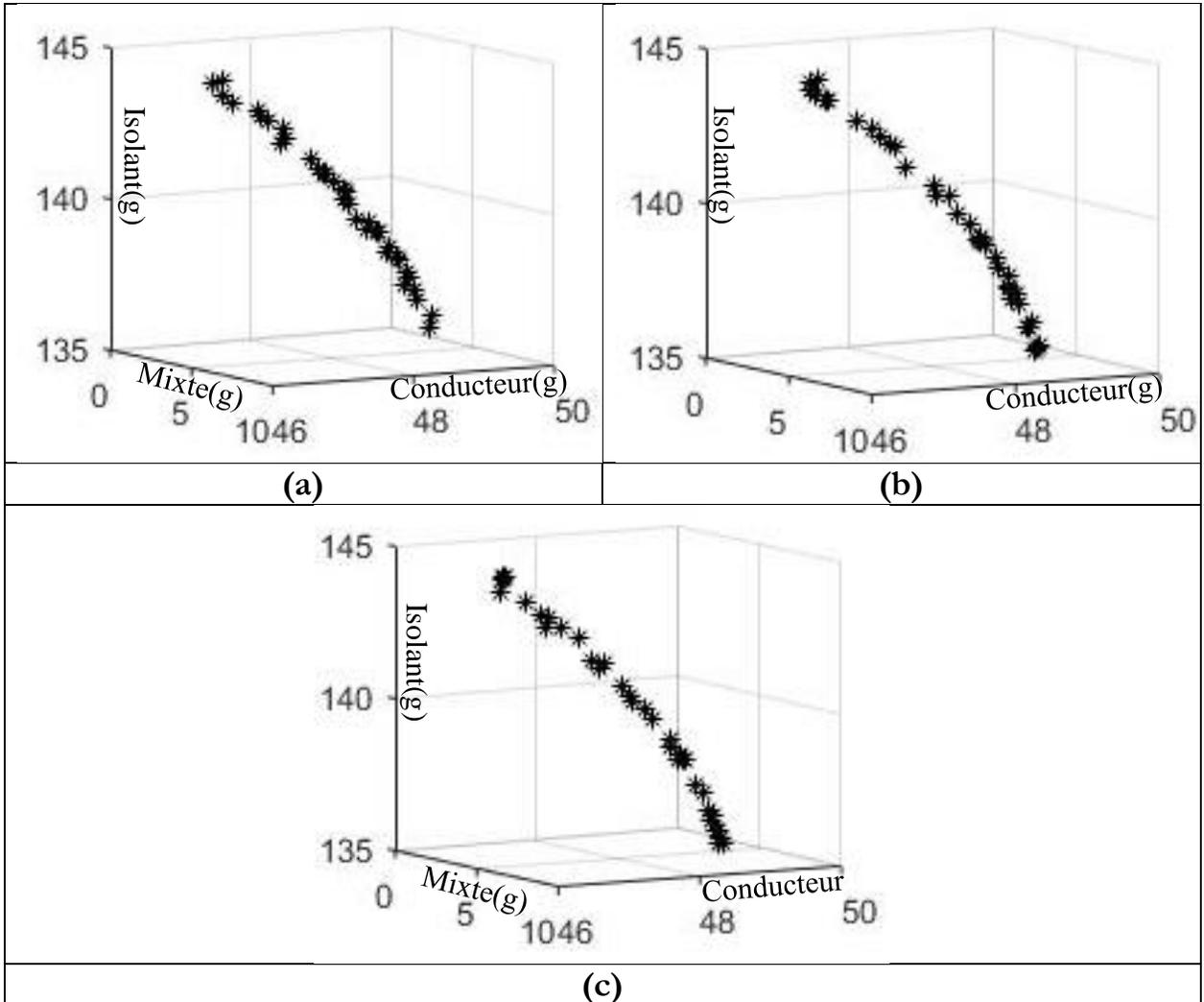


Figure IV.8. Courbe de front de Pareto obtenue pour différents nombres de générations (NG), (a) : NG = 10, (b) ; NG = 100, (c) NG = 200.

En examinant la boîte à moustaches sur la figure IV.9 pour le premier test avec 10 générations, on constate que les solutions convergent vers une plage restreinte de valeurs par rapport aux autres tests. Cela suggère que l'algorithme parvient à identifier un ensemble de solutions qui équilibrent efficacement les objectifs.

En revanche, la boîte à moustaches pour les deux autres tests indique que les solutions divergent considérablement par rapport au premier test. Cela suggère que l'algorithme a des

difficultés à équilibrer les objectifs et génère une large gamme de solutions qui peuvent ne pas être optimales.

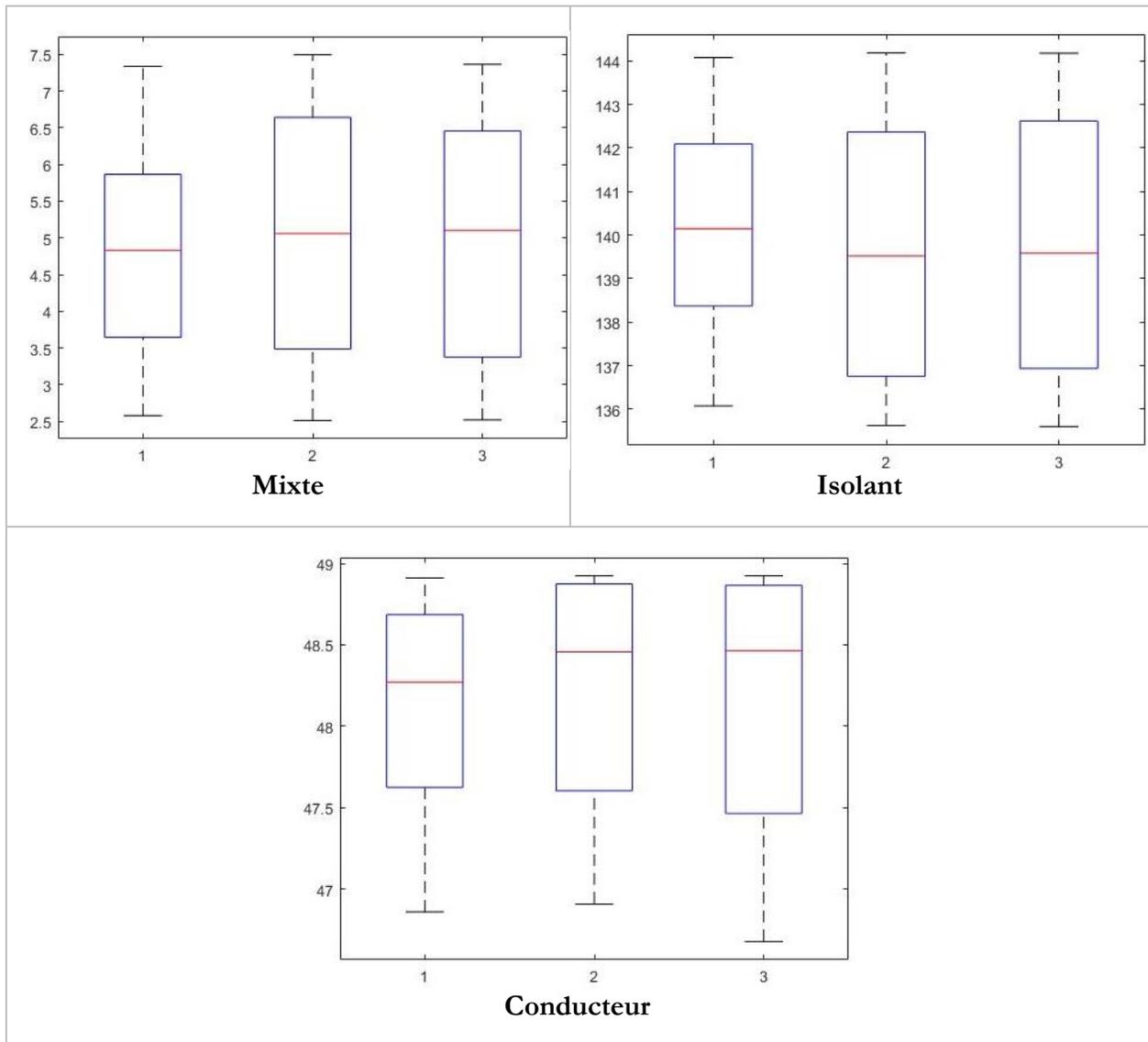


Figure IV.9. La distribution des réponses optimales calculées par MOGA pour différents nombres de générations (NG), 1 : NG = 10, 2 ; NG = 100, 3 NG = 200.

Le résultat de optimisation par MOGA pour 1^{er} test (NG=10) présent dans le Tableau (IV-1) suivant :

Tableau IV-1 : Le résultat d'optimisation par MOGA (NG=10).

Tension (Kv)	Vitesse (Tr/min)	Débit (Kg/h)	Mixte (g)	Conducteur (g)	Isolant (g)
26.16	62.24	5.00	3.15	47.41	142.87
25.19	60.29	5.08	3.00	46.92	144.07
25.88	66.39	5.10	4.46	48.13	140.77
25.93	65.02	5.12	4.06	47.90	141.46
25.36	69.44	5.25	5.62	48.47	139.16
25.96	69.61	5.03	5.32	48.58	139.12
26.38	69.02	5.25	5.19	48.43	139.23
26.39	61.02	5.12	2.83	47.07	143.34
25.36	68.90	5.19	5.44	48.43	139.46
25.62	71.16	5.08	5.90	48.70	138.33
25.67	73.18	5.12	6.49	48.82	137.26
24.66	74.07	5.10	7.34	48.86	136.56
25.78	75.50	5.04	7.07	48.91	136.08
26.24	70.59	5.18	5.62	48.61	138.50
26.14	63.64	5.05	3.58	47.68	142.14
26.14	65.94	5.04	4.23	48.09	140.96
26.26	73.77	5.07	6.48	48.86	136.91
25.59	70.59	5.09	5.76	48.64	138.62
26.35	67.54	5.13	4.71	48.28	140.04
26.13	65.52	5.11	4.15	47.99	141.15
25.81	65.88	5.14	4.35	48.03	141.04
26.08	62.53	5.01	3.25	47.48	142.74
25.05	66.95	5.12	5.02	48.21	140.50
25.35	66.90	5.13	4.83	48.20	140.55
26.84	72.37	5.15	6.11	48.76	137.39
26.77	68.22	5.18	4.93	48.35	139.49
26.47	67.27	5.08	4.60	48.27	140.15
25.37	62.05	5.16	3.44	47.29	143.10
25.65	71.43	5.04	5.95	48.73	138.20
25.93	72.51	5.03	6.16	48.81	137.63
25.21	63.24	5.08	3.84	47.58	142.50

25.19	71.98	5.14	6.38	48.74	137.83
26.09	60.06	5.08	2.58	46.86	143.98
26.62	63.51	5.14	3.55	47.61	141.95
26.52	60.54	5.08	2.66	46.98	143.52

L'optimisation avec MOGA nous a fourni 35 solutions présentées au tableau IV 1. L'analyse de ces résultats à partir du tableau est difficile. La figure IV 10 "boit à moustache" résume bien les résultats et nous donne une vision graphique des solutions. Nous avons observé que la vitesse constitue le plus grand défi pour l'optimisation, car les solutions divergent largement. La valeur maximale est de $n = 75.5 \text{ tr/min}$ et la valeur minimale est de $n = 60 \text{ tr/min}$. Cela a conduit à une grande divergence dans les résultats, en particulier le conducteur

En ce qui concerne la haute tension, nous avons observé une convergence des solutions, avec une valeur maximale de 26,83 et une valeur minimale de 24,65. Pour le débit, une convergence significative est notée dans les résultats, à tel point que la valeur optimale est proche de $m \cong 5$.

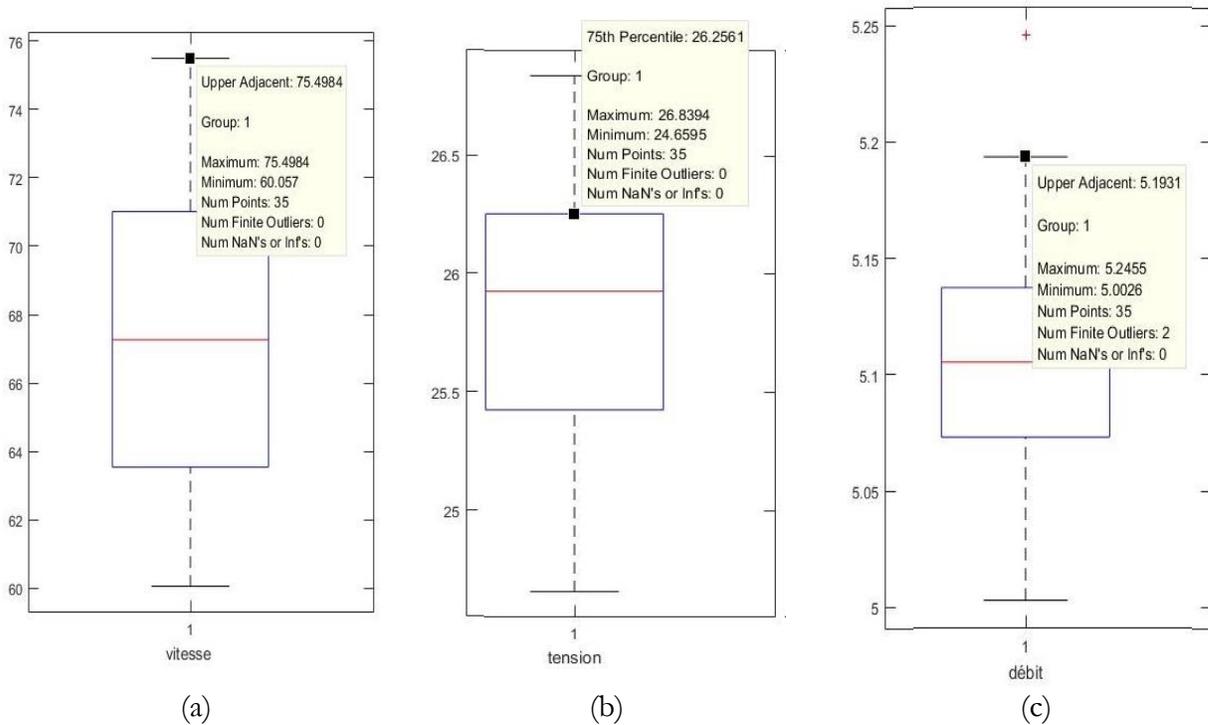
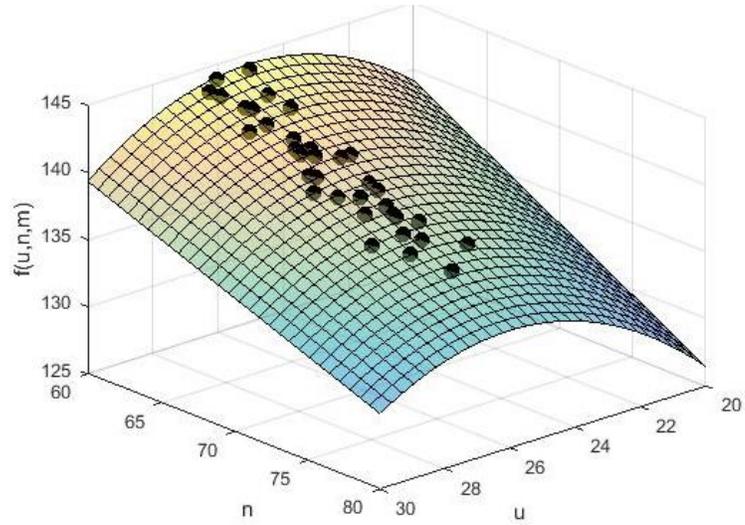
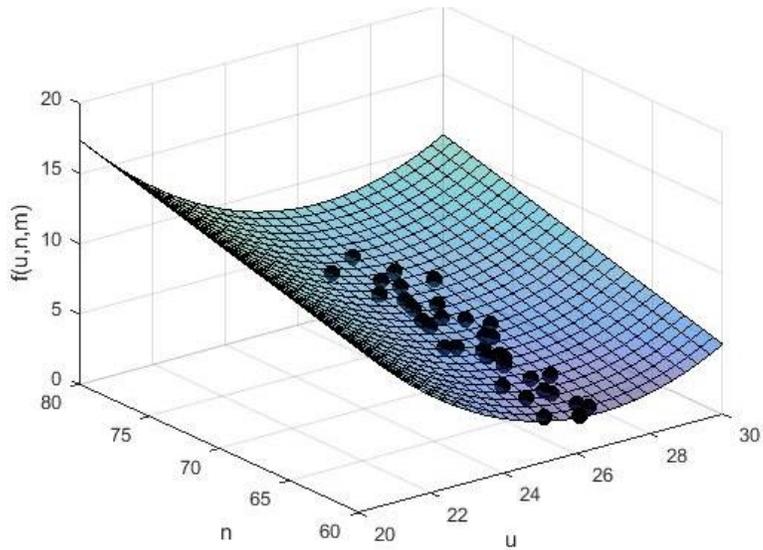


Figure IV.10 : La distribution des solutions optimales calculées par MOGA pour NG = 10.

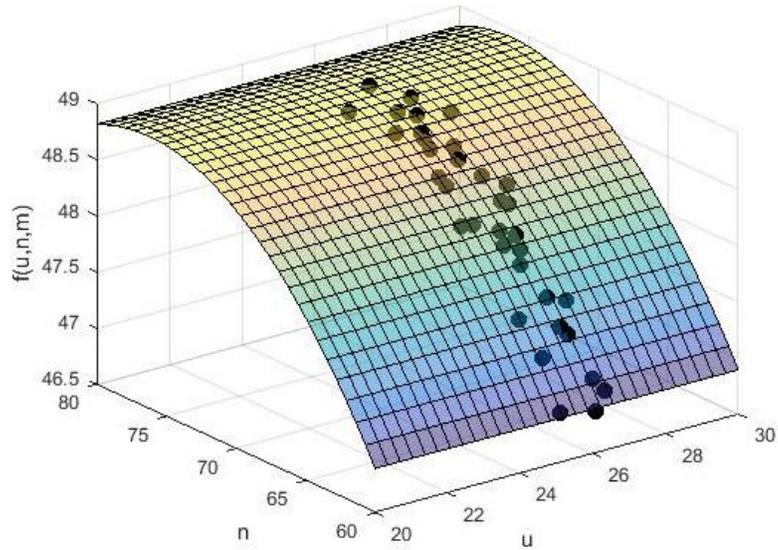
La Figure IV.11 présente la distribution des solutions sélectionnées par la MOGA sur la surfaces de trois réponses (conducteur,isolant,mixte) avec débit $m = 5$.



Isolant



Mixte



Conducteur

Figure IV.11.la distribution des solutions sur la diagraphme de surfaces des réponses

(a) Isolant , (b) Mixte ,(c) Conducteur

La figure IV.12 présente le front de Pareto comme une surface pour NG=10

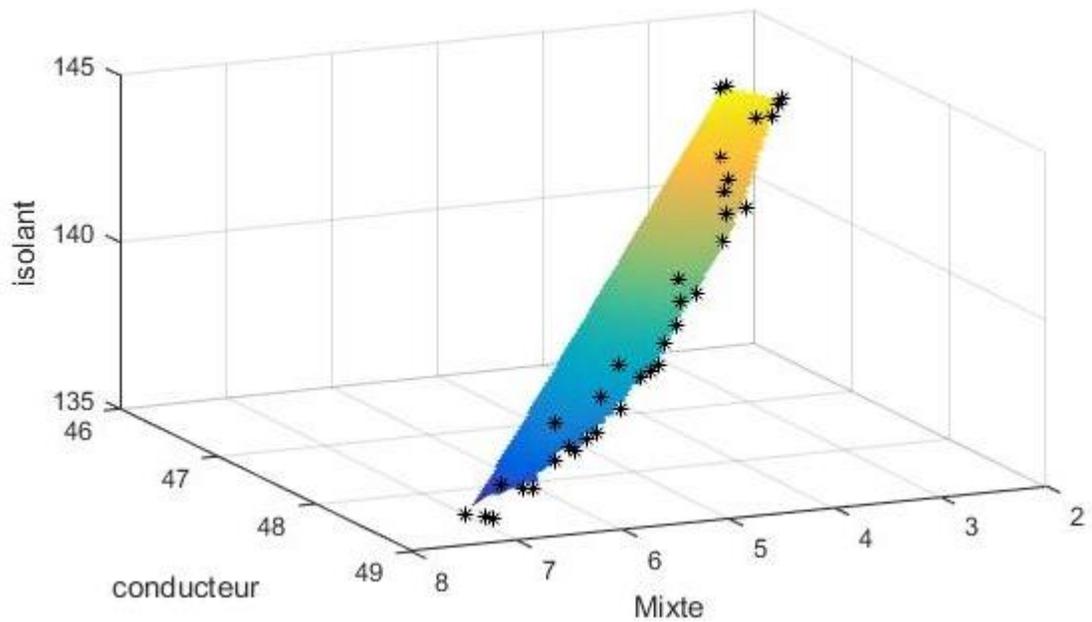


Figure IV.12.Front de Pareto comme une surface

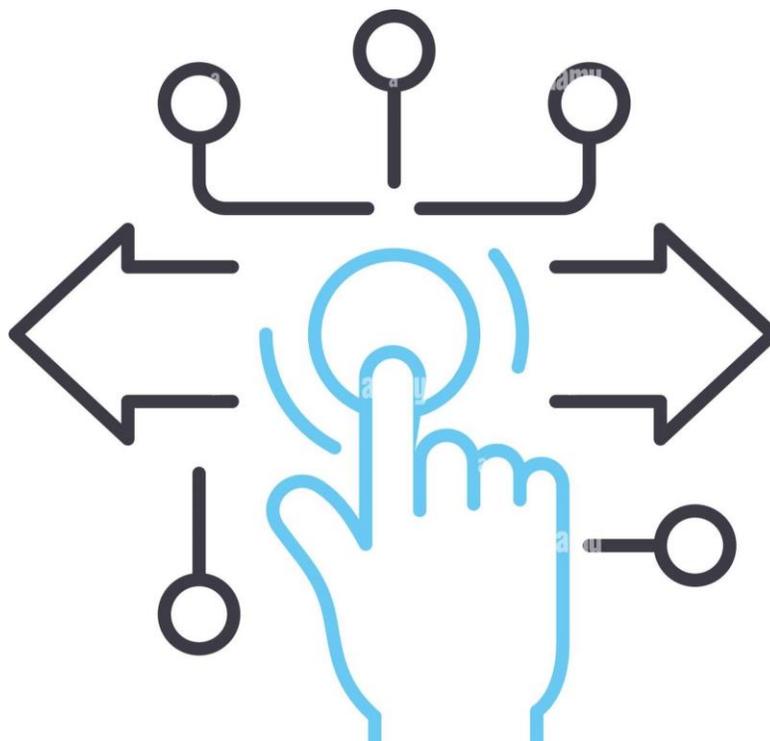
IV.5 Conclusion

La multi-objectif optimisation (MOO) est une méthode d'optimisation qui permet de trouver des solutions qui répondent à plusieurs critères ou objectifs simultanément. L'avantage de la MOO par rapport à l'optimisation à un seul objectif (SOO) est qu'elle permet de trouver des solutions qui sont non-dominées, c'est-à-dire des solutions qui ne peuvent pas être améliorées sur un critère sans dégrader un autre critère. En d'autres termes, la MOO permet de trouver un ensemble de solutions optimales qui représentent un compromis entre plusieurs objectifs.

La MOO est une méthode d'optimisation puissante qui peut aider à résoudre des problèmes complexes en prenant en compte plusieurs objectifs simultanément. Elle permet d'obtenir des solutions plus innovantes, plus créatives et plus globales que l'optimisation à un seul objectif.

Chapitre V

V. Contrôle intelligent d'un séparateur électrostatique



Introduction

Le contrôle des systèmes industriels représente un défi complexe, nécessitant des approches innovantes et intégrées pour atteindre l'efficacité opérationnelle, la minimisation des coûts et une gestion optimale des processus. L'intégration de technologies émergentes, notamment l'intelligence artificielle et l'automatisation avancée, offre des opportunités significatives pour répondre à ces défis. Cependant, la conception de solutions doit également prendre en compte des aspects cruciaux tels que la durabilité environnementale, la conformité aux normes et la sécurité industrielle. La recherche continue dans ce domaine vise à élaborer des stratégies robustes, favorisant une approche durable et adaptable face aux évolutions constantes du contexte industriel [121].

Dans ce contexte, La conclusion la plus importante à retenir de l'ensemble des travaux réalisés a montré que les séparateurs électrostatique dépendent d'une multitude de facteurs qui ne restent pas parfaitement constants dans le temps. Ils varient et leurs influences se répercutent sur la qualité des résultats de la séparation. Pour toutes les entreprises, la variabilité des caractéristiques de qualité constitue un obstacle majeur pour fournir des produits qui répondent aux exigences des clients. Un exemple concret illustrant ces défis est la séparation électrostatique à cylindre rotatif, un processus multifactoriel impliquant divers paramètres tels que l'électrode couronne, l'électrode statique, le tambour, le vibro-transporteur, la haute tension et les parois du collecteur. Le réglage précis de chacun de ces paramètres exerce une influence variable sur les performances de l'appareil. Certains paramètres peuvent être fixés initialement lors de la conception de l'appareil, mais leur ajustement ultérieur est essentiel pour optimiser le processus de séparation, illustrant ainsi la complexité du contrôle des systèmes industriels dans des applications spécifiques comme la séparation électrostatique.

Compte tenu des progrès réalisés sur les moyens de diagnostic, sur l'algorithme mathématique et sur la technologie informatique, un système de contrôle efficace de ce procédé sera développé dans cette section, pour diminuer voire éliminer les effets de ces instabilités. Ce système requiert le développement d'un système artificiel à base de la logique flou, et de l'emploi d'un système d'identification qui permette de simuler la caractéristique dynamique de la cible

V.1 FORMULATION DU PROBLÈME

Le but recherché dans ce travail d'un point de vue automatique est :

- l'optimisation de la séparation,
- l'amélioration de la qualité des produits séparés
- la détection précoce des anomalies de fonctionnement, par la surveillance et la conduite automatique de ces procédés

Dans ce contexte, l'objectif du notre contrôleur est de maximiser la récupération du produit isolant (Mi) et du produit conducteur (Mc), tout en minimisant la récupération du produit mixte (Mm), tout en prenant en considération la pureté des produits conducteur et isolant. À la lumière de l'étude statistique effectuée dans le chapitre III, nous avons observé que la haute tension (U) a un impact à la fois positif et négatif sur la récupération du produit mixte et isolant (Mm) et (Mi) respectivement. Ainsi, il est crucial d'assurer un contrôle efficace de la haute tension en priorité. D'autre part, la vitesse de rotation (n) a un impact positif sur la récupération du produit conducteur Mc et la pureté du produit isolant, mais un impact positif sur la récupération du produit mixte. Le débit, quant à lui, influe négativement sur la récupération du produit conducteur (Mc) et la pureté du produit isolant.

Ainsi, dans la conception du contrôleur, toutes les considérations précédentes doivent être prises en compte :

1. **Double impact de la haute tension :** Il est essentiel de tenir compte du double impact de la haute tension sur la récupération du produit isolant (Mi) et du produit mixte (Mm).
2. **Effet de la vitesse de rotation :** L'impact positif de la vitesse de rotation sur la récupération du produit conducteur (Mc) et la pureté du produit isolant (Mi) est contrebalancé par une augmentation du produit mixte (Mm).
3. **Contrôle du débit :** Contrairement aux autres paramètres, le débit ne nécessite pas de contrôleur, car l'analyse indique que le meilleur processus de séparation est obtenu à la plus faible valeur de débit. Les interactions entre les facteurs ont été négligées dans l'élaboration des règles de contrôle, car leur impact sur le résultat est presque négligeable par rapport aux autres facteurs.

4. **La pureté de la récupération** : Notre seule référence disponible est le pourcentage de récupération du produit mixte, $Mm=0$, simulant ainsi le côté industriel. Dans la plupart des cas, le pourcentage de récupération des produits conducteur et isolant ne peut être identifié, rendant ainsi impossible la confirmation automatique de la validité et de la pureté de la séparation. Il est envisageable que le pourcentage du produit mixte (mm) soit faible tandis que le produit conducteur est dirigé vers le compartiment du produit isolant, ou vice versa.

Pour surmonter l'ensemble des défis précédemment évoqués :

1-Pour la Haut tension

Il est recommandé d'observer le changement en pourcentage de la récupération de produit isolant (Δmi) avec le changement en valeur de la haute tension (ΔU). Cette approche permet d'exploiter le double impact de la haute tension sur la récupération du produit isolant, visant ainsi à atteindre le point de contrôle optimal :

SI ($\Delta mi * \Delta U > 0$) ,alors augmenter U

SI ($\Delta mi * \Delta U < 0$) ,alors diminuer U

Où

$$mi = Mi / (Mi + Mc + Mm) \quad \text{V-1}$$

$$mc = Mc / (Mi + Mc + Mm) \quad \text{V-2}$$

$$mm = Mm / (Mi + Mc + Mm) \quad \text{V-3}$$

$$\Delta U = U_{i+1} - U_i \quad \text{(V-4)}$$

$$\Delta mi = m_{i+1} - m_i \quad \text{(V-5)}$$

Où i est le compteur de cycles.

2-Pour la vitesse

Afin d'augmenter la masse de des produit conducteur et la pureté de Mi du produit isolant tout en diminuant la récupération en mixte Mm , nous avons besoin comme entrées : la vitesse (n), (Δmi) et changement en Mc (Δmc) où :

Si ($\Delta mi < 0$) , alors le contrôleur diminuera la vitesse.

Si ($\Delta mc > 0$) , alors le régulateur augmentera la vitesse.

Avec

$$\Delta mc = m_{c+1} - m_{ic} \quad \text{(V-6)}$$

De cette manière, l'augmentation de la pureté du produit isolant est possible, tout en favorisant une augmentation de la récupération du produit conducteur (Mc) avec moins d'impact sur le produit mixte (Mm). Comme mentionné précédemment dans l'étude statistique, une partie du produit conducteur est dirigée vers le compartiment du produit isolant en raison de la faible vitesse. Par exemple, si la diminution de la masse du produit isolant causée par l'augmentation de la vitesse est plus significative que l'augmentation de la masse du produit conducteur, cela suggère que la partie restante se dirige vers le compartiment du produit mixte. Dans cette situation, il est recommandé de réduire la vitesse.

Bien entendu, la régulation de la haute tension et de la vitesse nécessite la connaissance de la valeur de chacune d'elles, et donc, leurs valeurs seront considérées comme des entrées dans le système.

Pour appliquer ces principes à notre séparateur, l'intelligence artificielle a démontré son efficacité dans le contrôle du séparateur électrostatique à plusieurs reprises. Le premier travail publiés dans cet axe des recherche avait comme objectif développer un système de contrôle à base d'algorithme génétique pour un séparateur électrostatique à cylindre tournant SELMEG (Laboratoire IRECOM ; Université de Sidi Bel Abbese ; Algérie) [100] , pour lequel un modèle mathématique valide, établi par la méthodologie des plans d'expériences, était disponible. La cible était de maximiser le produit conducteur collecté, avec les variables de contrôle étant la haute tension qui alimente le système d'électrodes du séparateur électrostatique, et l'inclinaison de la paroi entre les deux compartiments dans lesquels sont rassemblés Le produit conducteur et le mixte. L'efficacité de la procédure est testée contre une situation de dysfonctionnement pouvant se produire dans la pratique industrielle : une variation de la vitesse de rotation du cylindre.

Toutefois, il est crucial de noter que l'utilisation d'algorithmes génétiques est chronophage pour l'évaluation, ce qui a conduit de nombreux experts en contrôle à préférer des alternatives telles que la logique floue et les réseaux neuronaux [4]. Dans une autre travail [78], les auteurs ont tenté de répondre à cette question par une comparaison qualitative des modèles polynomiales et des modèles à base de réseau de neurones (RNA). Les deux types de modèles sont exploités dans la modélisation du fonctionnement d'un séparateur électrostatique à cylindre tournant dans un espace d'étude caractérisé par les limites imposées par les contraintes physiques et mécaniques de l'installation. La conclusion principale qu'on a pu tirer de ce travail est que le succès du contrôle de la séparation électrostatique dépend de la qualité du modèle exploité par algorithme de

l'optimisation. L'utilisation des modèles obtenus avec la méthodologie des plans d'expérience, peut induire en erreur et générer une réduction des performances. Le modèle établi par les réseaux de neurones (RNA) a présenté une erreur de prédiction inférieure à l'erreur de mesure. On les associant avec l'AG, Ils ont permis de déterminer la valeur optimale des variables de contrôle (généralement la vitesse du cylindre et la haute tension appliquée) pour maximiser la récupération. Ce modèle devrait être utile pour le control optimale du processus de séparation électrostatique.

En parallèle de ça, Un séparateur semi industriel à électrode rotative, avec des dimensions plus proches de celles envisagées pour l'installation industrielle (figure V.1), a été conçu au laboratoire IRECOM de l'université Djilali Liabès de Sidi Bel Abbés. Ce travail rentre dans le cadre du projet national de recherche PNR intitulée « Réalisation d'un pilote semi-industriel de séparateur à électrode rotative pour la récupération des déchets de câbles électriques », avec comme partenaire socio- économique l'Entreprise de Récupération de l'Ouest (ERO) sise à Oran.



Figure V.1 : Séparateur électrostatique semi-industrielle réalisé au laboratoire IRECOM-UDL-SBA

Afin de faciliter la procédure de l'ajustement et de rendre l'utilisation de ce type de processus plus accessible, une approche de contrôle multifactoriel de ce séparateur semi-industriel a été proposé dans [122] D'un point de vue algorithmique, plusieurs algorithmes évolutionnaires ont été proposé , dont la création a été inspirée par l'analogie avec des phénomènes biologiques tel

que : les algorithmes génétiques (AG), l'algorithme des colonies de fourmis (ACO), l'algorithme des essais particulaires (PSO). Un algorithme basé sur la biogéographie BBO a été mis en place. Ce dernier a retenu l'attention pour ses performances, en termes de qualité des solutions obtenues qui dépassent de manière très significative ceux obtenus par d'autres algorithmes évolutionnaires sur les principaux jeux de tests. Afin de valider cette approche et méthode proposée, les séries de tests réalisés ont prouvé la qualité de ce contrôle. Les scénarios simulés sont très variés et impliquent les différents facteurs influents sur le processus de la séparation électrostatique. En détectant la perturbation influençant la séparation, l'agissement immédiat du contrôleur proposé à retrouver la qualité prédéfinie de fonctionnement le rend très efficace. Dans un autre travail [123], une étude comparative des techniques d'intelligence artificielle dans le contexte du contrôle optimal d'un séparateur électrostatique industriel à électrode rotative a été présentée. Dans cette étude, la dynamique de chaque système élémentaire a été prise en considération, où la valeur désirée est imposée au système élémentaire par notre algorithme d'optimisation qui exploite le modèle stationnaire de l'installation (Figure V.2)

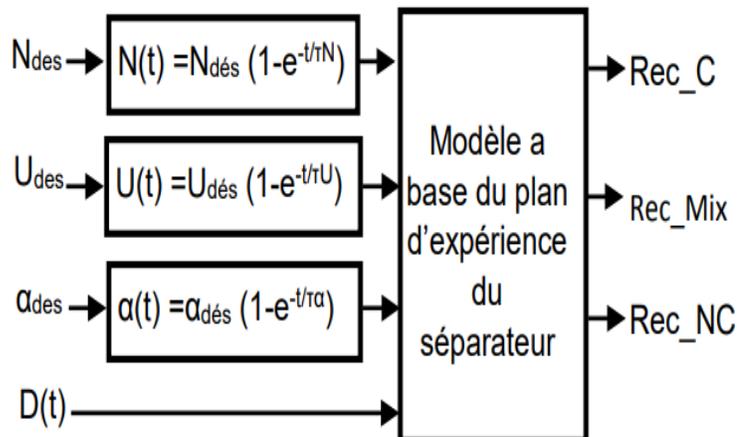


Figure V.2 : Schéma du modèle de séparateur électrostatique utilisé dans la simulation

Les résultats obtenus dans ces études approuvent La régulation pilotée par BBO s'est encore révélée plus efficace, compte tenu le régime dynamique des éléments du séparateurs électrostatiques, en minimisant significativement les impacts de ces perturbations.

En prenant en considération les conclusion tiré dans [122] [123], un travail a été récemment publié [5] dans lequel un contrôleur à base d'un réseaux neural de type feed forward a été proposés (Figure V.3). Il inclut dans sa structure un échantillonneur bloqueur dans le rôle consiste à

discrétiser le signal continue et présenter le signal résultant sous forme d'une valeur constante à l'entrée de l'algorithme d'optimisation pendant une période du cycle de contrôle

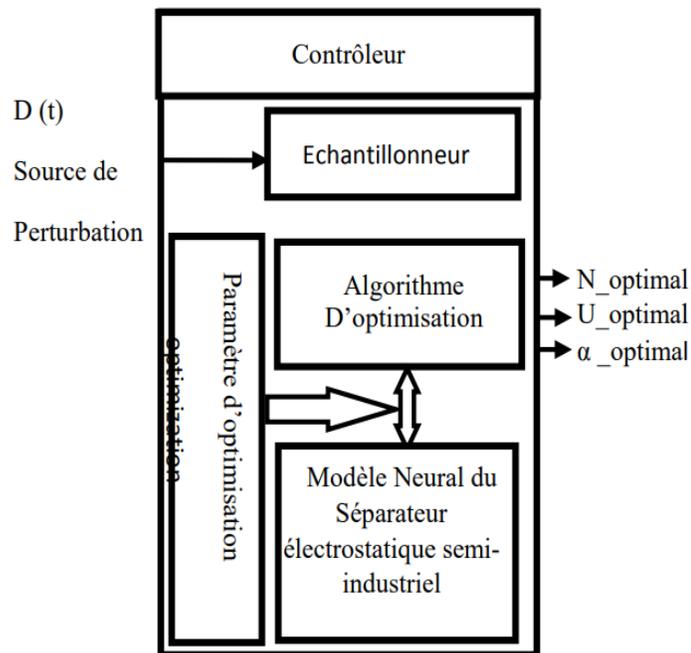


Figure V.3 : Schémas block simplifié du contrôleur à base de réseau de neurone utilisé dans la simulation (perturbation au niveau du débit)

Les résultats obtenus dans cette étude approuvent La régulation pilotée par le RNA-BBO, qui s'est encore révélée plus efficace. L'architecture du RNA a été optimisée grâce à la variation du nombre de neurones, le pourcentage des données de test et pourcentage des données de validation. La performance du réseau a été évaluée par les indicateurs d'erreur, à savoir l'erreur carrée moyenne (MSE) et le coefficient de détermination (R^2). C'est à constater qu'un nombre pas élevé de neurones et un pourcentage plus faible de l'ensemble de données de test et de validation contribuent à une meilleure prédiction des valeurs mesurées.

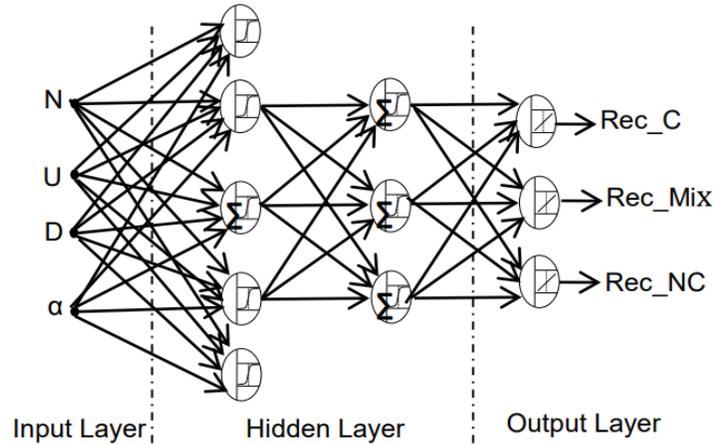


Figure V.4 : Réseau neural artificiel de type Feed-forward

Il est crucial de reconnaître que ces techniques dépendent fortement de la précision des modèles disponibles, et toute modification du modèle peut entraîner un déséquilibre dans les résultats, une situation particulièrement plausible dans le cas d'un séparateur électrostatique [6], en raison de la variabilité des conditions ambiantes et expérimentales, de la granulométrie des déchets, etc. D'autre part, la logique floue se distingue comme un système robuste ne nécessitant pas d'entrées précises [110] [124]. Par conséquent, Dans cette étude, nous avons adopté la logique floue en tant que système de contrôle pour le séparateur électrostatique, avec trois variables (tension, vitesse, débit). Bien qu'elle ait prouvé son efficacité en tant qu'outil puissant de contrôle dans [101], ce système de contrôle était limité par le fait qu'il reposait uniquement sur le contrôle de la haute tension.

V.2 Le contrôleur floue

Plus on regarde de près un problème du monde réel, plus sa solution devient floue (Zadeh 1973) L'outil de logique floue a été introduit en 1965, également par Lotfi Zadeh, et est un outil mathématique pour traiter l'incertitude. Il offre à un partenariat informatique souple le concept important de l'informatique avec des mots ». Il fournit une technique pour gérer l'imprécision et la granularité des informations. La théorie floue fournit un mécanisme pour représenter des constructions linguistiques telles que « beaucoup », « faible », « moyen », « souvent », « peu ». En général, la logique floue fournit une structure d'inférence qui permet des capacités de raisonnement humain appropriées.

Les ensembles flous fournissent des moyens de modéliser l'incertitude associée à l'imprécision, à l'imprécision et au manque d'informations concernant un problème ou une usine, etc. Considérez la signification d'une « personne de petite taille ». Pour un individu X, la personne de petite taille peut être celle dont la taille est inférieure à 4"25". Pour l'autre individu Y, la personne de petite taille peut être celle dont la taille est inférieure ou égale à 3"90". Ce « court » s'appelle un descripteur linguistique. Le terme "court" donne le même sens aux individus X et Y, mais il s'avère qu'ils ne fournissent pas tous les deux une définition unique. Le terme « court » ne serait transmis efficacement que lorsqu'un ordinateur compare la valeur de hauteur donnée à la valeur prédéfinie de « court ». Cette variable « courte » est appelée variable linguistique, qui représente l'imprécision existant dans le système [125].

Le recours au contrôle flou présente plusieurs avantages justifiant son choix [124] :

- ✓ Capacité à traduire des connaissances imprécises/vagues d'experts humains
- ✓ Technologie simple et facile à mettre en œuvre
- ✓ Prise en charge de la conception logicielle et de la mise en œuvre matérielle
- ✓ Les résultats sont faciles à transférer d'un produit à l'autre
- ✓ Comportement régulier du contrôleur Comportement robuste du contrôleur
- ✓ Capacité à contrôler les systèmes instables.

V.3 Les différentes parties de la commande floue

Un régulateur flou est un système à base de connaissance particulière composé de quatre modules principaux à savoir : la base de règle, la fuzzification, le moteur d'inférence et la défuzzification comme il est montré par la figure V.5 :

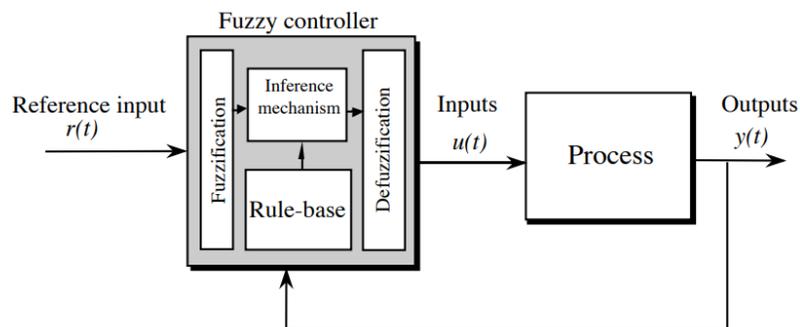


Figure V.5 : Les différentes parties de la commande floue

V.3.1 Base de règles :

Une base de règles (un ensemble de règles Si-Alors), elle est le cœur du système entier dans le sens où tous les autres composants sont utilisés pour interpréter et combiner ces règles afin de former le système final elle est composée, qui contient une quantification en logique floue de la description linguistique de l'expert sur la manière d'obtenir un bon contrôle.

V.3.2 Un mécanisme d'inférence

2. Un mécanisme d'inférence (également appelé « moteur d'inférence » ou module « d'inférence floue »), qui émule la prise de décision de l'expert en interprétant et en appliquant les connaissances sur la meilleure façon de contrôler la centrale[126].

Il transforme à l'aide des opérateurs flous, la partie floue issue de la fuzzification en une nouvelle partie floue conformément aux règles floues et une méthode d'inférence choisie (Mamdani, Larsen, Takagi-Sugeno)[127].

V.3.2.1 Méthode d'inférence max-min (méthode de MAMDANI):

La méthode d'inférence min-max, utilise l'opérateur «ET» par la formulation du minimum. La conclusion dans chaque règle, introduite par «ALORS», qui est réalisée par la formation du minimum. Enfin l'opérateur «OU» lie les différentes règles, réalisé par la formation du maximum.

Les règles floues sont toujours écrites sous la forme suivante :

si (l'entrée 1 est la fonction d'appartenance 1) et/ou (l'entrée 2 est la fonction d'appartenance 2) et/ou... alors (la sortie n est la fonction d'appartenance de sortie n)[128]. Un exemple de système d'inférence Mamdani est illustré à la figure V.6.

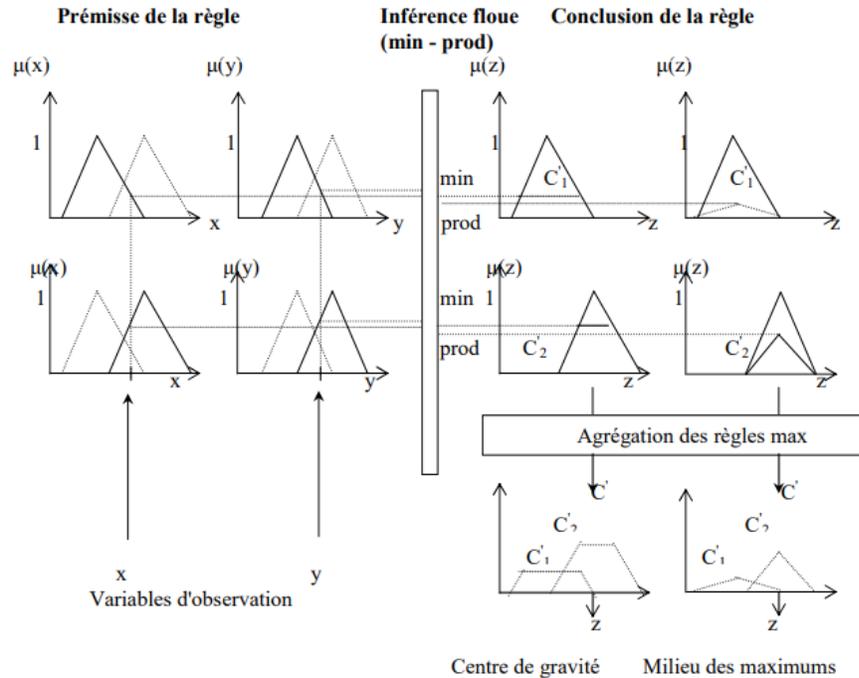


Figure V.6 Système d'inférence flou de Mamdani [129]

V.3.2.2 Méthode d'inférence SOMME-PROD (Sugeno) :

Dans cette méthode, l'opérateur "ET" est réalisé par le produit, de même que la conclusion "ALORS". Cependant, l'opérateur "OU" est réalisé par la valeur moyenne des degrés d'appartenance intervenant dans l'inférence, la conclusion de chaque règle floue a une forme polynomiale.

Une règle typique dans un modèle flou Sugeno a la forme

$$\text{SI } x \text{ est } A \text{ et } y \text{ est } B \text{ ALORS } z = f(x,y)$$

Où AB sont des ensembles flous dans l'antécédent ; $Z = f(x,y)$ est une fonction nette dans le conséquent. Habituellement $f(x,y)$ est un polynôme dans les variables d'entrée x et y [130]

Une règle Sugeno fonctionne comme indiqué dans le schéma suivant

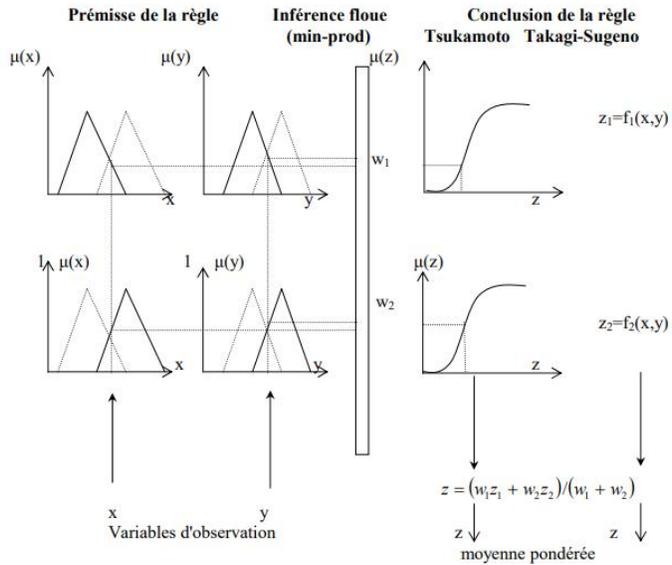


Figure V.7 Système d'inférence flou de Tsukamoto et Takagi-Sugeno Méthode [129]

V.3.2.3 D'inférence max-produit (méthode de LARSEN):

La méthode d'inférence max-produit, réalise l'opérateur «ET» par la formulation du produit. La conclusion dans chaque règle, introduite par «ALORS», est réalisée par la formation du produit. L'opérateur «OU» qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum.

Dans le but d'éclairer le principe de chaque méthode, on propose un tableau récapitulatif base sur la règle suivante : Si condition Alors conclusion

Table V-1 Synthèse des différentes méthodes d'inférence

Méthodes	Au niveau de la condition	Au niveau de la conclusion	Entre deux règles
Méthode Max - Min	ET : est réalisé par la formation du Min OU : est réalisé par la formation du Max	Alors : est réalisé par la formation du Min	OU : est réalisé par la formation du Max
Méthode Max - Prod	ET : est réalisé par la formation du Min. OU : est réalisé par la formation du Max.	Alors : est réalisé par le produit	OU : est réalisé par la formation du Max
Méthode Somme - Prod	ET : est réalisé par le produit. OU : est réalisé par la somme.	Alors : est réalisé par le produit	OU : est réalisé par la somme.

V.3.3 Interface de fuzzification

Une interface de fuzzification, qui convertit les entrées du contrôleur en informations que le mécanisme d'inférence peut facilement utiliser pour activer et appliquer des règles.[131]. Pour cela, le concepteur du système flou doit créer des fonctions d'appartenances, Les fonctions d'appartenance peuvent avoir différentes formes (Figure V.8) :

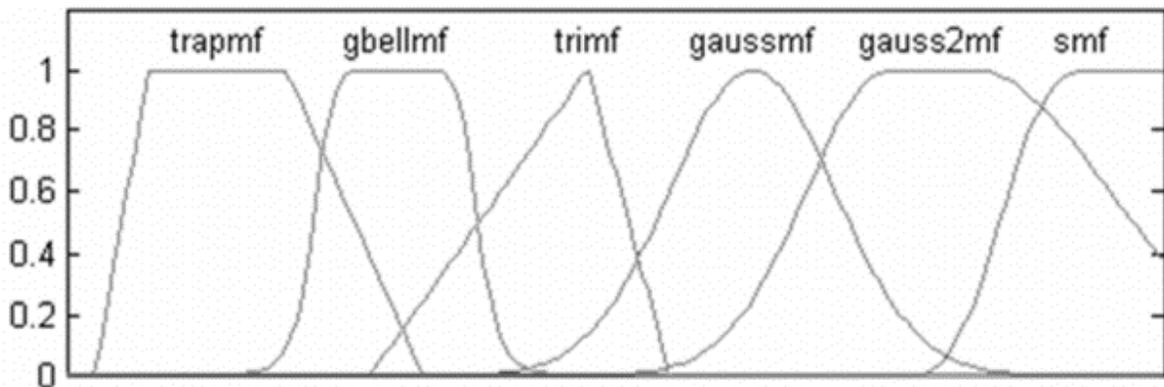


Figure V.8 : Différents types de fonctions d'appartenance utilisées

Au lieu d'appartenir à l'ensemble « vrai » ou à l'ensemble « faux » de la logique binaire traditionnelle, la logique floue admet des degrés d'appartenance à un ensemble donné. Le degré d'appartenance à un ensemble flou est matérialisé par un nombre compris entre 0 et 1. Une valeur précise de la fonction d'appartenance liée à une valeur de la variable est notée μ et appelée « facteur d'appartenance »[132].

V.3.4 Interface de défuzzification

Une interface de défuzzification, qui convertit les conclusions du mécanisme d'inférence en entrées réelles pour le processus.[126]

Plusieurs stratégies de défuzzification existent. Les plus utilisées sont :

V.3.4.1 Méthode du maximum

Comme son nom l'indique, la commande en sortie est égale à la commande ayant la fonction d'appartenance maximale.

La méthode du maximum simple, rapide et facile mais elle introduit des ambiguïtés et une discontinuité de la sortie (parfois on trouve deux valeurs maximales).

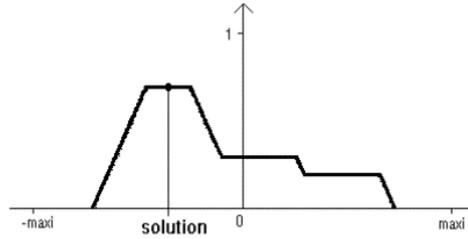


Figure V.9 méthode du maximum

V.3.4.2 Méthode de la moyenne des maxima

Elle considère, comme valeur de sortie, la moyenne de toutes les valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance issue de l'inférence est maximale.

La figure ci-dessous illustre le principe de cette méthode.

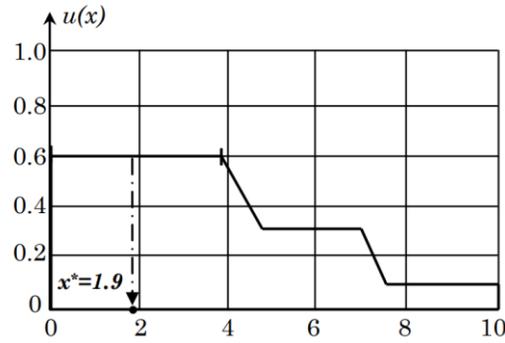


Figure V.10 : Méthode de Défuzzification par valeur maximale

V.3.4.3 La méthode de centre de gravité COG

La défuzzification par centre de gravité consiste à calculer l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante μ_r de la phase de composition selon :

$$y^* = \frac{\int y \cdot \mu_r(y) dy}{\int \mu_r(y) dy} \tag{V-7}$$

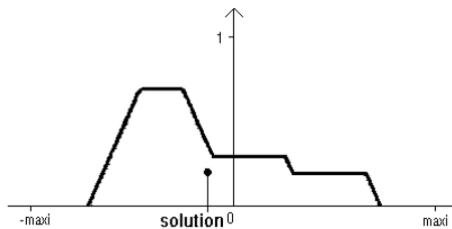


Figure V.11 méthode du centre de gravité

Nous nous sommes intéressés à cette dernière méthode à cause de sa simplicité de calculs et sa sortie unique.

V.4 Application de la logique floue au contrôle de la séparateur électrostatique

Le fonctionnement d'un contrôleur flou peut être divisé en trois étapes (Figure V.12)

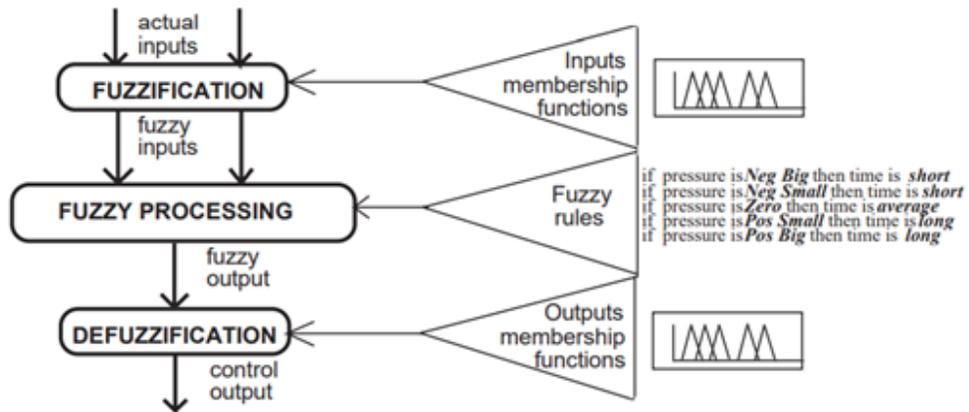


Figure V.12 : Fonctionnement d'un contrôleur flou [124]

V.4.1 Fuzzification de l'entrée

L'opération de fuzzification est assez simple. Le degré d'appartenance de chaque valeur linguistique est la valeur de vérité des propositions floues [133]. Les variables linguistiques des paramètres d'entrée sont définies comme dans le Tableau V-2 où ils présentent les différentes gammes de paramètres ainsi que leurs valeurs linguistiques.

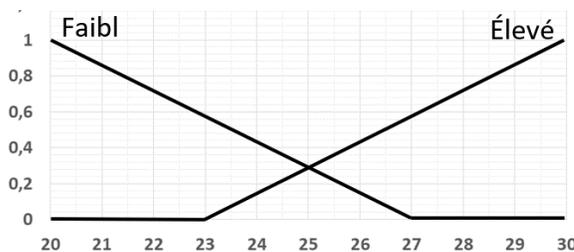
Afin de faciliter le contrôle du système, l'entrée "mixte (mi)" est segmentée en "bon", "élevé" et "très élevé", avec une considération particulière stipulant que le pourcentage moyen ne peut excéder 10 %. Dans cette plage (0-10 %), le contrôleur est plus précis. Les variables, telles que le changement en isolant (Δmi), le changement en haute tension (ΔU), et le changement en conducteur (Δmc), peuvent être subdivisées en une gamme d'états négatifs et positifs, comme illustré sur la figure V.13. Les paramètres de haute tension et de vitesse sont classifiés en deux niveaux, à savoir bas et haut.

Tableau V-2. PARAMÈTRES D'ENTRÉE

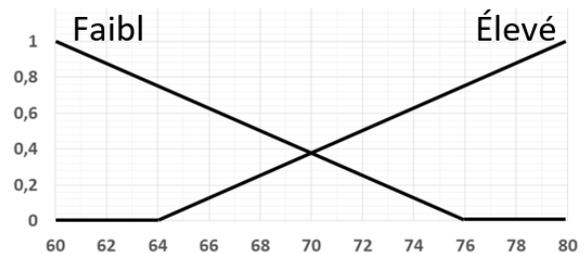
	Variables linguistiques	Symbole	Gamme	Variables linguistiques	Paramétrés
Entrée	Mixte (%)	mm	0-1	Bon	0- 0.1
				Élevé	0- 0.4
				Très élevé	0.2- 1
	Haut tension (kv)	U	20-30	Faible	20- 27
				Élevé	23- 30
	Changement en isolant	Δm_i	-1- 1	Négatif	-1- 0
				Positif	0- 1
	Changement en Haut tension	ΔU	-1 -1	Négatif	-1- 0
				Positif	0- 1
	La vitesse (Tr/min)	n	60-80	Faible	60- 76
				Élevé	64- 80
	Changement en conducteur	Δm_c	-1 -1	Négatif	-1- 0
Positif				0- 1	

Nous avons choisi pour chaque variable les formes triangulaires et trapézoïdales comme indiqué sur la figure V.13 :

Les ensembles flous sont définis par leurs fonctions d'appartenance. Il existe différents types et formes de fonctions d'appartenance d'un ensemble flou, mais il n'existe pas de méthode standard pour choisir la forme appropriée des ensembles flous des variables de contrôle. Les méthodes d'essai et d'erreur sont généralement exercées [134][135], ainsi que l'expérience professionnelle et le bon sens[124].



(a)



(b)

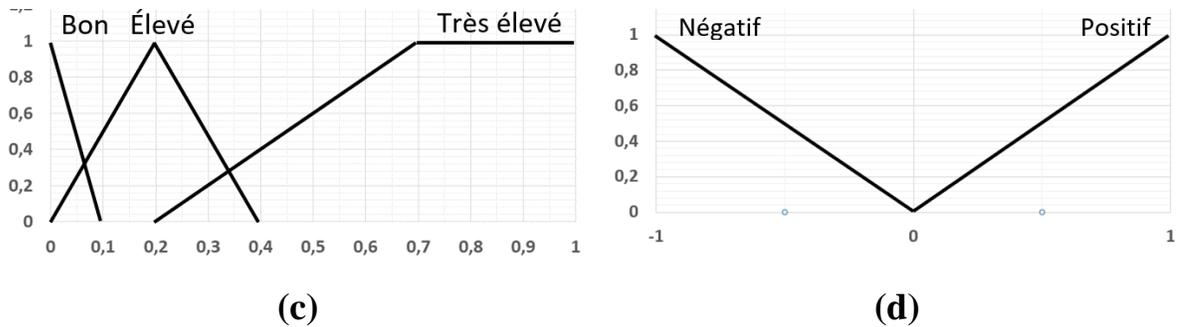


Figure V.13 : Fonctions d'appartenance d'entrée : (a) la haute tension. (b) la vitesse. (c) Pourcentage de mixte (mm). (d) $\Delta U, \Delta m_i, \Delta m_c$.

V.4.2 Règles d'inférence

Les systèmes basés sur la logique floue utilisent les connaissances humaines présentées sous la forme de règles floues, également appelées règles d'inférence, pour prendre des décisions. Chaque règle délivre une conclusion partielle qui est ensuite agrégée avec les autres règles pour fournir une conclusion [136].

Les règles d'inférence ont été extraites pour la haute tension et la vitesse, de manière concise et précise. Toutes les règles considérées comme non pertinentes ou dépourvues de signification ont été négligées, en se basant sur la base de connaissances construite au chapitre trois.

Règles d'inférence

La Haute tension

- Règle 1 : SI (mm est très élevé) et (U est faible) alors (U est forte incrément)
- Règle 2 : SI (mm est très élevé) et (U est élevé) alors (U est Forte décrément)
- Règle 3 : SI (mm est élevé) et (U est élevé) alors (U est faible décrément)
- Règle 4 : SI (mm est élevé) et (U est faible) alors (U est faible incrément)
- Règle 5 : SI (mm est bon) et (ΔU est positif) et (Δm_i est négatif) alors (U est faible incrément)
- Règle 6 : SI (mm est bon) et (ΔU est positif) et (Δm_i est positif) alors (U est faible-diminue)
- Règle 7 : SI (mm est bon) et (ΔU est négatif) et (Δm_i est positif) alors (U est Faible incrément)
- Règle 8 : SI (mm est bon) et (ΔU est négatif) et (Δm_i est négatif) alors (U est faible-diminue)

La vitesse.

- Règle 1 : SI (mm est très élevé) et (n est élevé) alors (n est décrémentation)
- Règle 2 : SI (mm est élevé) et (n est élevé) alors (n est décrémentation)
- Règle 3 : SI (mm est bon) et (n est faible) alors (n est incrémentation)
- Règle 4 : SI (mm est bon) et (Δm_i est négatif) alors (n est décrémentation)
- Règle 5 : SI (mm est bon) et (Δm_c est positif) alors (n est incrémentation)

V.4.3 Défuzzification

Dans le processus de défuzzification, la variable de sortie floue est convertie en une variable nette afin de servir l'objectif de contrôle. En général, la sortie défuzzifiée est supposée représenter la solution la plus appropriée. Deux mécanismes fréquemment employés sont la méthode des maxima, qui identifie le pic le plus élevé, et la méthode du centre de gravité (COG), qui repose sur la détermination du point d'équilibre d'une propriété [126]. Pour cette étude spécifique, l'approche adoptée est celle du centroïde (COG).

De manière similaire à la définition des entrées, les variables linguistiques des sorties sont établies conformément au tableau V-3. La variable de haute tension est subdivisée en catégories de Forte Décrémentation, Faible Décrémentation, Faible Incrémentation et Forte Incrémentation, dans le but d'améliorer la fluidité et la précision du contrôle. Pour la vitesse de rotation de tambour, elle est classifiée en deux catégories, Incrémentation et Décrémentation. Le diagramme présenté dans la figure V.14 expose les fonctions d'appartenance associées à la variable de sortie du contrôleur flou.

Table V-3. OUTPUT PARAMETERS

	Variables	Symbol e	Gamme	Variables linguistiques	Paramétrés
Les sorties	Tension	U	-5 -5	Forte décrémentation	-4 -3
				Faible décrémentation	-1- 0
				Faible incrémentation	0- 1
				Forte incrémentation	3.5 – 4.5
	Vitesse	n	-5 -5	Décrémentation	-4- 2
				Incrémentation	2- 4

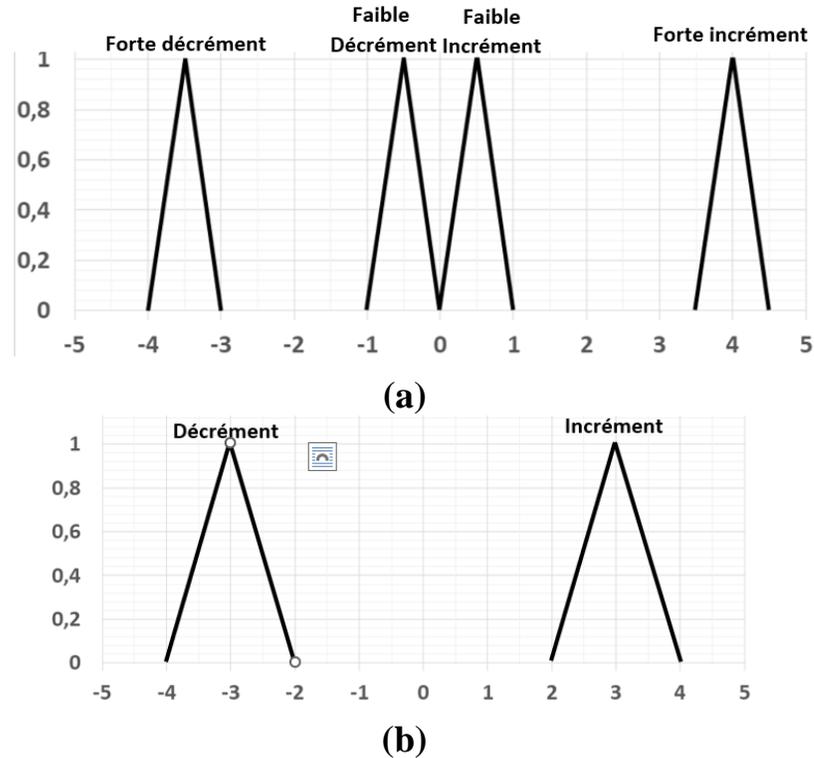


Figure V.14 Fonction d'appartenance de sorties : (a) contrôle de la haute tension (b). contrôle de la vitesse.

V.5 Mécanisme d'application du contrôle flou au séparateur électrostatique.

L'utilisation de la puissance de calcul des outils informatiques a très vite favorisé l'usage des simulations, et de manière plus large celui des modélisations numériques qui permettent de reproduire par calculs, les comportements physiques de dispositifs réels soumis à des conditions particulières. Ainsi, à chaque système réel étudié, on fait correspondre un équivalent virtuel dont les qualités intrinsèques sont infiniment plus avantageuses et qui peut être modifié à volonté, au gré de l'expérimentateur [137].

Avant d'appliquer concrètement le contrôleur flou à une installation réelle, une étape préalable consiste à effectuer une simulation sur un modèle du séparateur à cylindre tournant présenté dans le chapitre trois. Cette démarche s'inscrit dans la perspective d'appréhender et d'affiner le fonctionnement du contrôleur dans un environnement virtuel avant de le déployer sur une infrastructure industrielle réelle.

Le système démarre avec les valeurs initiales aléatoire de la tension U_0 , la vitesse n_0 et le débit m à l'instant initial (cycle 0), le contrôleur flou (FLC) analyse les sorties et ajuste les entrées (U, n) par incrément ou décrémentation selon la situation, atteignant même la valeur optimale, où au cycle 1 :

$$U_1 = U_0 + x_1 \text{ et } n_1 = n_0 + y_1 . \tag{ V-8}$$

En général

$$U_i = U_{i-1} + x_i \text{ et } n_i = n_{i-1} + y_i . \tag{ V-9}$$

Où x et y représentent la sortie du (FLC) de la haute tension et de la vitesse du tambour respectivement et i est le compteur de cycles.

La figure V.15 montre le schéma synoptique du système de contrôle flou au séparateur électrostatique.

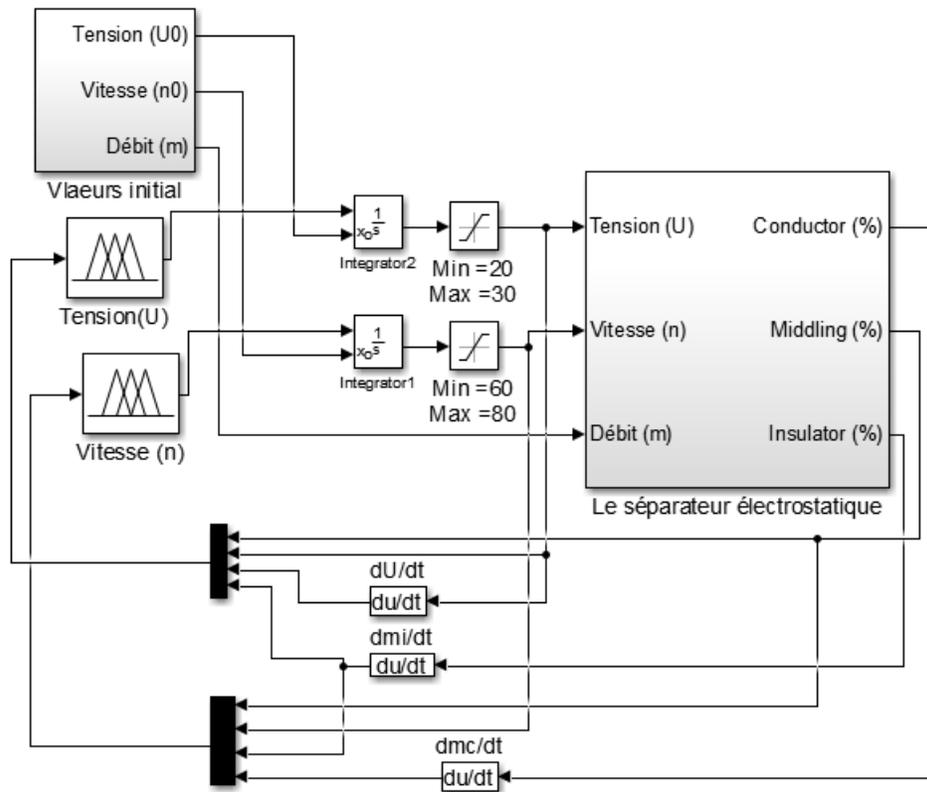


Figure V.15 Schéma fonctionnel du système de contrôle flou d'un séparateur électrostatique

V.6 Résultats de la simulation et discussion

Le résultat de la première simulation, illustré à la Figure V.16, montre que nous avons uniquement contrôlé la valeur de la haute tension tout en manipulant le débit, avec une vitesse fixée à 60 tr/min. Le contrôleur flou a réussi à optimiser le système en huit cycles, maximisant la récupération de l'isolant à 74,7%, équivalant à 99,6%, et minimisant la fraction mixte à 1,3%, à une haute tension $U=26,5KV$. Cependant, cela n'a eu aucun impact significatif sur la récupération

du conducteur, étant donné que le pourcentage total du produit isolant est de 75% et celui du produit conducteur est de 25%.

Cependant, l'augmentation de la valeur du débit m a affecté négativement à la fois la récupération du conducteur et le Mixte, mais sans impact significatif sur le produit isolant. Nous avons également remarqué que la haute tension U n'interagissait pas avec l'augmentation du débit m .

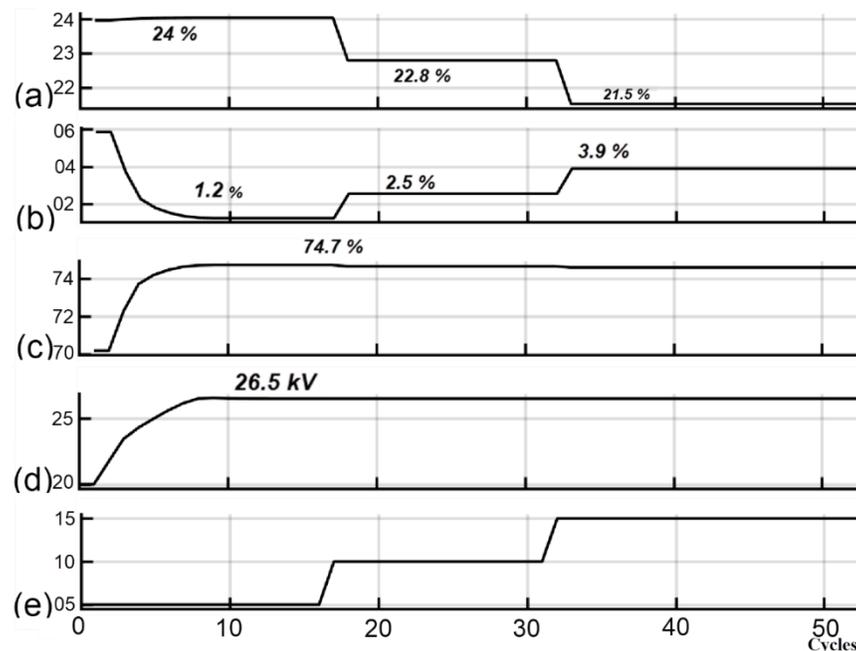


Figure V.16 Résultats de la simulation du fonctionnement du contrôleur flou avec n fixé à 60 tr/min. (a) la variation du pourcentage du produit conducteur. (b) La variation du pourcentage du produit Mixte. (c) La variation du pourcentage du produit isolant. (d) Réglage de la tension appliquée. (e) Valeur de débit.

V.6.1 Étudier la réponse du système en contrôlant deux variables avec distorsion intentionnelle

La deuxième simulation de la figure V.17 vise à contrôler à la fois la vitesse et la haute tension, et montre la réaction du contrôleur flou à différentes valeurs de débit avec une perturbation artificielle sur la haute tension au cycle 32 et sur la vitesse au cycle 42.

À travers la figure V.17, nous remarquons que le FLC a mis huit cycles pour régler la haute tension, tandis qu'il a fallu 14 cycles pour régler la vitesse. En ce qui concerne l'interaction du FLC avec différentes valeurs de débit, nous remarquons que le FLC a maintenu la valeur optimale pour la haute tension constante, tandis que la vitesse a diminué à mesure que la valeur de débit m

augmentait, afin de minimiser l'impact négatif de l'augmentation de débit sur le Mixte, mais sans effet notable sur la récupération du conducteur. Les résultats complets sont indiqués dans le tableau V-4.

Tableau V-4. Résultats de la simulation du fonctionnement du contrôleur flou.

	M=5 Kg/h	M=10 Kg/h	M=15 Kg/h
Conducteur %	25 (100%)	24.3 (97.2 %)	23.5 (94 %)
Mixte %	3.1	4.3	5.4
Isolant %	71.7 (95.6 %)	71.3 (95 %)	71 (94.7%)
Haut tension (Kv)	26.5	26.5	26.5
Vitesse (rev/min)	73.5	72.5	71.6

Par rapport aux résultats précédents de la figure V.16 avec une valeur fixe de la vitesse du tambour ($n = 60$ tr/min) et à travers le résultat enregistré de la figure V.17, nous avons remarqué une augmentation du pourcentage du mixte et de conducteur et une diminution de l'isolant d'autre part. Cela est dû à la stratégie adoptée au contrôle, considérant que la récupération du conducteur et la pureté d'isolant comme prioritaires.

Au cycle 32, nous avons perturbé la haute tension en injectant 3 kV par rapport à la valeur stable ($U = 26,5$ kV). Nous avons enregistré une réaction rapide du FLC, nécessitant trois cycles pour ajuster à nouveau la valeur optimale de la haute tension. De plus, la valeur de la vitesse a été temporairement diminuée pour s'adapter à la nouvelle situation, car cette perturbation a entraîné une diminution du taux de récupération d'isolant et une augmentation du taux de Mixte. C'est ce qui a incité le régulateur de vitesse à réagir de cette manière.

De même, au cycle 42, nous avons perturbé la vitesse en ajoutant 2 tr/min à la valeur optimale. Le FLC a rapidement ajusté la valeur optimale de la vitesse au cycle suivant (cycle 43). Cependant, nous n'avons observé aucun changement dans la valeur de la haute tension, car la valeur enregistrée représente l'optimum dans tous les cas. Toute augmentation ou diminution de la valeur de la haute tension aurait un impact négatif sur le processus de séparation.

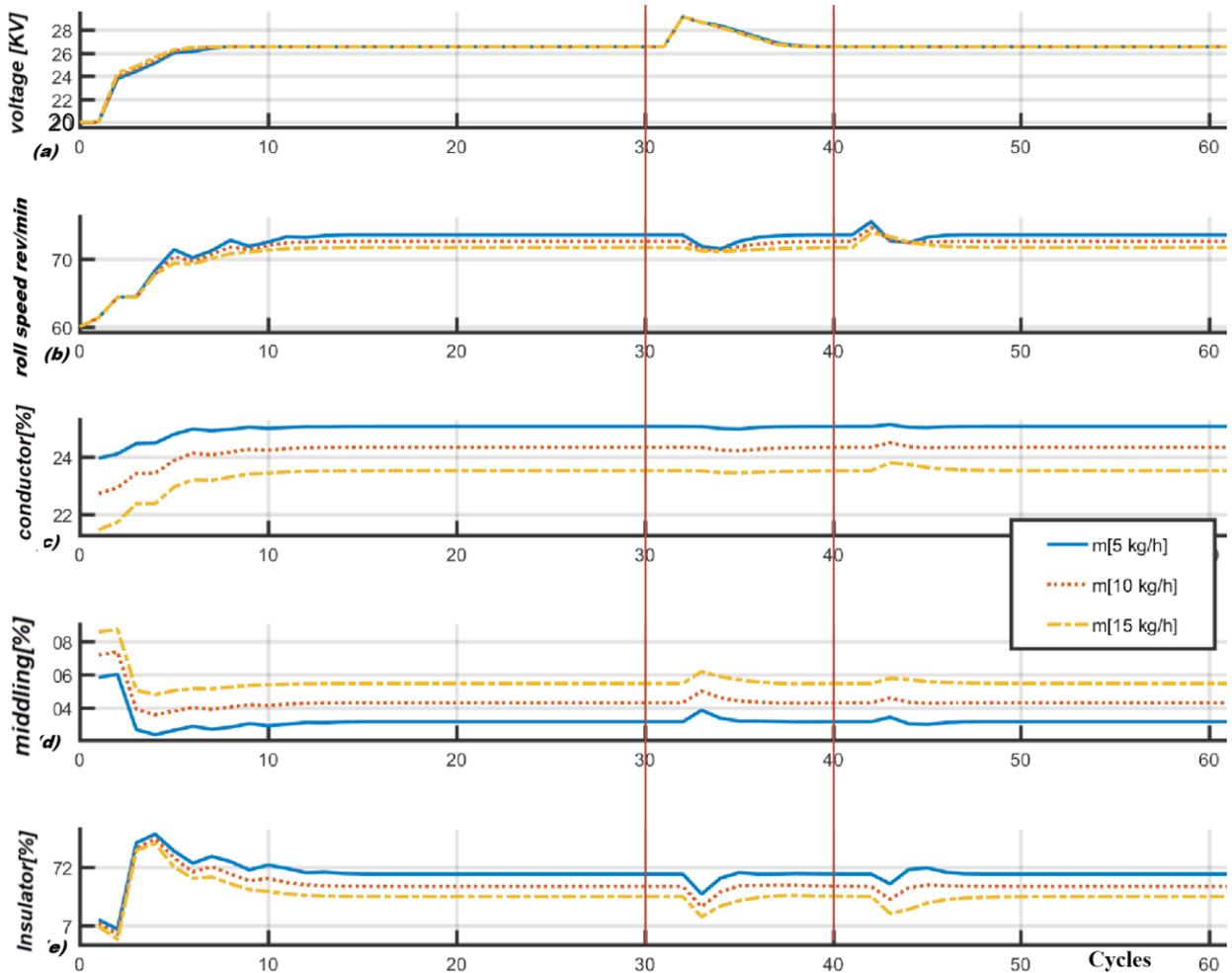


Figure V.17. Résultats de la simulation du fonctionnement du contrôleur flou. (a) Réglage de la tension appliquée. (b) Réglage de la vitesse du tambour. (c) La variation du pourcentage du produit conducteur. (d) La variation du pourcentage du produit Mixte. (e) La variation du pourcentage du produit isolant.

V.6.2 Étudier la réponse du système en contrôlant deux variables avec distorsion intentionnelle en même temp.

Pour évaluer la robustesse du système de contrôle flou, une autre simulation a été réalisée impliquant une distorsion simultanée des variables de tension et de vitesse de trois degrés au cycle 51, tout en maintenant un débit constant de 10 kg/h (Figure V.18 (c)).

Cette perturbation a eu un impact négatif sur le processus de séparation au cycle 52. Durant cette période, le pourcentage de produit isolant a diminué de 70.9 à 70.7 %, le pourcentage de produit conducteur est passé de 24.9 à 24.5 %, et le pourcentage de produit mixte a augmenté de 4.2 à 4.8 % (voire figure V.19). Au cours du cycle 52, le contrôleur flou de la tension a réagi à ce changement en augmentant la valeur de tension de 3.4 KV, comme illustré dans la figure V.18 (a).

Cette réaction correspond à la règle n°1 des Règles d'inférence de la haute tension, similaire à ce qui s'était produit au début du fonctionnement du système. Cependant, cette augmentation a entraîné une diminution accrue du pourcentage de produit isolant, ce qui a conduit à l'application de la règle n°5. Par conséquent, la haute tension a diminué progressivement conformément à la règle n°8. Ce processus s'est poursuivi jusqu'à ce que le point optimal soit atteint au cycle 58.

En raison de perturbations au cycle 51, la vitesse a varié de 72.6 à 69.7 (figure V.19(b)), avec une baisse du pourcentage de produit conducteur de 24.9 à 24.5 % (figure V.19(c)). Le contrôleur flou de vitesse a réagi en augmentant la valeur de la vitesse de 1.5 Tr/min au cours de ce cycle, comme illustré dans la Figure V.18 (b), portant la valeur de la vitesse à 73.7 Tr/min au cycle 52. Cette augmentation visait à compenser la diminution du pourcentage de produit conducteur, mais elle a également entraîné une augmentation du pourcentage du produit mixte. Au cycle 53, le contrôleur flou a entrepris une réduction progressive de la vitesse par petites valeurs, cette diminution s'étendant jusqu'au cycle 57. Cette correction n'a eu aucun effet significatif sur le pourcentage de produit conducteur, le maintenant à 24.9%, correspondant au point optimal précédent, avec une légère réduction du pourcentage de produit mixte de 4.8% à 4.4%. Notons que cette réduction a également été influencée par l'ajustement de la tension.

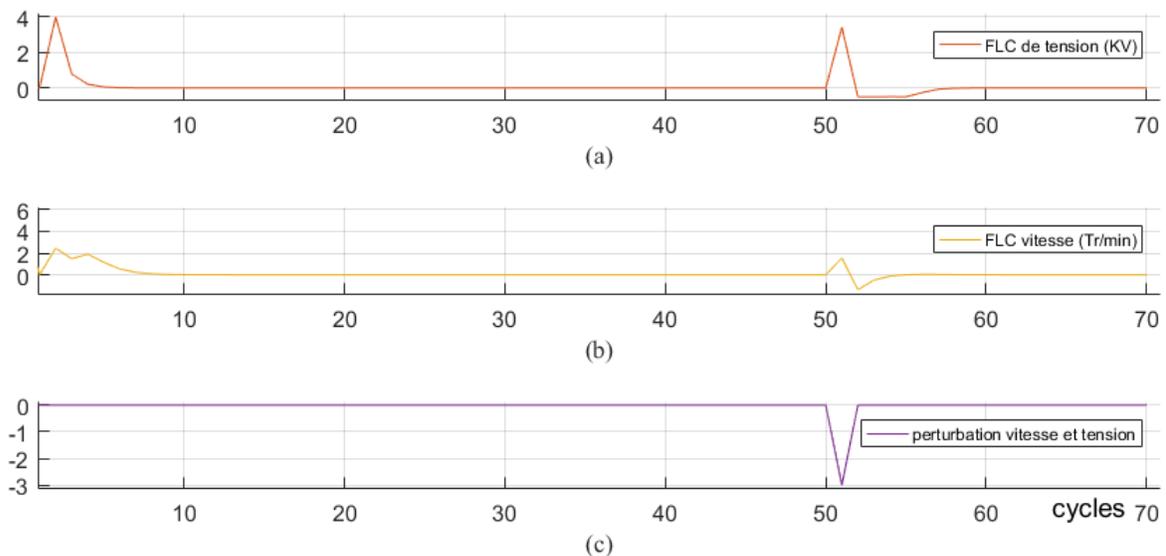


Figure V.18 : Les valeurs générées par le contrôleur flou dans différentes situations. (a) Contrôleur flou de la tension, (b) Contrôleur flou de la vitesse, (c) Signal de perturbation.

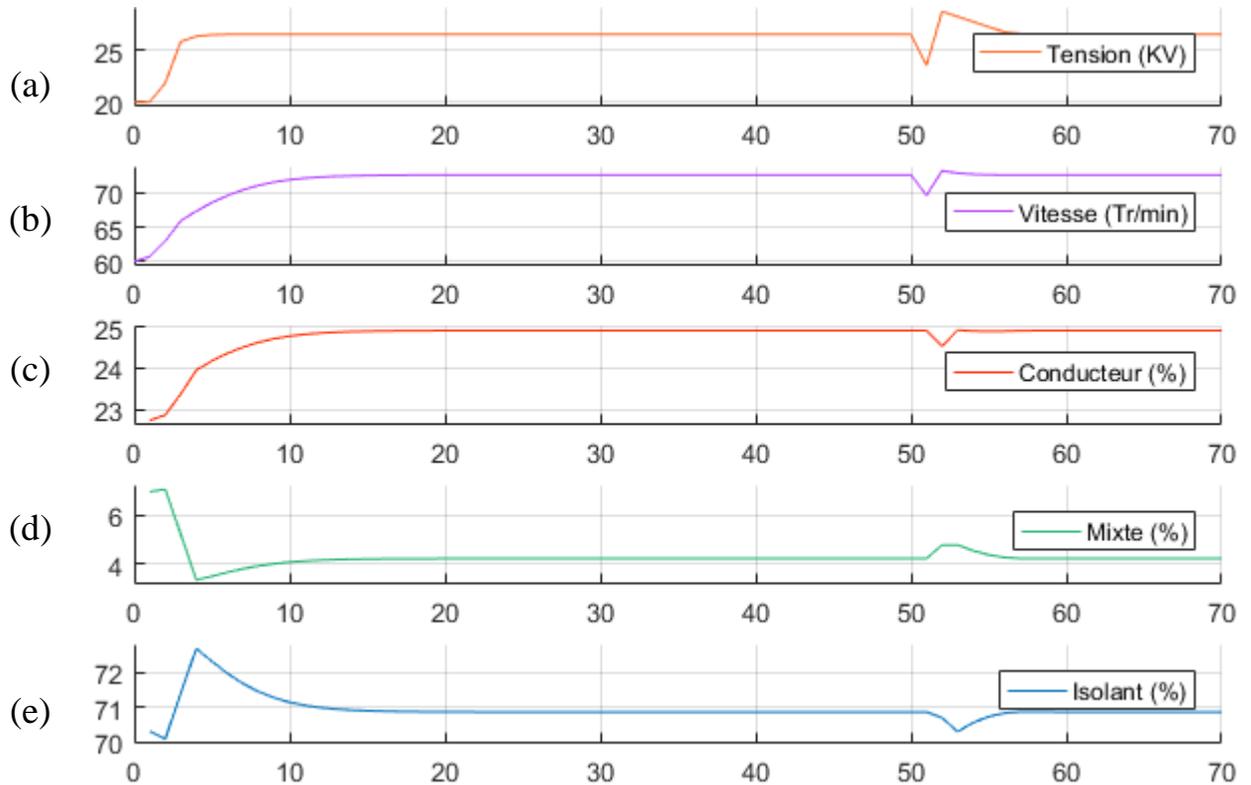


Figure V.19 : Résultat de la simulation du régulateur flou avec une distorsion intentionnelle de la tension et de la vitesse simultanément, ainsi qu'un débit initial $m = 10 \text{ kg/min}$. (a) Réglage de la tension appliquée. (b) Réglage de la vitesse du tambour. (c) La variation du pourcentage du produit conducteur. (d) La variation du pourcentage du produit Mixte. (e) La variation du pourcentage du produit isolant.

V.7 Conclusion

Les contrôleurs flous pourraient représenter une solution appropriée pour optimiser des processus électrostatiques aussi complexes que la séparation de solides granulaires. L'expertise dans le domaine de la séparation électrostatique est un prérequis pour définir les fonctions d'appartenance et les règles d'inférence sur lesquelles repose la conception d'un tel contrôleur.

Les résultats de simulation ont été satisfaisants, car ils ont été cohérents avec les résultats d'amélioration mentionnés dans le quatrième chapitre, en particulier en ce qui concerne les résultats de haute tension. Cependant, les résultats de vitesse ont été variables en fonction de la volonté du contrôleur et de son choix de privilégier soit le conducteur soit le mixte. Cependant, il est intéressant de noter que le contrôleur flou a été en mesure de gérer efficacement les perturbations artificielles et de revenir à la valeur optimale, ce qui témoigne de sa robustesse et de sa capacité à s'adapter à des situations variables. Il semble que le contrôleur soit donc une solution viable et durable pour ce système.

Si des simulations numériques ont prouvé la faisabilité des contrôleurs flous, leur efficacité reste à démontrer par des investigations expérimentales sur des processus réels de séparation électrostatique. Cependant, compte tenu de la disponibilité des dispositifs de pondération continue « en ligne » et de la simplicité de leur interfaçage avec un régulateur numérique, il est attendu qu'aucune difficulté n'entrave l'application industrielle de tels régulateurs.

Conclusion générale

Dans cette étude, nous avons élaboré un contrôleur intelligent visant à optimiser les performances d'un séparateur électrostatique. Cette optimisation se traduit par la réduction du pourcentage de produit mixte, l'augmentation des proportions de produits isolants et conducteurs, tout en préservant la pureté des produits récupérés. Dès le début de cette recherche, nous avons mis en évidence l'importance cruciale du recyclage des Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE) sur les plans environnemental, sanitaire, et économique, conférant ainsi une pertinence significative à nos travaux. En outre, nous avons examiné en détail les techniques de séparation électrostatique, présentant les séparateurs électrostatiques les plus pertinents dans la recherche, tels que la séparation Conducteur/Conducteur, Conducteur/Isolant et Isolant/Isolant. Cette technologie a démontré son efficacité dans le recyclage des DEEE, sans induire d'effets secondaires néfastes sur l'environnement. Ces avancées visent à contribuer de manière significative à l'amélioration des pratiques de recyclage et à la promotion d'une gestion durable des déchets électroniques.

Dans cette étude, nous avons entrepris la modélisation d'un séparateur électrostatique à cylindre tournant en utilisant la méthode des plans d'expérience. Cette approche a procuré une compréhension approfondie du fonctionnement du séparateur, permettant ainsi d'évaluer l'impact des paramètres sélectionnés sur la réponse ainsi que les interactions entre ces paramètres. Ces analyses ont jeté les bases d'une connaissance solide, renforçant notre compréhension des mécanismes sous-jacents du séparateur électrostatique à cylindre tournant. Ces investigations nous ont également conduit à la conclusion que les connaissances théoriques sur le séparateur électrostatique peuvent être insuffisantes ou trompeuses en raison des différences de configuration entre les séparateurs, ainsi que du grand nombre d'influences sur la réponse. Par conséquent, il est peu fiable de s'appuyer exclusivement sur des études antérieures du même type, même pour le même séparateur électrostatique, si l'intervalle de variables diffère. Ces constats soulignent l'importance cruciale de la prise en compte des spécificités de chaque configuration de séparateur électrostatique lors de l'interprétation des résultats et du développement de modèles prédictifs.

La séparation électrostatique étant un processus multi-objectifs, nous avons opté pour l'utilisation de l'optimisation multi-objectifs par algorithme génétique (MOGA) afin de rechercher le point de fonctionnement optimal. Cette approche permet de générer plusieurs solutions, offrant ainsi au chercheur diverses options, contrairement à l'optimisation mono-objectif qui propose une

unique solution. Par ailleurs, le contrôle intelligent s'est révélé particulièrement efficace dans l'optimisation en temps réel, notamment en cas de perturbations du système, une capacité que MOGA ne peut pas atteindre. L'utilisation de la logique floue pour contrôler le séparateur électrostatique en vue d'améliorer le processus de séparation est particulièrement pertinente, car la logique floue est capable de traiter des données imprécises, une occurrence fréquente dans les modèles de séparateurs électrostatiques en raison de facteurs incontrôlables tels que l'humidité et la variabilité de la taille des échantillons.

Il est important de noter que l'introduction de certaines améliorations à la logique floue, telles que l'utilisation de réseaux de neurones ou d'algorithmes génétiques, peut réduire sa flexibilité et la lier de manière étroite au modèle mathématique. Cela peut entraîner une défaillance du contrôleur et limiter son application dans la réalité, en particulier lorsque les conditions diffèrent de celles de la simulation. Ainsi, un équilibre délicat doit être maintenu entre la sophistication du contrôle intelligent et sa robustesse dans des environnements variables.

Les perspectives de cette étude peuvent se concentrer sur les points suivants :

1-Mise en œuvre de la méthode de contrôle sur site : Explorer la faisabilité et l'efficacité de la mise en œuvre du contrôle intelligent sur le site réel du séparateur électrostatique, évaluant ainsi son adaptation aux conditions opérationnelles réelles.

2-Augmentation du nombre de variables contrôlées : Élargir la portée du contrôle intelligent en explorant la possibilité d'ajouter davantage de variables sous contrôle, ce qui pourrait améliorer la flexibilité et l'efficacité du processus de séparation.

3-Développement de procédés de mesure de la pureté en temps réel : Mettre en place des méthodes de mesure de la pureté en temps réel pour évaluer la qualité des produits récupérés directement à la sortie du séparateur électrostatique. Cette initiative vise à permettre un contrôle plus précis du processus de séparation, conduisant à une amélioration de la qualité des produits finaux.

4-Généralisation de la méthode de conception du contrôleur : Adapter la méthode de conception du contrôleur élaborée dans cette étude pour l'appliquer à l'ensemble des séparateurs électrostatiques, élargissant ainsi son utilité et son applicabilité.

5-Conception d'un séparateur électrostatique unifié : Travailler sur la conception d'un séparateur électrostatique unifié avec un modèle mathématique commun, visant à rendre la recherche dans ce domaine plus précise, cohérente et efficace, tout en facilitant la comparaison entre différentes configurations de séparateurs.

Référence

- [1] C. Baldé *et al.*, “National E-waste Monitor 2023 KAZAKHSTAN,” *United Nations Univ. (UNU)/United Nations Inst. Train. Res. – co-hosted SCYCLE Program. Int. Telecommun. Union Int. Solid Waste Assoc.*, pp. 1–52, 2023.
- [2] L. N. M. L.I. Blake, “Process of electrical separation of conductors from non-conductors.,” *ACM SIGGRAPH Comput. Graph.*, vol. 28, no. 2, pp. 131–134, May 1991, doi: 10.1145/178951.178972.
- [3] O. Dahou, K. Medles, S. Touhami, M. F. Boukhoulda, a. Tilmatine, and L. Dascalescu, “Application of Genetic Algorithms to the Optimization of a Roll-Type Electrostatic Separation Process,” *Ind. Appl. Soc. Annu. Meet. (IAS), 2010 IEEE*, pp. 0–3, 2010, doi: 10.1109/IAS.2010.5615645.
- [4] C. M. Anderson-Cook, “Practical Genetic Algorithms,” *J. Am. Stat. Assoc.*, vol. 100, no. 471, pp. 138–140, Sep. 2005, doi: 10.1198/jasa.2005.s45.
- [5] O. DAHOU, “Optimal control of an industrial electrostatic rotating electrode separator using artificial intelligence technics,” *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, vol. 1, no. 11, pp. 172–178, Nov. 2019, doi: 10.15199/48.2019.11.44.
- [6] K. Medles *et al.*, “Set point identification and robustness testing of electrostatic separation processes,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 3, pp. 618–626, 2007, doi: 10.1109/TIA.2007.895683.
- [7] D. C. MONTGOMERY, *Design and Analysis of Experiments*, 8th ed. New York: John Wiley & Sons, 2012.
- [8] L. Dascalescu, S. Billaud, A. Tilmatine, R. Kohnlechner, and M. Mihailescu, “Optimization of electrostatic separation processes using response surface modeling,” in *Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting (Cat. No.01CH37248)*, 2001, vol. 4, no. C, pp. 2262–2267. doi: 10.1109/IAS.2001.955939.
- [9] L. Dascalescu, A. Samuila, A. Mihalcioiu, S. Bente, and A. Tilmatine, “Robust Design of Electrostatic Separation Processes,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 3, pp. 715–720,

May 2005, doi: 10.1109/TIA.2005.847308.

- [10] K. HAMOUDA, “Développement D’un Système D’information Et D’aide À La Décision Pour L’élaboration D’un Programme De Recyclage D’équipements Électroniques En Algérie. Cas Des Micro-ordinateurs,” Thèse de Doctorat Université, Mustapha Ben Boulaid - Batna 2, 2018.
- [11] C. Baldé, F. Wang, R. Kuehr, and J. Huisman, “E-Waste Monitor 2014 Quantities, flows and resources,” *United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association*, pp. 1–80, 2014.
- [12] V. Forti *et al.*, “The Global E-waste Monitor 2020,” *United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association*, no. July, p. 120, 2020. [Online]. Available: <http://ewastemonitor.info/>
- [13] M. Goosey, “The materials of WEEE,” in *Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Handbook*, Elsevier, 2012, pp. 123–144. doi: 10.1533/9780857096333.2.123.
- [14] R. Cherrington and K. Makenji, “Mechanical methods of recycling plastics from WEEE,” in *Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Handbook*, Second Edi., Elsevier, 2019, pp. 283–310. doi: 10.1016/B978-0-08-102158-3.00010-0.
- [15] Z. Zeng, X. Huo, Y. Zhang, Z. Xiao, Y. Zhang, and X. Xu, “Lead exposure is associated with risk of impaired coagulation in preschool children from an e-waste recycling area,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 25, no. 21, pp. 20670–20679, 2018, doi: 10.1007/s11356-018-2206-9.
- [16] X. Huo, Y. Wu, L. Xu, X. Zeng, Q. Qin, and X. Xu, “Maternal urinary metabolites of PAHs and its association with adverse birth outcomes in an intensive e-waste recycling area,” *Environ. Pollut.*, vol. 245, pp. 453–461, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.envpol.2018.10.098.
- [17] F. N. Soetrisno and J. M. Delgado-Saborit, “Chronic exposure to heavy metals from informal e-waste recycling plants and children’s attention, executive function and academic performance,” *Sci. Total Environ.*, vol. 717, p. 137099, May 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137099.

- [18] O. A. Alabi, A. A. Bakare, X. Xu, B. Li, Y. Zhang, and X. Huo, “Comparative evaluation of environmental contamination and DNA damage induced by electronic-waste in Nigeria and China,” *Sci. Total Environ.*, vol. 423, pp. 62–72, Apr. 2012, doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.01.056.
- [19] X. Cong *et al.*, “Elevated biomarkers of sympatho-adrenomedullary activity linked to e-waste air pollutant exposure in preschool children,” *Environ. Int.*, vol. 115, pp. 117–126, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.envint.2018.03.011.
- [20] A. A. Amoabeng Nti *et al.*, “Effect of Particulate Matter Exposure on Respiratory Health of e-Waste Workers at Agbogbloshie, Accra, Ghana,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 17, no. 9, p. 3042, Apr. 2020, doi: 10.3390/ijerph17093042.
- [21] X. Huo, Y. Dai, T. Yang, Y. Zhang, M. Li, and X. Xu, “Decreased erythrocyte CD44 and CD58 expression link e-waste Pb toxicity to changes in erythrocyte immunity in preschool children,” *Sci. Total Environ.*, vol. 664, pp. 690–697, May 2019, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.040.
- [22] S. Decharat, “Urinary Mercury Levels Among Workers in E-waste Shops in Nakhon Si Thammarat Province, Thailand,” *J. Prev. Med. Public Heal.*, vol. 51, no. 4, pp. 196–204, Jul. 2018, doi: 10.3961/jpmp.18.049.
- [23] R. Seith, A. L. Arain, K. Nambunmee, S. D. Adar, and R. L. Neitzel, “Self-Reported Health and Metal Body Burden in an Electronic Waste Recycling Community in Northeastern Thailand,” *J. Occup. Environ. Med.*, vol. 61, no. 11, pp. 905–909, Nov. 2019, doi: 10.1097/JOM.0000000000001697.
- [24] L. Xu, X. Huo, Y. Liu, Y. Zhang, Q. Qin, and X. Xu, “Hearing loss risk and DNA methylation signatures in preschool children following lead and cadmium exposure from an electronic waste recycling area,” *Chemosphere*, vol. 246, p. 125829, May 2020, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.125829.
- [25] J.-M. Davis and Y. Garb, “A strong spatial association between e-waste burn sites and childhood lymphoma in the West Bank, Palestine,” *Int. J. Cancer*, vol. 144, no. 3, pp. 470–475, Feb. 2019, doi: 10.1002/ijc.31902.
- [26] P. J. Landrigan and L. R. Goldman, “Children’s Vulnerability To Toxic Chemicals: A

- Challenge And Opportunity To Strengthen Health And Environmental Policy,” *Health Aff.*, vol. 30, no. 5, pp. 842–850, May 2011, doi: 10.1377/hlthaff.2011.0151.
- [27] K. Grant *et al.*, “Health consequences of exposure to e-waste : a systematic review,” *Lancet Glob. Heal.*, vol. 1, no. 6, pp. e350–e361, doi: 10.1016/S2214-109X(13)70101-3.
- [28] Q. Song and J. Li, “A review on human health consequences of metals exposure to e-waste in China,” *Environ. Pollut.*, vol. 196, pp. 450–461, 2015, doi: 10.1016/j.envpol.2014.11.004.
- [29] X. Zeng, X. Xu, Q. Qin, K. Ye, W. Wu, and X. Huo, “Heavy metal exposure has adverse effects on the growth and development of preschool children,” *Environ. Geochem. Health*, 2018, doi: 10.1007/s10653-018-0114-z.
- [30] A. Sepúlveda *et al.*, “A review of the environmental fate and effects of hazardous substances released from electrical and electronic equipments during recycling : Examples from China and India,” *Environ. Impact Assess. Rev.*, vol. 30, no. 1, pp. 28–41, 2010, doi: 10.1016/j.eiar.2009.04.001.
- [31] “Déchets spéciaux et spéciaux dangereux | Agence Nationale des Déchets.” <https://and.dz/indicateur-dechets-dangereux/> (accessed May 01, 2023).
- [32] A. N. des Déchets, “Rapport sur l’état de la gestion des déchets en algérie,” 2020.
- [33] Agence Nationale des Déchets, “Fiche signalétique : Déchets d ’ Equipements Electriques et Electroniques (D3E).” [Online]. Available: <https://and.dz/site/wp-content/uploads/DEEE.pdf>
- [34] M. Wagner, C.P. Baldé, V. Luda, I. C. Nnorom, R. Kuehr, and G. Iattoni, “REGIONAL E-WASTE MONITOR for Latin-America, results for the 13 countries participating in project UNIDO-GEF 5554 2022,” pp. 1–274, 2022, [Online]. Available: https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2022/01/REM_LATAM_2022_ENG_Final.pdf
- [35] G. Iattoni, E. Vermeersch, I. C. Nnorom, and R. Kuehr, “REGIONAL E-WASTE MONITOR for the Arab States,” *United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association*, 2021.

- [36] People's Democratic Republic of Algeria, "Loi n° 01-19 du 27 Ramadhan 1422 correspondant au 12 décembre 2001 relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets," p. 9, 2001, [Online]. Available: http://www.mem-algeria.org/fr/legis/environ_n01-19.pdf
- [37] I. Bereketli, M. Erol Genevois, Y. Esra Albayrak, and M. Ozyol, "WEEE treatment strategies' evaluation using fuzzy LINMAP method," *Expert Syst. Appl.*, vol. 38, no. 1, pp. 71–79, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.eswa.2010.06.015.
- [38] H. M. Veit and A. M. Bernardes, *Electronic Waste*. Cham: Springer International Publishing, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-15714-6.
- [39] W. HE *et al.*, "WEEE recovery strategies and the WEEE treatment status in China," *J. Hazard. Mater.*, vol. 136, no. 3, pp. 502–512, Aug. 2006, doi: 10.1016/j.jhazmat.2006.04.060.
- [40] F. Arslan, C. Celik, and C. Arslan, "Recycling of waste electrical cables," *Mater. Sci. Eng. Int. J.*, vol. 3, no. 4, pp. 107–111, 2019, doi: 10.15406/mseij.2019.03.00099.
- [41] J. Bachér, L. Rintala, and M. Horttanainen, "The effect of crusher type on printed circuit board assemblies' liberation and dust generation from waste mobile phones," *Miner. Eng.*, vol. 185, no. February, pp. 1–11, 2022, doi: 10.1016/j.mineng.2022.107674.
- [42] H. Masuda, K. Higashitani, and H. Yoshida, Eds., *Powder Technology: Fundamentals of Particles, Powder Beds, and Particle ...* CRC Press, 2006. doi: 10.1201/9781420044133.
- [43] A. C. Kasper, "CARACTERIZAÇÃO E RECICLAGEM DE MATERIAIS PRESENTES EM SUCATAS DE TELEFONES CELULARES," Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre-RS, 2011.
- [44] L. Dascalescu, T. Zegloul, and A. Iuga, "Electrostatic Separation of Metals and Plastics From Waste Electrical and Electronic Equipment," in *WEEE Recycling*, Elsevier, 2016, pp. 75–106. doi: 10.1016/B978-0-12-803363-0.00004-3.
- [45] M. Kaya, "Current WEEE recycling solutions," in *Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling*, Elsevier, 2018, pp. 33–93. doi: 10.1016/B978-0-08-102057-9.00003-2.

- [46] A. Tilmatine, “Etude et réalisation d’un séparateur électrostatique des mélanges granulaires,” Thèse de doctorat, Université de Sidi Bel-Abbès, 2004.
- [47] E. G. Kelly and D. J. Spottiwood, “The theory of electrostatic separations: A review part II. Particle charging,” *Miner. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 193–205, Jan. 1989, doi: 10.1016/0892-6875(89)90040-X.
- [48] W. D. Greason, “Investigation of a test methodology for triboelectrification,” *J. Electrostat.*, vol. 49, no. 3–4, pp. 245–256, Aug. 2000, doi: 10.1016/S0304-3886(00)00013-9.
- [49] A. Iuga, A. Samuila, R. Morar, M. Bilici, and L. Dascalescu, “Tribocharging techniques for the electrostatic separation of granular plastics from waste electric and electronic equipment,” *Part. Sci. Technol.*, vol. 34, no. 1, pp. 45–54, Jan. 2016, doi: 10.1080/02726351.2015.1043675.
- [50] H. Zou *et al.*, “Quantifying the triboelectric series,” *Nat. Commun.*, vol. 10, no. 1, p. 1427, Mar. 2019, doi: 10.1038/s41467-019-09461-x.
- [51] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami, and L. Dascalescu, “Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials,” *J. Electrostat.*, vol. 69, no. 6, pp. 631–637, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.elstat.2011.08.010.
- [52] G. Dodbiba, J. Sadaki, K. Okaya, A. Shibayama, and T. Fujita, “The use of air tabling and triboelectric separation for separating a mixture of three plastics,” *Miner. Eng.*, vol. 18, no. 15, pp. 1350–1360, Dec. 2005, doi: 10.1016/j.mineng.2005.02.015.
- [53] I. E. ACHOURI, “Modélisation du fonctionnement optimal des filtres et séparateurs électrostatiques des matériaux poudreux,” Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas - Setif1, 2019.
- [54] M. Radjaa, “Etude d’un procédé de séparation d’un mélange de particules isolantes issues de plusieurs matériaux,” Thèse De Doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes, 2018.
- [55] N. Abdelkader, “Etude et exploitation des charges électriques dans les procédés électrostatiques,” these de doctorat, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2019.
- [56] M. Rezoug, R. Ouiddir, W. Aksa, K. Medles, M. Bilici, and L. Dascalescu, “Tribo-aero-

- electrostatic separator for ternary mixtures of granular plastics,” in *2013 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Oct. 2013, vol. 51, no. 2, pp. 1–6. doi: 10.1109/IAS.2013.6682452.
- [57] S. Messal, “Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l’industrie agro-alimentaire,” Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2016.
- [58] J.-S. Chang, P. A. Lawless, and T. Yamamoto, “Corona discharge processes,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 19, no. 6, pp. 1152–1166, 1991, doi: 10.1109/27.125038.
- [59] M. S. Bendilmi, “Étude expérimentale de la décharge couronne multi-pointes pour applications à la modification de surfaces des matériaux diélectriques et à la séparation électrostatique,” these de doctorat, Université de Poitiers, 2023.
- [60] Govi, “Quelques expériences sur l’induction électrostatique,” *J. Phys. Théorique Appliquée*, vol. 4, no. 1, pp. 264–266, 1875, doi: 10.1051/jphystap:018750040026401.
- [61] G. Richard, “Étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires,” Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2018.
- [62] S. Touhami, “Etude et mise au point des stratégies et des systèmes de contrôle destinés au pilotage des processus de séparation électrostatique,” Thèse De Doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes, 2016.
- [63] A. Benabboun, A. Tilmatine, Y. Brahami, S.-E. E. Bendimerad, M. Miloudi, and K. Medles, “Experimental Investigation of Electrostatic Separators of Plastic Particles using Different Charging Devices,” *Sep. Sci. Technol.*, vol. 49, no. 3, pp. 464–468, Feb. 2014, doi: 10.1080/01496395.2013.843008.
- [64] R. K. Dwari and K. Hanumantha Rao, “Fine coal preparation using novel tribo-electrostatic separator,” *Miner. Eng.*, vol. 22, no. 2, pp. 119–127, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.mineng.2008.05.009.
- [65] L. Calin, A. Mihalcioiu, A. Iuga, and L. Dascalescu, “Fluidized Bed Device for Plastic Granules Triboelectrification,” *Part. Sci. Technol.*, vol. 25, no. 2, pp. 205–211, Apr. 2007, doi: 10.1080/02726350701257782.

- [66] M. Y. Ha, C. H. Jeon, D. S. Choi, and H. J. Choi, "A numerical study on the triboelectrostatic separation of PVC materials from mixed plastics for waste plastic recycling," *KSME Int. J.*, vol. 17, no. 10, pp. 1485–1495, 2003, doi: 10.1007/BF02982328.
- [67] H.-S. Jeon, C.-H. Park, B.-G. Cho, and J.-K. Park, "Separation of PVC and Rubber from Covering Plastics in Communication Cable Scrap by Tribo-Charging," *Sep. Sci. Technol.*, vol. 44, no. 1, pp. 190–202, Jan. 2009, doi: 10.1080/01614940802286040.
- [68] I. I. INCULET, G. S. P. CASTLE, and J. D. BROWN, "ELECTROSTATIC SEPARATION OF PLASTICS FOR RECYCLING," *Part. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 91–100, Jan. 1998, doi: 10.1080/02726359808906787.
- [69] A. Tilmatine, K. Medles, S. E. Bendimerad, F. Boukholda, and L. Dascalescu, "Electrostatic separators of particles: Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 1, pp. 228–232, 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.06.008.
- [70] A. Iuga, L. Calin, V. Neamtu, A. Mihalcioiu, and L. Dascalescu, "Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device," *J. Electrostat.*, vol. 63, no. 6–10, pp. 937–942, Jun. 2005, doi: 10.1016/j.elstat.2005.03.064.
- [71] W. Aksa, K. Medles, M. Rezoug, M. F. Boukhoulda, M. Bilici, and L. Dascalescu, "Two stage electrostatic separator for the recycling of plastics from waste electrical and electronic equipment," *J. Electrostat.*, vol. 71, no. 4, pp. 681–688, 2013, doi: 10.1016/j.elstat.2013.03.009.
- [72] B. M. Fodil, M. Karim, M. Mohamed, T. Amar, B. Abdelber, and L. Dascalescu, "Effect of ambient humidity on the outcome of electrostatic separation process for mixed granular polymers," in *2013 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Oct. 2013, pp. 1–5. doi: 10.1109/IAS.2013.6682467.
- [73] A. Mekhalef, K. Medles, M. F. Boukhoulda, A. Tilmatine, S. Messal, and L. Dascalescu, "Study of a tribo-aero-electrostatic separator for mixtures of micronized insulating materials," in *2014 IEEE Industry Application Society Annual Meeting*, Oct. 2014, pp. 1–7. doi: 10.1109/IAS.2014.6978351.
- [74] Y. Brahami, A. Tilmatine, R. Ouiddir, A. Bendaoud, K. Medles, and L. Dascalescu,

- “Experimental Modeling of a New Triboelectrostatic Separation Process for Micronized Plastics,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 5, pp. 4145–4150, 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2421285.
- [75] S. Das, K. Medles, M. Younes, C. Dragan, and L. Dascalescu, “Separation of Fine Granular Mixtures in S-Plate-Type Electrostatic Separators,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 5, pp. 1137–1143, 2007, doi: 10.1109/TIA.2007.904359.
- [76] A. IUGA, S. VLAD, M. MIHAILESCU, and L. DASCALESCU, “A Laboratory Plate/Screen-Type Electrostatic Separator for Granular Mixtures: Design, Engineering, and Application,” *Part. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 3, pp. 275–283, Jul. 2004, doi: 10.1080/02726350490501600.
- [77] L. DASCALESCU, R. MORAR, A. IUGA, A. SAMUILA, and V. NEAMTU, “Electrostatic Separation Of Insulating And Conductive Particles From Granular Mixes,” *Part. Sci. Technol.*, vol. 16, no. 1, pp. 25–42, Jan. 1998, doi: 10.1080/02726359808906782.
- [78] S. Touhami, K. Medles, O. Dahou, A. Tilmatine, A. Bendaoud, and L. Dascalescu, “Modeling and Optimization of a Roll-Type Electrostatic Separation Process Using Artificial Neural Networks,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 4, pp. 1773–1780, Jul. 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2256451.
- [79] J. Li, Z. Xu, and Y. Zhou, “Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals and nonmetals from crushed particles of waste printed circuit boards,” *J. Electrostat.*, vol. 65, no. 4, pp. 233–238, 2007, doi: 10.1016/j.elstat.2006.08.004.
- [80] W. Jiang, L. Jia, and X. Zhen-ming, “A new two-roll electrostatic separator for recycling of metals and nonmetals from waste printed circuit board,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 161, no. 1, pp. 257–262, 2009, doi: 10.1016/j.jhazmat.2008.03.088.
- [81] K. Medles, L. Dascalescu, A. Tilmatine, A. Bendaoud, and M. Younes, “Experimental Modeling of the Electrostatic Separation of Granular Materials,” *Part. Sci. Technol.*, vol. 25, no. 2, pp. 163–171, Apr. 2007, doi: 10.1080/02726350701257816.
- [82] M. Miloudi, M. Remadnia, C. Dragan, K. Medles, A. Tilmatine, and L. Dascalescu, “Experimental Study of the Optimum Operating Conditions of a Pilot-Scale Tribo-Aero-Electrostatic Separator for Mixed Granular Solids,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 2,

pp. 699–706, Mar. 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2243392.

- [83] A. WESSIM, “Réalisation et étude d’un dispositif d’acquisition de charge des matériaux plastiques par la triboélectricité,” Thèse de Magister, Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes, 2010.
- [84] L. Calin *et al.*, “Controlling particle trajectory in free-fall electrostatic separators,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 4, pp. 1038–1044, 2008, doi: 10.1109/TIA.2008.926690.
- [85] G. Buda, A. Samuila, M. Bilici, S. Atroune, and L. Dascalescu, “Set-Point Identification and Robustness Testing of a Triboelectrostatic Separation Process for Mixed Granular Plastics,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 2, pp. 1153–1160, 2015, doi: 10.1109/TIA.2014.2344500.
- [86] A. Tilmatine, K. Medles, M. Younes, A. Bendaoud, and L. Dascalescu, “Roll-type versus free-fall electrostatic separation of tribocharged plastic particles,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 46, no. 4, pp. 1564–1569, 2010, doi: 10.1109/TIA.2010.2049553.
- [87] H. Labair, S. Touhami, A. Tilmatine, S. Hadjeri, K. Medles, and L. Dascalescu, “Study of charged particles trajectories in free-fall electrostatic separators,” *J. Electrostat.*, vol. 88, pp. 10–14, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.elstat.2017.01.010.
- [88] I. E. Kimi, M. Miloudi, S. Touhami, D.-E. Fekir, and A. Tilmatine, “Experimental investigation of a modified free-fall tribo-electrostatic separator with rotating electrodes,” *Part. Sci. Technol.*, vol. 40, no. 2, pp. 243–251, Feb. 2022, doi: 10.1080/02726351.2021.1929608.
- [89] A. B. MEKHALEF, “Étude d’un séparateur tribo-aéro-électrostatique des mélanges des matériaux poudreux,” Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes, 2017.
- [90] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami, and L. Dascalescu, “Optimisation of belt-type electrostatic separation of granular plastic mixtures tribocharged in a propeller-type device,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 301, no. June 2011, p. 012067, Jun. 2011, doi: 10.1088/1742-6596/301/1/012067.
- [91] B. YOUSOUF, “Réalisation et étude expérimentale d’un nouveau séparateur triboélectrique à électrodes plaques immergées dans le mélange de particules fines,” Thèse

de Doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes, 2016.

- [92] M. F. Boukhoulda, M. Miloudi, K. Medles, M. Rezoug, A. Tilmatine, and L. Dascalescu, “Experimental modeling of a new triboelectrostatic separation process for mixed granular polymers,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 6, pp. 2375–2381, 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2263113.
- [93] M. Mohamed, “Application de la charge par effet triboélectrique des matériaux granulaires dans la séparation électrostatique,” Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes, 2012.
- [94] M. Miloudi, K. Medles, A. Bendaoud, A. Tilmatine, and L. Dascalescu, “Improvement of the Industrial Pilot of a Tribo-Aero-Electrostatic Separator for Binary Mixtures of Granular Insulating Materials,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 4, pp. 3479–3484, 2015, doi: 10.1109/TIA.2015.2394304.
- [95] A. Benabboun, “Contribution à l’étude de la séparation des particules fines pour application dans l’industrie de recyclage,” Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes, 2016.
- [96] S. Messal, T. Zeghloul, A. Mekhalef Benhafssa, and L. Dascalescu, “Belt-Type Corona-Electrostatic Separator for the Recovery of Conductive and Nonconductive Products from Micronized Wastes,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 53, no. 2, pp. 1424–1433, 2017, doi: 10.1109/TIA.2016.2622684.
- [97] A. Salama, G. Richard, K. Medles, T. Zeghloul, and L. Dascalescu, “Distinct recovery of copper and aluminum from waste electric wires using a roll-type electrostatic separator,” *Waste Manag.*, 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.03.036.
- [98] A. Iuga *et al.*, “Removal of metallic particles from acrylonitrile butadiene styrene wastes using electrostatic separation methods,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 1, pp. 322–330, 2011, doi: 10.1109/TIA.2010.2091188.
- [99] A. Samuila, “Charge et trajectoires des particules dans les séparateurs électrostatiques,” Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier (Grenoble I), 1997.
- [100] O. Dahou, K. Medles, S. Touhami, M. F. Boukhoulda, A. Tilmatine, and L. Dascalescu, “Application of Genetic Algorithms to the Optimization of a Roll-Type Electrostatic

- Separation Process,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 5, pp. 2218–2223, Sep. 2011, doi: 10.1109/TIA.2011.2161851.
- [101] M. Younes, A. Tilmatine, K. Medles, and L. Dascalescu, “Fuzzy Control of an Electrostatic Separation Process,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, no. 1, pp. 9–14, 2008, doi: 10.1109/TIA.2007.912802.
- [102] “Tableau d’analyse de la variance pour Ajuster le modèle de régression - Minitab.” <https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/20/help-and-how-to/statistical-modeling/regression/how-to/fit-regression-model/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/analysis-of-variance-table/> (accessed Jan. 27, 2023).
- [103] “Méthodes et formules pour la fonction ANOVA équilibrée - Minitab.” <https://support.minitab.com/fr-fr/minitab/20/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/how-to/balanced-anova/methods-and-formulas/methods-and-formulas/> (accessed Jan. 27, 2023).
- [104] P. Mathews, “Design of Experiments with Minitab,” *TQM Mag.*, vol. 17, no. 2, pp. 1–3, Apr. 2005, doi: 10.1108/09544780510583263.
- [105] M. Younes, A. Younes, H. Sayah, A. Tilmatine, A. Samuila, and L. Dascalescu, “Numerical and Experimental Study of Insulating Particles Behavior in Roll-Type Corona-Electrostatic Separators,” *Part. Sci. Technol.*, vol. 31, no. 1, pp. 71–80, Jan. 2013, doi: 10.1080/02726351.2011.648822.
- [106] A. Younes, M. Younes, H. Sayah, M. Bilici, A. Samuila, and L. Dascalescu, “Effect of spark discharges on the trajectories of insulating particles in roll-type corona-electrostatic separators. Experimental and numerical study,” *J. Electrostat.*, vol. 71, no. 1, pp. 84–91, 2013, doi: 10.1016/j.elstat.2012.10.003.
- [107] A. Urs, A. Samuila, A. Mihalcioiu, and L. Dascalescu, “Charging and Discharging of Insulating Particles on the Surface of a Grounded Electrode,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, no. 2, pp. 437–441, Mar. 2004, doi: 10.1109/TIA.2004.824500.
- [108] M. Younes, A. Tilmatine, K. Medles, M. Rahli, and L. Dascalescu, “Numerical modeling of conductive particle trajectories in roll-type corona-electrostatic separators,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 43, no. 5, pp. 1130–1136, 2007, doi: 10.1109/TIA.2007.904363.

- [109] M. Maammar, T. Zeghloul, W. Aksa, I. E. Achouri, K. Medles, and L. Dascalescu, “Experimental observation of charged particles trajectories in roll-type electrostatic separators,” *2020 IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet. IAS 2020*, pp. 29–32, 2020, doi: 10.1109/IAS44978.2020.9334908.
- [110] M. S. Secula, I. Cretescu, B. Cagnon, L. R. Manea, C. S. Stan, and I. G. Breaban, “Fractional factorial design study on the performance of GAC-enhanced electrocoagulation process involved in color removal from dye solutions,” *Materials (Basel)*, vol. 6, no. 7, pp. 2723–2746, 2013, doi: 10.3390/ma6072723.
- [111] G. P. Rangaiah, *Multi-Objective Optimization*, Vol. 1., vol. 1. WORLD SCIENTIFIC, 2008. doi: 10.1142/7088.
- [112] C. Y. Lee and Y. X. Shen, “Optimal planning of ground grid based on particle swarm algorithm,” *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 36, no. 12, pp. 30–37, 2009.
- [113] N. K. Nezhad, M. H. Fallahi, and M. G. Dozein, “An Optimal Design of Substation Grounding Grid Considering Economic Aspects Using Particle Swarm Optimization,” *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 12, pp. 2159–2165, Jul. 2013, doi: 10.19026/rjaset.6.3840.
- [114] K. Y. L. M. A. El-Sharkawi and U. of Washington, *Modern Heuristic Optimization Techniques*. Wiley, 2008. doi: 10.1002/9780470225868.
- [115] O. Guenounou, “Méthodologie de conception de contrôleurs intelligents par l’approche génétique- application à un bioprocédé,” these de Doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2009.
- [116] M. M. Brahim, “Optimisation multi-objectif par algorithmes génétiques et approche Pareto des paramètres d’usinage sous contraintes des limitations de production,” these de Magister, Université M’hamed Bougara Boumerdes, 2006.
- [117] S. LEILA, “Optimisation MultiObjectifs par Programmation Génétique,” these de Magister, Université de Batna, 2007.
- [118] A. De Meyer, C. Ottevaere, J. Van Orshoven, and D. Cattrysse, “Towards sustainable biomass-for-bioenergy supply chains by trading off between multiple objectives,” in *World Sustainable Energy days*, 2015, no. February, pp. 1–16.

- [119] K. Zhao, J. M. Grayson, and N. Khuri, “Multi-Objective Genetic Algorithm for Cluster Analysis of Single-Cell Transcriptomes,” *J. Pers. Med.*, vol. 13, no. 2, p. 183, Jan. 2023, doi: 10.3390/jpm13020183.
- [120] Y. Houam, “Commande multi-objectifs en utilisant les inégalités matricielles linéaires (LMIs) et les algorithmes génétiques,” these de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, 2013.
- [121] W. Yu, “Contribution à l’étude et à la mise en œuvre de stratégies adaptatives de commandes intelligentes : application au contrôle de systèmes dynamiques complexes,” these de doctorat, University of Paris-Est, France, 2011.
- [122] D. Omar, “La mise au point d’algorithmes de commande optimale des processus électrostatiques en utilisant les méthodes de l’intelligence artificielle,” Thèse De Doctorat, Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes, 2014.
- [123] O. Dahou, S. Touhami, K. Medles, T. Zeghloul, and L. Dascalescu, “Etude comparative des techniques d’intelligence artificielle dans le contexte du contrôle optimale d’un séparateur électrostatiquea industriel à électrode rotative,” in *Conference Record SFE 2016, Poitiers, Fr*, 2016, p. P1.19, ISBN: 978-2-9505432-7-1.
- [124] L. Reznik, *Fuzzy Controllers Handbook*. Elsevier, 1997. doi: 10.1016/B978-0-7506-3429-8.X5002-7.
- [125] S. N. Sivanandam, S. Sumathi, and S. N. Deepa, *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*, vol. 21(2). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007. doi: 10.1007/978-3-540-35781-0.
- [126] K. M. Passino and S. Yurkovich, *FUZZY CONTROL*, vol. 29, no. 2. Addison Wesley Longman, Inc, 1998. doi: 10.1080/03081070008960938.
- [127] S. Lila, “Segmentation d’images par classification floue,” Thede de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2003.
- [128] W. WU, “Synthèse d’un contrôleur flou par Algorithme Génétique Application au réglage dynamique des paramètres d ’ un système,” These de Doctorat, Université de Lille 1, 1998.
- [129] F. LAHOVAZI, “Mise en œuvre d’une stratégie de commande neuro floue : Application à

- un pendule inversé,” These de Magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2011.
- [130] O. BOUREBIA, “Commande Prédictive Floue des Systèmes Non Linéaires,” These de Doctorat, Université Mentouri De Constantine, 2011.
- [131] E. Youcef, “Commande Floue Optimisée d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté,” These de Magister, Université El-Hadj Lakhdar-Batna, 2009.
- [132] B. ABDELHAMID, “Commande Adaptative Floue Des Systèmes Non Linéaires,” These de Doctorat, Université Constantine 1, 2014.
- [133] W. Siler and J. J. Buckley, *Fuzzy Expert Systems and Fuzzy Reasoning*. JOHN WILEY & SONS, INC, 2005. doi: 10.1002/0471698504.
- [134] N. U. Ahamed, Z. Bin Taha, I. B. M. Khairuddin, M. F. Rabbi, S. A. M. M. Rahaman, and K. Sundaraj, “Fuzzy logic controller design for intelligent air-conditioning system,” in *2016 2nd International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE)*, Jul. 2016, no. October, pp. 232–236. doi: 10.1109/CCSSE.2016.7784388.
- [135] A. a. E. Ruano, *Intelligent Control Systems using Computational Intelligence Techniques*, vol. 70. Institution of Engineering and Technology, 2005. doi: 10.1049/PBCE070E.
- [136] M. Negnevitsky, “Fuzzy expert systems,” *Artif. Intell. A Guid. to Intell. Syst.*, pp. 87–130, 2011.
- [137] A. DJILLALI, “Optimisation et pilotage des procédés électrostatiques de séparation de particules millimétriques. Application à un prototype industriel,” Université Djillali Liabes De Sidi-Bel-Abbes, Thèse De Doctorat, 2023.

ANNEXE 1

LOI DE STUDENT : $t(\alpha, v)$

d.d.l/ α	0.9	0.5	0.3	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01	0.001
1	0.158	1	2	3.078	6.314	12.706	31.821	64	637
2	0.142	0.816	1.386	1.886	2.92	4.303	6.965	10	31.598
3	0.137	0.765	1.25	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.929
4	0.134	0.741	1.19	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.61
5	0.132	0.727	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.869
6	0.131	0.718	1.134	1.44	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	0.13	0.711	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	5.408
8	0.13	0.706	1.108	1.397	1.86	2.306	2.896	3.355	5.041
9	0.129	0.703	1.1	1.383	1.833	2.263	2.821	3.25	4.781
10	0.129	0.7	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
11	0.129	0.697	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437
12	0.128	0.695	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318
13	0.128	0.694	1.079	1.35	1.771	2.16	2.65	3.012	4.221
14	0.128	0.692	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.14
15	0.128	0.691	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073
16	0.128	0.69	1.071	1.337	1.746	2.12	2.583	2.921	4.015
17	0.128	0.689	1.069	1.333	1.74	2.11	2.567	2.898	3.965
18	0.127	0.688	1.067	1.33	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922
19	0.127	0.688	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.883
20	0.127	0.687	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.85
21	0.127	0.686	1.063	1.323	1.721	2.08	2.518	2.831	3.819
22	0.127	0.686	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792
23	0.127	0.685	1.06	1.319	1.714	2.069	2.5	2.807	3.767
24	0.127	0.685	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745
25	0.127	0.684	1.058	1.316	1.708	2.06	2.485	2.787	3.725
26	0.127	0.684	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707
27	0.137	0.684	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.69
28	0.127	0.683	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674
29	0.127	0.683	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.649
30	0.127	0.683	1.055	1.31	1.697	2.042	2.457	2.75	3.656
40	0.126	0.681	1.05	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551
80	0.126	0.679	1.046	1.296	1.671	2	2.39	2.66	3.46
120	0.126	0.677	1.041	1.289	1.658	1.98	2.358	2.617	3.373
Infini	0.126	0.674	1.036	1.282	1.645	1.96	2.326	2.576	3.291

Résumé

En raison de la quantité croissante de déchets électroniques, leur recyclage est une question importante et un grand défi pour le monde en raison de leur valeur matérielle et de leur impact sur l'environnement. Les séparateurs électrostatiques sont parmi les séparateurs les plus efficaces dans le domaine du recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques en raison de leur respect de l'environnement, de leur faible coût et de leur grande capacité de récupération des métaux et des plastiques.

L'objectif de cette thèse est d'utiliser des techniques modernes et des techniques d'intelligence artificielle pour améliorer et contrôler le séparateur électrostatique à tambour. La méthode des plans d'expérience a été utilisée pour étudier le comportement de ce séparateur et identifier des améliorations possibles. De plus, nous avons adopté la technique d'optimisation multi-objectifs utilisant des algorithmes génétiques pour optimiser le processus de séparation. En ce qui concerne le contrôle, nous avons utilisé la technique de la logique floue.

Mots clés : DEEE ; Séparation électrostatique ; plans d'expérience ; génétique algorithme multi-objectif ; logique floue.

Abstract

Due to the increasing amount of electronic waste, their recycling is an important issue and a significant challenge for the world due to their material value and environmental impact. Electrostatic separators are among the most efficient separators in the field of recycling electrical and electronic equipment waste due to their environmental friendliness, low cost, and high capacity for recovering metals and plastics.

The objective of this thesis is to use modern techniques and artificial intelligence methods to improve and control the drum electrostatic separator. The method of experimental design has been employed to study the behavior of this separator and identify possible enhancements. Additionally, we have adopted the multi-objective optimization technique using genetic algorithms to optimize the separation process. As for control, we have utilized fuzzy logic techniques.

Keywords : WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment) ; Electrostatic Separation ; Design of experiment ; Multi-objective Genetic Algorithm ; Fuzzy Logic.

ملخص

بسبب الزيادة في كمية النفايات الإلكترونية، إعادة تدويرها أصبحت مسألة مهمة وتحدياً كبيراً للعالم نظراً لقيمتها المادية وتأثيرها على البيئة. تعتبر فواصل الكهرباء الساكنة من بين أكثر الفواصل فعالية في مجال إعادة تدوير نفايات الأجهزة الكهربائية والإلكترونية بسبب احترامها للبيئة، وتكلفتها المنخفضة وقدرتها الكبيرة على استرداد المعادن والبلاستيك.

هدف هذه الأطروحة هو استخدام التقنيات الحديثة وتقنيات الذكاء الاصطناعي لتحسين ومراقبة فاصل الكهرباء الساكن ذو الأسطوانة. تم استخدام طريقة تصميم التجارب لدراسة سلوك هذا الفاصل وتحديد التحسينات الممكنة. بالإضافة إلى ذلك، قمنا باعتماد تقنية الأمثلية المتعددة الأهداف باستخدام خوارزميات الجينات لتحسين عملية الفصل. فيما يتعلق بالتحكم، استخدمنا تقنية المنطق الضبابي

الكلمات المفتاحية : نفايات الأجهزة الكهربائية والإلكترونية (WEEE) ؛ الفصل الكهربائي الساكن؛ تصميم التجارب؛ خوارزمية

الجينات متعددة الأهداف؛ المنطق الضبابي