

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université de Ain Temouchent- Belhadj Bouchaib
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الإلكترونيات
Département d'Électrotechnique



Projet de Fin d'Études
Pour l'obtention du diplôme de Master
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Électrotechnique
Spécialité : Commande Électrique

Thème

**Étude expérimentale des méthodes de chargement des particules et
développement d'un algorithme d'IA pour déterminer l'état de leur charge
électrostatique**

Présenté par :

- 1) Mr HAZAM MOHAMED Kheir Eddine
- 2) Mr. ROGHDI Bouzid

Devant le jury :

Dr ADJOUJ Labiba	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Présidente
Dr BOUDJELLA Fatima zohra	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examinatrice
Dr MESSAFEUR Radjaa	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrante

Année Universitaire 2025/2026



REMERCIEMENTS

Avant de commencer notre présentation, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent tout d'abord à notre encadrante, **MADAME MESSAFEUR RADJAA**, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses précieux conseils et la confiance qu'elle nous a accordée tout au long de ce projet.

Nous adressons également nos vifs remerciements aux honorables membres du jury, qui nous font l'honneur d'évaluer ce mémoire. Nous les remercions pour le temps qu'ils consacrent à l'examen de notre travail ainsi que pour leurs remarques et suggestions, qui contribueront à son amélioration.

Nous exprimons aussi notre reconnaissance envers tous les enseignants du département d'Électrotechnique, qui ont assuré notre formation et partagé avec nous leurs connaissances durant notre cursus universitaire.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à nos familles, à nos proches et à toutes les personnes qui nous ont soutenus, encouragés et accompagnés tout au long de notre parcours universitaire.

À toutes ces personnes, nous adressons nos plus sincères remerciements.



Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Tout d'abord, je rends grâce à **ALLAH**, le Tout-Puissant, qui m'a accordé la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail et atteindre ce jour.

À mes très chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices, leurs encouragements et leur soutien indéfectible tout au long de mes années d'études. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

À tous mes enseignants ainsi qu'à l'ensemble du personnel administratif du Département d'Électrotechnique, pour leur accompagnement, leur disponibilité et les connaissances qu'ils m'ont transmises au cours de mon parcours universitaire.

À mon encadrante, **MADAME MESSAFEUR RADJAA**, pour sa disponibilité, sa confiance, ses précieux conseils et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce mémoire.

À toute ma famille, et plus particulièrement à mes frères **KAMEL**, **YOUCEF** et **IBRAHIM**, pour leur soutien et leurs encouragements.

Enfin, à mes amis **MAHDI**, **ALAE**, **ILYES**, **AMINE**, **ABDELKRIME** et **FAROUK**, en témoignage de mon amitié et en remerciement pour leur présence, leurs encouragements et leur soutien.

À toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail, j'adresse mes plus sincères remerciements.

Bouzid





Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

Tout d'abord, je rends grâce à **ALLAH**, qui m'a donné la force et la patience de mener ce travail à son terme.

À mes chers parents, pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien tout au long de mes études.

À tous mes enseignants ainsi qu'au personnel administratif du Département d'Électrotechnique, pour leur accompagnement et les connaissances qu'ils m'ont transmises.

À mon encadrante, **MADAME MESSAFEUR RADJAA**, pour sa disponibilité, ses précieux conseils et sa confiance.

À toute ma famille, en particulier à mes frères, pour leurs encouragements et leur soutien.

Enfin, je dédie ce travail à moi-même, en reconnaissance de ma persévérance et des efforts fournis pour atteindre cet objectif.



Mohamed

Table des matières

Table des matières :

Introduction générale :	1
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART	4
Introduction.....	
I.1. Généralités sur les matières plastiques.....	4
I.1.1. Les familles des matières plastiques	5
I.2. Mécanismes de charge électrique	8
I.2.1. Effet tribo-électrique	8
I.2.2. Série triboélectrique.....	9
I.3. Forces exercées sur les matériaux granulaires.....	11
I.3.1. Forces de la pesanteur	11
I.3.2. Forces de London-Van der Waals.....	12
I.3.3. Forces de Coulomb	14
I.3.4. Forces aérodynamiques	15
I.4. Dispositifs de charge	16
I.4.1. Dispositif de charge par ventilateur	17
I.4.2. Dispositif de charge par cyclone.....	18
I.4.3. Dispositif de charge de type statique	19
I.4.4. Dispositif de charge à lit fluidisé.....	20
I.4.5 Chargement tribo-aéro-électrostatique.....	21
Conclusion	22
CHAPITRE II : ETUDE EXPERIMENTALE DES METHODES DE CHARGEMENT DES PARTICULES.....	24
Introduction.....	248
II.1. Matériaux utilisés :	24
II.2. Installations expérimentales	25
II.2.1. Dispositif de chargement triboélectrique à tube :	25
II.2.2. Dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé :	26
II.3. Matériels et méthode.....	27

II.3.1. Mesure de la charge	27
II.3.2. Mesure de l'humidité relative :	29
II.3.3. Mesure de la masse granulaire	30
II.3.4. Souffleurs et variateur de tension :	31
II.4. Résultats et Discussion du dispositif de chargement à tube :	31
II.4.1. Déroulement de l'expérience :	31
II.5. Résultats et Discussion du dispositif de chargement à lit fluidisé :	36
II.5.1 Influence de la vitesse de fluidisation pour une masse de 5 g	36
II.5.2 Influence de la vitesse de fluidisation pour une masse de 10 g	39
II.5.3 Influence de la vitesse de fluidisation pour une masse de 15 g	42
conclusion	46
CHAPITRE III : DÉVELOPPEMENT D'UN ALGORITHME D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR LA DÉTERMINATION DE L'ÉTAT DE CHARGE ÉLECTROSTATIQUE	48
Introduction.....	48
III.1. Environnement de développement : le langage Python.....	48
III.1.1. Présentation générale	48
III.1.2. Pourquoi Python pour ce travail ?	49
III.1.3. Bibliothèques utilisées.....	49
III.2. Présentation des données expérimentales.....	50
III.2.1. Source et structure du jeu de données	50
III.2.2. Observations préliminaires	51
III.3. Architecture et développement de l'algorithme.....	51
III.3.1. Étape 1 — Lecture et exploration des données	52
III.3.2. Étape 2 — Prétraitement des données	53
III.3.3. Étape 3 — Partition apprentissage / test	53
III.3.4. Étape 4 — Entraînement du modèle Random Forest	53
III.3.5. Étape 5 — Prédiction et évaluation des performances.....	54
III.4. Analyse des résultats et visualisations graphiques	55
III.4.1. Comparaison charges réelles vs charges prédites.....	56

III.4.2. Charge massique en fonction de la masse des particules.....	57
III.4.3. Influence du temps et de la vitesse de l'air (lit fluidisé).....	58
III.4.4. Importance des variables et graphe des résidus.....	59
III.4.5. Charge massique moyenne par matériau et par type de paroi	60
III.5. Discussion générale	60
Conclusion	61
Conclusion Générale.....	63
Bibliographie.....	67
Résumé.....	71
Abstract	71
الملخص	71

Liste des Figures

Liste des Figures :

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART

Figure I. 1 : Formes de livraison de la matière plastique première.....	5
Figure I. 2 : Exemples de pièces en élastomères.....	7
Figure I. 3 : Charge tribo-électrique de deux particules en contact.....	9
Figure I. 4 : La force attractive de London-Van der Waals	12
Figure I. 5 : Le phénomène physique derrière la force Van der Waals : polarisation électrique des atomes ou molécules neutres	13
Figure I. 6 : Force de coulomb entre deux sphères chargées.....	14
Figure I. 7 : Représentation schématisée d'un dispositif de chargement par ventilateur [33].....	17
Figure I. 8 : Dispositif de charge tribo-électrique à plusieurs hélices et à fonctionnement continu. ...	18
Figure I. 9 : Représentation schématisée d'un dispositif de chargement par cyclone [39].	19
Figure I. 10 : Représentation schématisée d'un dispositif de chargement statique [35].....	20
Figure I. 11 : Régimes d'un lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation [42].	20
Figure I. 12 : Représentation schématisée d'un dispositif composé d'un lit fluidisé et d'un chargeur statique.....	22

CHAPITRE II : ETUDE EXPERIMENTALE DES METHODES DE CHARGEMENT DES PARTICULES

Figure II. 1 : Echantillons de particules utilisés.....	25
Figure II. 2 : Installation de chargement triboélectrique à tube (Solidworks)	25
Figure II. 3 : Photos des tubes utilisés pour le chargement par glissement.....	26
Figure II. 4 : Dispositif du Chargement tribo-électrique à lit fluidisé	27
Figure II. 5 : Cage de Faraday utilisés	28
Figure II. 6 : Electromètre numérique Keithley modèle 6514	29
Figure II. 7 : thermo-hygromètre numérique modèle testo 625.....	29
Figure II. 8 : Balance analytique électronique automatique	30
Figure II. 9 : Photographie représente variateur de tension avec souffleur	31
Figure II. 10 : Évolution de la charge acquise en fonction de la masse pour les cinq produits dans le tube en aluminium.	33
Figure II. 11 : Évolution de la charge acquise en fonction de la masse pour les cinq produits.....	35
Figure II. 12 : Influence de la vitesse de fluidisation sur la charge acquise par les cinq particules pour un temps de chargement de 5 s.....	37

Figure II. 13 : Influence de la vitesse de fluidisation sur la charge acquise par le produit granulaire, pour $t = 15s$ et la Vitesse de rotation du souffleur de 112.5 à 337,5 tr/min et la masse est maintenu constante $m = 5g$	38
Figure II. 14 : Influence de la vitesse de fluidisation sur la charge acquise par les cinq particules pour un temps de chargement de 15 s.....	39
Figure II. 15 : Représente Influence de la vitesse de fluidisation sur la charge acquise par le produit granulaire, pour $t = 10s$ et la Vitesse de rotation du souffleur de 112.5 à 337,5 tr/min et la masse est maintenu constante $m = 10g$	40
Figure II. 16 : Influence de la vitesse de fluidisation sur la charge acquise par les cinq particules pour un temps de chargement de 10s.....	41
Figure II. 17 : représente Influence de la vitesse de fluidisation sur la charge acquise par le produit granulaire, pour $t = 5s$ et la Vitesse de rotation du souffleur de 112.5 à 337,5 tr/min et la masse est maintenu constante $m = 15g$	42
Figure II. 18 : Influence de la vitesse de fluidisation sur la charge acquise par les cinq particules pour un temps de chargement de 5s.....	43
Figure II. 19 : représente Influence de la vitesse de fluidisation sur la charge acquise par le produit granulaire, pour $t = 15s$ et la Vitesse de rotation du souffleur de 112.5 à 337,5 tr/min et la masse est maintenu constante $m = 15g$	44
Figure II. 20 : Influence de la vitesse de fluidisation sur la charge acquise par les cinq particules pour un temps de chargement de 15s.....	45

CHAPITRE III : DÉVELOPPEMENT D'UN ALGORITHME D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR LA DÉTERMINATION DE L'ÉTAT DE CHARGE ÉLECTROSTATIQUE

Figure III. 1 : Évolution de la charge massique en fonction de la masse pour les trois types de parois	57
Figure III. 2 : Charge massique en fonction du temps et de la vitesse de l'air pour le lit fluidisé (Plexiglas).....	58
Figure III. 3 : Importance des variables calculée par Random Forest et distribution des résidus de prédiction	59
Figure III. 4 : Charge massique moyenne par type de matériau et par type de paroi (comparaison exhaustive)	60

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux :

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART

Tableau I. 1 : Série triboélectrique réalisée par Bill Lee en 2009.	10
Tableau I. 2 : Forces de Van der Waals et de pesanteur en fonction de la taille des particules, d'après Higuchi.....	13
Tableau I. 3 : Forces d'interaction électrostatique entre deux sphères chargées	15

CHAPITRE II : ETUDE EXPERIMENTALE DES METHODES DE CHARGEMENT DES PARTICULES

Tableau II. 1 : Charge massique ($\mu\text{C/g}$) des particules	32
Tableau II. 2 : Charge massique ($\mu\text{C/g}$) des particules	34
Tableau II. 3 : Charge massique ($\mu\text{C/g}$) des particules en fonction du temps (5s)	37
Tableau II. 4 : Charge massique ($\mu\text{C/g}$) des particules en fonction du temps (10s)	37
Tableau II. 5 : Charge massique ($\mu\text{C/g}$) des particules en fonction du temps (15s)	38
Tableau II. 6 : Charge massique ($\mu\text{C/g}$) des particules en fonction du temps (5s)	39
Tableau II. 7 : Charge massique (nC/g) des particules en fonction du temps (10s)	40
Tableau II. 8 : Charge massique ($\mu\text{C/g}$) des particules en fonction du temps (15s)	41
Tableau II. 9 : Charge massique (nC/g) des particules en fonction du temps (5s)	42
Tableau II. 10 : Charge massique ($\mu\text{C/g}$) des particules en fonction du temps (10s)	43
Tableau II.11 : Charge massique ($\mu\text{C/g}$) des particules en fonction du temps (15s)	44

CHAPITRE III : DÉVELOPPEMENT D'UN ALGORITHME D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR LA DÉTERMINATION DE L'ÉTAT DE CHARGE ÉLECTROSTATIQUE

Tableau III. 1 : Bibliothèques Python utilisées dans l'algorithme.....	49
Tableau III. 2 : Description des 10 variables du jeu de données expérimentales	50
Tableau III. 3 : Pipeline de traitement de l'algorithme développé.....	52
Tableau III. 4 : Métriques de performance du modèle Random Forest Regressor	55

Introduction Générale

Introduction générale :

L'augmentation continue de la production des déchets plastiques et des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) constitue aujourd'hui un enjeu environnemental majeur. Ces déchets renferment une quantité importante de matériaux valorisables tels que les métaux, le verre et les polymères plastiques. Afin de favoriser leur recyclage et leur réutilisation, il est nécessaire de développer des procédés de séparation efficaces, économiques et respectueux de l'environnement.

Parmi les différentes techniques de séparation existantes, la séparation électrostatique occupe une place importante grâce à sa faible consommation énergétique, son caractère non polluant et sa capacité à traiter des matériaux isolants de nature différente. Le principe de cette technique repose sur la création de charges électriques à la surface des particules par effet triboélectrique, suivi de leur exposition à un champ électrique permettant leur séparation selon leur polarité et leur niveau de charge.

Le chargement triboélectrique est un phénomène complexe qui dépend de nombreux paramètres, tels que la nature des matériaux, les conditions de contact, la masse des particules, le temps de chargement, la vitesse de fluidisation ainsi que les conditions ambiantes. La maîtrise de ces paramètres est essentielle pour optimiser les performances des procédés de séparation électrostatique. De nombreuses méthodes de chargement ont été développées dans la littérature, notamment le chargement par frottement dans des tubes isolants ou conducteurs et le chargement triboélectrique en lit fluidisé.

il reste difficile de prédire l'état de charge électrostatique des particules du fait du caractère fortement non linéaire des mécanismes de transfert de charges. Dans ce cadre, les méthodes d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique sont particulièrement bien adaptées pour modéliser à partir de données expérimentales ces phénomènes complexes, et pour prédire avec précision le comportement électrostatique des particules. L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier expérimentalement différentes méthodes de chargement électrostatique des particules granulaires isolantes et composites, puis de développer un algorithme d'intelligence artificielle capable de déterminer et de prédire leur état de charge électrostatique à partir des paramètres expérimentaux.

Pour y parvenir, nous avons étudié plusieurs matériaux utilisés couramment dans les équipements électriques et électroniques, notamment le polystyrène (PS), l'acrylonitrile

butadiène styrène (ABS) et la fibre de carbone. Les essais ont été conduits au moyen de deux dispositifs de chargement par glissement dans des tubes d'aluminium et de PVC, et d'un dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé. Les résultats obtenus ont ensuite permis d'élaborer un modèle prédictif, basé sur l'intelligence artificielle, développé sous Python. Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre présente un état de l'art portant sur les matériaux plastiques, les phénomènes triboélectriques, les forces agissant sur les particules granulaires ainsi que les principaux dispositifs de chargement électrostatique.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude expérimentale des méthodes de chargement des particules. Les dispositifs expérimentaux utilisés, les protocoles de mesure et les résultats obtenus sont présentés et analysés afin d'évaluer l'influence des différents paramètres opératoires sur la charge acquise.

Le troisième chapitre traite le développement d'un algorithme d'intelligence artificielle sous Python destiné à la détermination de l'état de charge électrostatique des particules. Les différentes étapes de traitement des données, d'apprentissage et de prédiction sont décrites, puis les performances des modèles développés sont évaluées et discutées.

CHAPITRE I :

ETAT DE L'ART

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART

Introduction

Les équipements électriques et électroniques (DEEE) contiennent souvent des substances ou des composants dangereux pour l'environnement, comme les piles, gaz réfrigérants ou substances volatiles dangereuses, le mercure ou certains condensateurs contenant des PCB. Cependant, ils sont aussi une source importante de matériaux recyclables, tels que les métaux (ferreux et non ferreux), les métaux rares, le verre et les plastiques ainsi que les fibres de carbone [8,9].

Ces matériaux sont présents partout dans notre vie quotidienne, depuis les emballages jusqu'aux applications avancées comme l'aérospatiale. Aujourd'hui, on parle même d'un « âge des plastiques ». Cela s'explique par leur faible coût et par leur grande diversité : il existe de nombreux types de plastiques, chacun ayant des propriétés différentes. De plus, ils peuvent être facilement transformés pour obtenir des formes complexes sans nécessiter d'usinage.

Dans ce chapitre, nous allons présenter en premier lieu une généralité sur les matières plastiques et une sur l'effet triboélectrique et les forces exercés sur les matériaux granulaires. Après nous allons citer quelques dispositifs de chargement triboélectrique [10].

I.1. Généralités sur les matières plastiques

Le terme « plastique » décrit une grande variété de composés organiques obtenus par synthèse chimique. Produites essentiellement à partir du pétrole, les matières plastiques sont l'un des symboles du XXe siècle, La bakélite (1909) est le plus ancien plastique entièrement synthétique.

Il existe également des plastiques naturels : poix, latex, bitume, brai, résines, laques, ambre, écaille, corne, et des plastiques d'origine animale généralement extraite du lait et utilisé dans la fabrication des produits médicaux.

La matière plastique est composée principalement de polymères, qui a la propriété de se mettre en forme facilement par moulage, extrusion, coulage après un chauffage modéré (100- 300 °C).

Les formes commerciales des matières plastiques La matière plastique première utilisée lors de sa mise en forme moyennant un des procédés peut être livrée sous une des formes suivantes :

- Granulés ;
- Poudre ;
- Résine ;
- Et des semi-produits (feuilles, films, pastilles, et fibres).

Un matériau constitué de granulés plastiques contient au moins un produit thermoplastique et se présente sous forme de petits grains. Les granulés sont fondus, extrudés ou moulés, pour fabriquer des objets en PE, PP, PS, etc.



Figure I. 1 : Formes de livraison de la matière plastique première

I.1.1. Les familles des matières plastiques

Les matières plastiques utilisées à l'échelle industriel sont très diverses mais elles peuvent être classées en trois classes :

a) Les thermoplastiques

C'est de loin la famille la plus utilisée : ils représentent près de 90 % des applications des matières plastiques [12]. Ils sont moins fragiles, plus faciles à fabriquer (machine à injecter et cadences élevées) et permettent des formes plus complexes que les thermodurcissables. Ils existent sous forme rigide ou souple, compacte ou en faible épaisseur, sous forme de feuille très mince (film...), de revêtement, expansé ou allégé...

➤ Propriétés principales

Ils ramollissent et se déforment sous l'action de la chaleur. Ils peuvent, en théorie, être refondus et remodelés un grand nombre de fois tout en conservant leurs propriétés ; ils sont comparables à la cire ou à la paraffine. Insensibles à l'humidité, aux parasites, aux moisissures (sauf polyamides) ils peuvent être fabriqués dans une gamme de couleurs très étendue. Inconvénients : fluage élevé ; coefficient de dilatation linéaire élevé, entraînant un retrait important au moment du moulage ; combustible ; sensible aux ultraviolets.

➤ Principales familles

Thermoplastiques de grande diffusion :

À eux seuls, ils représentent de 70 à 80 % du total des plastiques mis en œuvre. On y trouve les polyéfines (polyéthylène, polypropylène), le polystyrène et les PVC (polychlorure de vinyle).

Thermoplastiques techniques :

Les polyamides, proche du nylon textile, sont les plus utilisés du groupe : ils comportent de nombreuses variantes, de bonnes caractéristiques mécaniques, et une bonne tenue aux températures. Les polycarbonates sont transparents et résistants aux chocs (verres correcteurs, vitrage antieffraction...). Les polyesters, voisins des fibres textiles polyesters, sont transparents et imperméables aux gaz (applications voisines des polyamides). Les polyacétals résistent à la fatigue, à l'eau et aux solvants (lave-linge, lave-vaisselle...).

Thermoplastiques hautes performances :

Plus coûteux, ils sont caractérisés par leur résistance à la chaleur et par des propriétés électriques élevées. Les résines fluorées (PTEE, Poly chlorotrifluoroéthylène PCTEE, Poly fluorure de vinylidène PVDF) sont les plus classiques ; elles résistent à presque tous les agents chimiques, ne vieillissent pas, ne brûlent pas, ont de bonnes qualité frottant. Les polysulfones et les polysulfones de phénylènes (PPS), plus récents, transparents, allient résistance à la température, propriétés mécaniques et électriques élevées.

b) Les thermodurcissables

Ils ne ramollissent pas et ne se déforment pas sous l'action de la chaleur. Une fois créée il n'est plus possible de les remodeler par chauffage. Au moment de la mise en œuvre, ils ramollissent dans un premier temps, puis durcissent de manière irréversible sous l'action prolongée de la chaleur.

➤ Propriétés principales

Ils présentent une bonne tenue aux températures élevées ($> 200^{\circ}\text{C}$), aux attaques chimiques, une meilleure résistance au fluage que les thermoplastiques (conservent une meilleure stabilité dimensionnelle dans le temps), une bonne rigidité pour un prix de matière première peu élevé et faible retrait au moulage. Inconvénients : mise en œuvre moins pratique et plus lente que les thermoplastiques ; pas de moulage par injection et cadences de fabrication assez faibles.

➤ Principales familles

Les phénoplastes (PF) noirs ou bruns (bakélite) et les aminoplastes blancs ou crème (urée formaldéhyde UF, mélamine-formol MF) sont les plus courants et les moins coûteux.

Les époxydes (EP), les polyesters (UP) et les polyuréthanes (PUR) peuvent être classés dans le groupe des plastiques techniques.

Pour les hautes performances, plus coûteux, on a les polyamides PF, qui conservent leurs propriétés mécaniques et électriques au-delà de 300°C, et les silicones SI, qui résistent à la chaleur et ont des propriétés mécaniques élevées.

c) Les élastomères ou caoutchoucs

Ils sont obtenus par synthèse chimique, comme les plastiques, et possèdent des propriétés comparables à celle de caoutchouc naturel. Le néoprène (1930) fut le premier caoutchouc de synthèse.

Applications : pneumatiques, courroies, tapis, tuyaux, amortisseurs, joints d'étanchéité, revêtements divers, pièces mécaniques, chaussure.

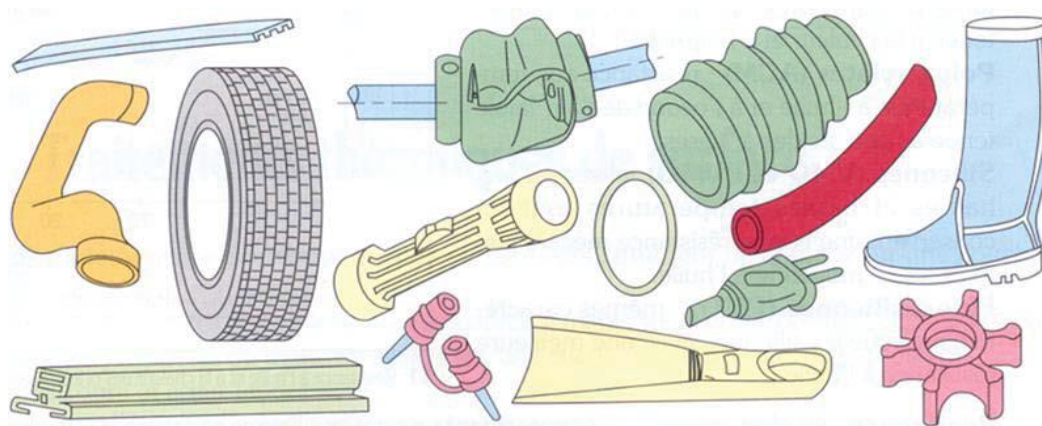


Figure I. 2 : Exemples de pièces en élastomères

➤ Principales caractéristiques

La propriété la plus remarquable est l'élasticité ou la capacité à s'allonger sans se rompre (à pourcentage très élevé, jusqu'à 1000 %). À l'opposé le module d'élasticité longitudinal E reste très petit (inférieure à 10 N/mm^2 : près de 200 000 pour les aciers) traduisant une faible rigidité.

Élastomères vulcanisés :

Ce sont les plus traditionnels. La vulcanisation consiste à incorporer du soufre au caoutchouc afin d'améliorer la résistance tout en maintenant l'élasticité. Ils peuvent être extrudés ou moulés.

Les Principales nuances sont : caoutchouc naturel, nitrile, butyle, chlorurée, EPDM (éthylène propylène), SBR (styrène-butadiène), Fluorés (FPM).

Élastomères thermoplastiques :

Plus récents, ils ont les qualités des élastomères vulcanisés haut de gamme avec en plus la simplicité de mise en oeuvre des plastiques thermoplastiques (moulage par injection, pas de vulcanisation).

Les Principales nuances sont :

- Polyuréthane (PUR) : grande dureté, résistance à l'abrasion et au déchirement, faible tenue à la chaleur et à l'humidité.
- Polyacrylates (ACM) : résistance aux températures, à l'huile et à l'ozone de l'air, faible tenue à l'eau.
- Silicones (VMQ et PVMQ) : résistent aux hautes et basses températures tout en conservant une bonne résistance mécanique, mais tenue moyenne à l'huile.
- Fluorosilicones (FMQ) : même caractéristiques que les silicones avec une meilleure Résistance à l'huile.

I.2. Mécanismes de charge électrique

I.2.1. Effet tribo-électrique

La triboélectricité – du grec « tribein » qui signifie frotter – désigne le phénomène électrostatique par lequel un transfert de charges électriques est créé lorsque deux matériaux de nature différente sont mis en contact. Quand deux matériaux électriquement neutres se frottent l'un à l'autre, des charges électriques sont transférées au niveau surfacique de l'un

vers l'autre, dans un même sens, il en résulte l'obtention de deux matériaux différemment chargés. La charge statique ainsi acquise se produit dans un système où généralement la conductivité du matériau est faible, elle persiste donc même après rupture du contact, et de nouveaux contacts auront pour effet de produire d'autres transferts [13-14], ce qui permet de produire des charges à des niveaux élevés (Figure I-3). C'est le mécanisme physique le plus utilisé pour charger des matériaux granulaires ou micronisés plastiques en vue de leur séparation dans un champ électrique intense [15-21].

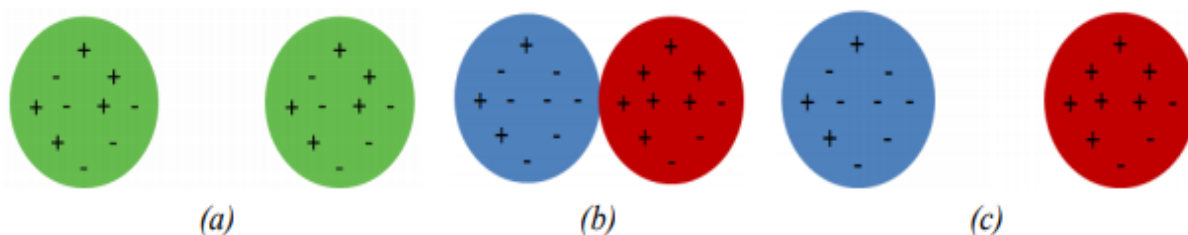


Figure I. 3 : Charge tribo-électrique de deux particules en contact.

- (a) Particules électriquement neutre sans contact entre elles ;
- (b) Contact et transfert de charge ;
- (c) Rupture du contact, particules chargées.

I.2.2. Série triboélectrique

La série triboélectrique est le classement de divers matériaux dans un ordre donné [17], de sorte qu'un frottement entre deux matériaux qui se suivent aboutit à charger le premier positivement et le second négativement. Plus ces matériaux sont éloignés dans la liste, plus les charges engendrées par leur frottement sont élevées. Certaines de ces séries ont été proposées de longue date : Wilcke (1759), Faraday (1840), Jamin et Bouty qui proposent à peu près la même série. Une autre série donnée par Shaw (1917), qui en plus d'être beaucoup plus étendue que les précédentes, donne une meilleure description des échantillons employés, celle-ci a également démontré l'effet de la température qui peut produire des inversions dans l'ordre établie [22-24].

Bill Lee introduit aussi le concept d'« affinité » triboélectrique : le rapport entre la charge triboélectrique échangée et l'énergie dépensée dans le frottement (Tableau I-1).

Tableau I. 1 : Série triboélectrique réalisée par Bill Lee en 2009.

Nom d'isolant	Affinité triboélectrique [nC/J]	Charge acquise si frotté avec du métal (F : faible, N : normal)	Remarques
Polyuréthane solide	+40	+N	Un peu conducteur
Nylatron (nylon + MoS ₂)	+28	+N	/
Verre	+25	+N	Un peu conducteur
Papier	+10	-F	Un peu conducteur
Bois (pin)	+7	-F	/
Silicone	+6	+N	/
Coton	+5	+N	Un peu conducteur
Caoutchouc nitrile	+3	-F	/
Laine	0	-F	/
Polycarbonate	-5	-F	/
ABS	-5	-N	/
Poly méthacrylate de méthyle)	-10	-N	/
Époxy (circuit imprimé)	-32	-N	/

Caoutchouc en styrène-butadiène (SBR, Buna S)	-35	-N	/
PET (mylar) solide	-40	+F	/
Polystyrène	-70	-N	/
Polyamide	-70	-N	/
Silicone	-72	-N	/
Oléfines (alcènes) : LDPE, HDPE, PP	-90	-N	/
PVC (vinyle rigide)	-100	-N	/
Latex (naturel) en caoutchouc	-105	-N	/
Caoutchouc en EPDM, remplie	-140	-N	Un peu conducteur
Téflon	-190	-N	Très électronégatif

Quelques différences ont été constatées dans les séries triboélectriques d'un chercheur à un autre, ceci reflète principalement la culture matérielle de leurs époques respectives et souligne un certain facteur aléatoire de ces séries. En effet, il a été démontré que certains facteurs externes pouvaient inverser les polarités obtenues lors des frottements.

I.3. Forces exercées sur les matériaux granulaires

Trois types des forces inter particulières agissent sur les matériaux granulaires lors du frottement ou du simple contact :

- A. Les forces de la pesanteur
- B. Les forces électrostatiques
- C. Les forces aérodynamiques

I.3.1. Forces de la pesanteur

Le poids d'un objet est égal à la force d'attraction gravitationnelle exercée par la Terre.

Cette force de pesanteur est caractérisée par une origine : le centre de gravité G (ou centre d'inertie) du corps, une direction : la verticale passant par G, un sens : vers le bas et une valeur $P = m \cdot g$ avec P en Newton (N), m en kg et $g = 9.81 \text{ N.kg}^{-1}$ [25].

I.3.2. Forces de London-Van der Waals

Il s'agit de forces attractives (figure I.4). Si on considère deux atomes distant de r , la force d'interaction F [N] entre moments dipolaires instantanés [26] s'écrit :

$$F = -\frac{\alpha^2}{r^7} \frac{4}{3} \frac{hc}{\lambda_i} \quad (1.1)$$

Où α est la polarisabilité de l'atome, $\frac{hc}{\lambda_i}$ son énergie d'ionisation.

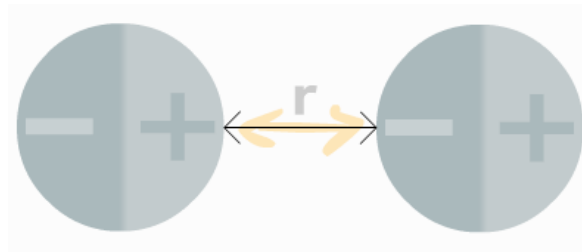


Figure I. 4 : La force attractive de London-Van der Waals

Les forces de London – van der Waals étant inversement proportionnelles à la septième puissance de leur distance, cela entraîne un accroissement rapide de l'interaction pour les courtes distances.

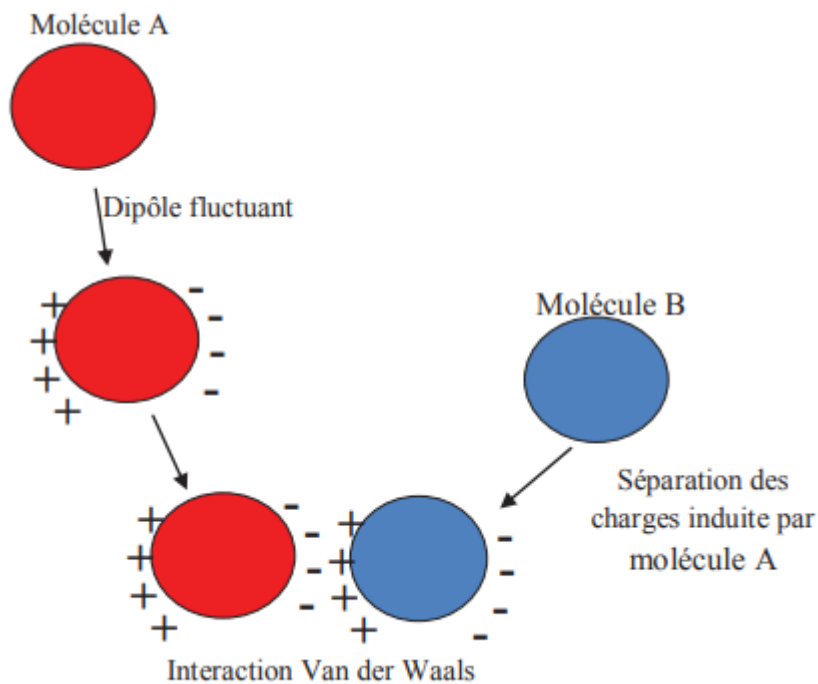


Figure I. 5 : Le phénomène physique derrière la force Van der Waals : polarisation électrique des atomes ou molécules neutres

Le calcul réalisé par *HAMAKER* [26] pour deux sphères identiques de rayon R séparées de r (distance centre à centre) et baignant dans le vide conduit à :

$$F_A = -\frac{A}{6(r-2R)} \left(\frac{2R^2}{r^2-4R^2} + \frac{2R^2}{r^2} + \ln \frac{r^2-4R^2}{r^2} \right) \quad (1.2)$$

Où A est la constante de *HAMAKER*.

Les forces de Van der WAALS ne sont significatives (pour le processus d'agrégation) que si la distance inter-particulaire ($r-2R$) est inférieure à 100 nm ; l'équation donnée par *HAMAKER* est donc suffisante. Une approximation de cette dernière, obtenue pour $r \ll R$, est largement utilisée :

$$F_A = -\frac{A.R}{12(r-2R)^2} \quad (1.3)$$

Le tableau I.2 donne la valeur des forces d'interaction entre des particules séparées par une distance de 50 Å, en fonction de leur rayon. Pour des particules de 1 mm, elles sont approximativement identiques. Ces constatations expliquent le fait que les fines particules aient plus tendance à s'agglomérer que les grosses.

Tableau I. 2 : Forces de Van der Waals et de pesanteur en fonction de la taille des particules, d'après Higuchi

Rayon [cm]	Forces de Van der Waals $a = 50\text{Å} [cm/s^2]$	Poids [g.cm/s ²]
10^{-5}	3.3×10^{-4}	4.1×10^{-12}
10^{-4}	3.3×10^{-3}	4.1×10^{-9}
10^{-3}	3.3×10^{-2}	4.1×10^{-6}
10^{-2}	3.3×10^{-1}	4.1×10^{-3}
10^{-1}	3.3	4.1

I.3.3. Forces de Coulomb

Charles-Augustin de Coulomb découvre expérimentalement l'expression de la force électrique que s'exercent deux charges électriques immobiles disposées sur des sphères. Coulomb réalise que le module de la force électrique dépend des paramètres suivants :

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

Voici l'expression scalaire de la loi de Coulomb en électrostatique :

$$F_e = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (1.4)$$

Où :

F_e : Force électrique en newton (N) ;

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

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

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

k : Constante de la loi de Coulomb, $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9.10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ et ϵ_0 étant la permittivité du vide.

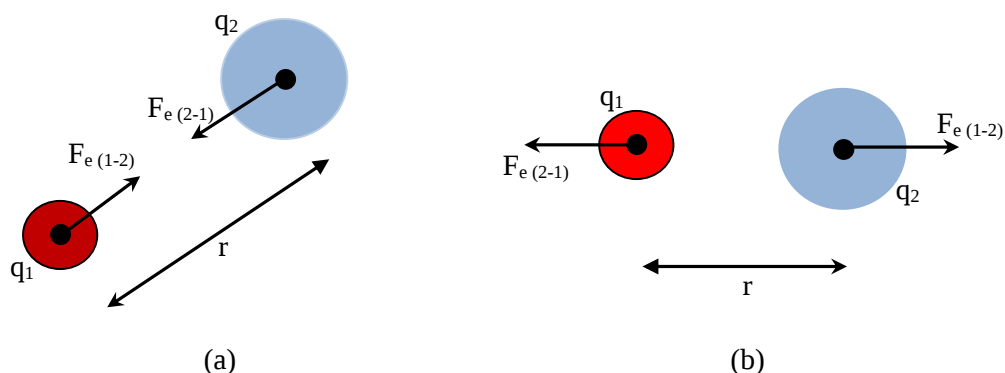


Figure I.6 : Force de coulomb entre deux sphères chargées

(a) : attraction, charges signes contraires ($q_1 q_2 < 0$)

(b) : répulsion, charges signes semblables ($q_1 q_2 > 0$)

Tableau I. 3 : Forces d'interaction électrostatique entre deux sphères chargées

Rayon [cm]	Forces [cm/s^2]	Poids [$g \cdot cm/s^2$] Densité=1
10^{-4}	9×10^{-6}	4.1×10^{-9}
10^{-3}	9×10^{-4}	4.1×10^{-6}
10^{-2}	9×10^{-2}	4.1×10^{-3}
10^{-1}	9	4.1
1	9×10^2	4.1×10^3

Par conséquent, entre deux particules de 1 μm de diamètre, avec le même maximum de charges, la force qui s'exerce est 1000 fois supérieure à celle de la pesanteur. En analysant les deux tableaux, on peut tirer les conclusions suivantes :

- ✓ Les forces de Van der Waals diminuent plus rapidement que les forces électrostatiques, quand la distance entre les particules augmente.
- ✓ Pour des particules de diamètre égal ou inférieur au micron, les forces de Van der Waals sont plus importantes que les forces électrostatiques, lorsque ces particules sont en contact.
- ✓ Quand le diamètre des particules diminue, les forces de van der Waals décroissent plus lentement que les forces électrostatiques.

I.3.4. Forces aérodynamiques

Afin de bien étudier les mouvements des particules dans les procédés de chargement triboélectrique, il va falloir maîtriser les forces aérodynamiques agissant sur ces particules.

Le mouvement d'une particule chargée dans un champ électrostatique a lieu sous l'action de la force suivante :

$$F_i = F_{el}(Q, E_0, x) \pm F_a - F_g \quad (1.5)$$

Où :

F_i : la force d'inertie

F_{el} : la force exercée par un champ électrique uniforme d'intensité E_0 sur une particule chargée, de charge Q , située à une distance x de l'électrode.

F_a : la force aérodynamique et F_g la force gravitationnelle.

La force d'inertie F_i s'exprime par la relation :

$$F_i = W(\rho_s - K_\rho) \frac{dv}{dt} \quad (1.6)$$

Où :

v : la vitesse de particule

K : coefficient de forme [27] (pour les particules sphériques $K=0,5$),

W : le volume d'une particule ayant la densité ρ_s

ρ : densité de l'air.

La force aérodynamique s'écrit :

$$F_a = \frac{C_d \pi R^2 \rho v_r^2}{2} \quad (1.7)$$

C_d étant en fonction du nombre du Reynolds : $Re = \frac{v.L}{\nu_i}$

V : vitesse du fluide [m/s] ;

L : dimension du fluide [m] ;

ν_i : viscosité du fluide [m²/s] ;

v_r : vitesse relative d'une particule dans l'air.

La force de frottement avec l'air est dépendante de la vitesse, cette dépendance peut être très compliquée, et seulement les cas spéciaux peuvent être traités analytiquement.

I.4. Dispositifs de charge

Multiplés travaux ont été publiés sur les procédés de chargement triboélectrique, qui utilisent essentiellement : des ventilateurs, des tubes rotatifs, des lits fluidisés (créés par des soufflantes ou des compresseurs), des micro-cyclones, ou des chargeurs statiques [28-32].

I.4.1. Dispositif de charge par ventilateur

Les principaux éléments de cette installation sont (Figure I-7) : le tube cylindrique isolant en PVC, le moteur à courant continu qui entraîne l'hélice isolante et le support métallique. Le dispositif utilise l'air ascendant qui donne naissance à des turbulences dans le tube contenant le mélange de particules, provoquant ainsi leur tribo-électrification lorsque celles-ci entrent en collisions entre-elles ou avec les parois du tube [33-34]. Le mélange chargé est récupéré en pivotant le cylindre sans procéder à l'arrêt du moteur afin d'éviter l'adhérence des particules aux parois et permettre la récupération complète du contenu.

Notons ici que le matériau du cylindre joue un rôle important dans ce mécanisme de charge et peut être choisi judicieusement en fonction du mélange à traiter, car le nombre de collisions entre particule-paroi est important à cause de la force centrifuge qui tente de projeter les particules entre les parois du dispositif.

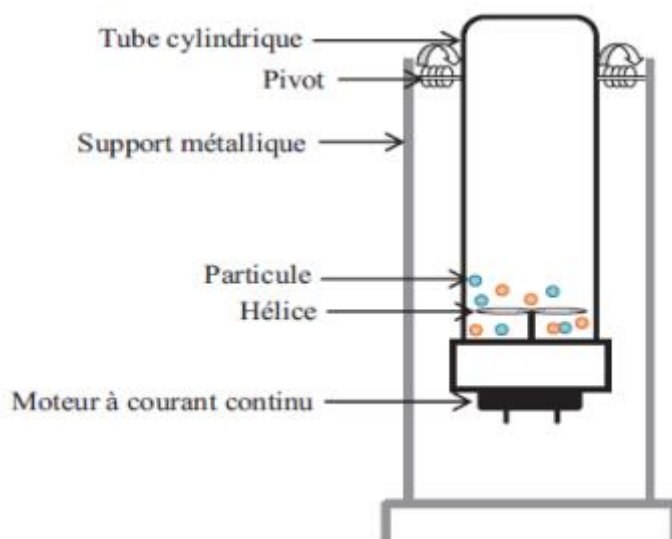


Figure I. 7 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur [33].

Ce dispositif peut être adapté à un fonctionnement continu (Figure I-8) en introduisant les granules par sa partie supérieure, et en les récupérant chargés par sa partie inférieure.

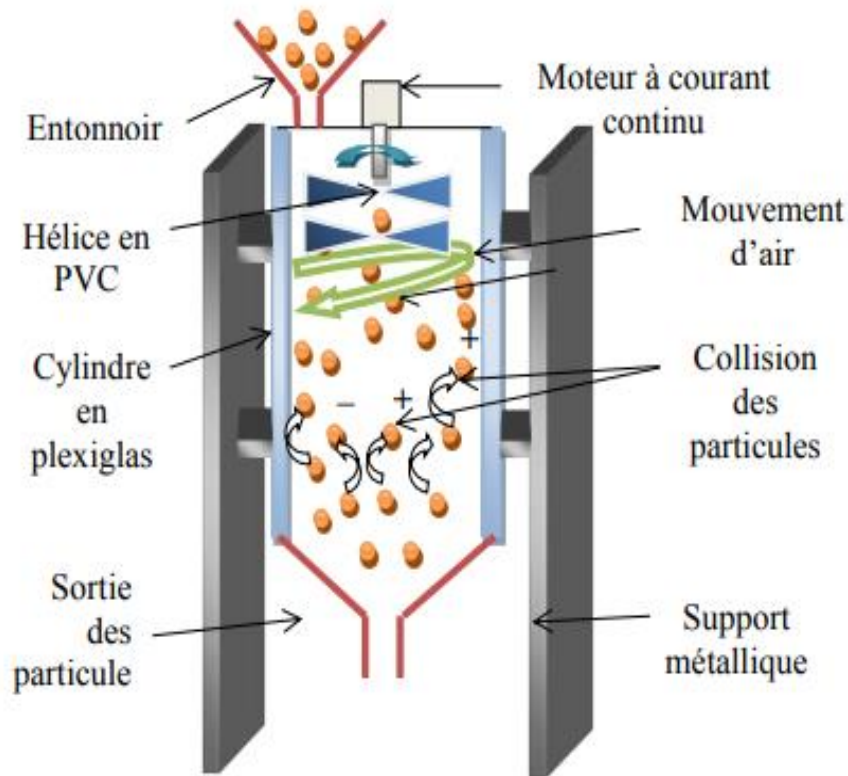


Figure I.8 : Dispositif de charge tribo-électrique à plusieurs hélices et à fonctionnement continu.

I.4.2. Dispositif de charge par cyclone

Les particules qui vont rentrer à l'intérieur du cyclone à l'aide d'un ventilateur se chargent par le contact et frottement contre la paroi du cyclone [35–38]. Les particules descendent vers le bas par le mouvement de l'air qui traverse le cyclone, et atteint le fond. Puis, elles sortent par une ouverture en bas du cyclone. En fin les particules se chargent totalement comme l'explique la figure I.9.

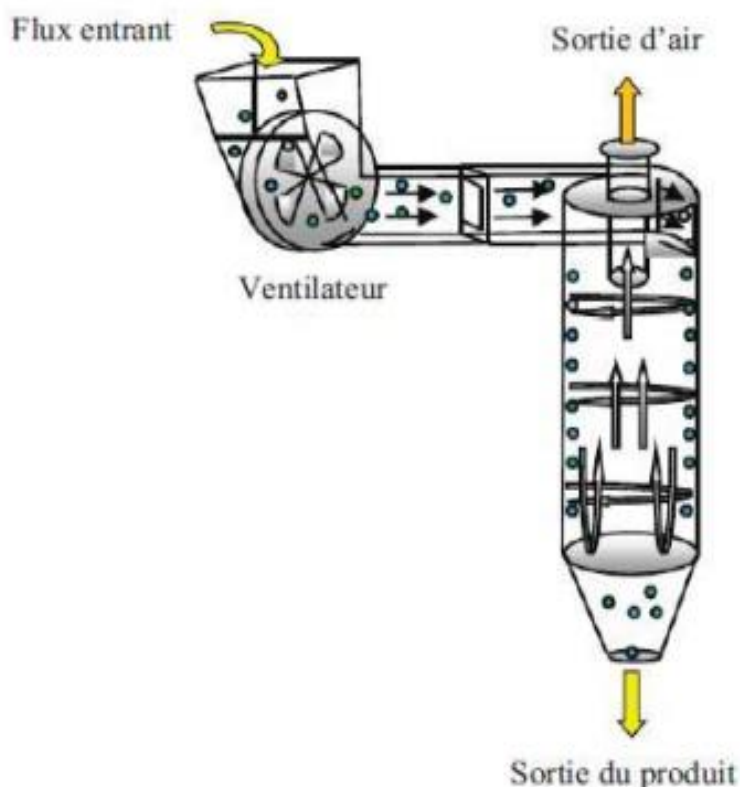


Figure I. 9 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone [39].

I.4.3. Dispositif de charge de type statique

Le dispositif de chargement statique est une enceinte parallélépipédique en matière isolante ou métallique (Figure I-10), à l'intérieur de laquelle sont disposées plusieurs plaques inclinées. Les particules glissent le long de ces plaques par gravitation et se chargent par frottement avec celles-ci (effet tribo-électrique) [35].

La simplicité de la construction est remarquable. L'autre atout de ce dispositif : la possibilité de le doter de plusieurs sets de plaques, de matériaux différents, interchangeables. Ainsi, le dispositif peut être équipé des plaques assurant une charge positive pour un constituant du mélange à séparer et négative pour l'autre. La cinématique des particules à l'intérieur du dispositif favorise aussi les collisions entre particules.

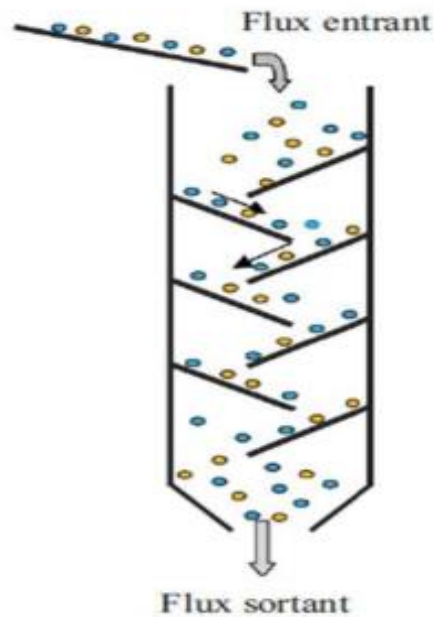


Figure I. 10 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique [35].

I.4.4. Dispositif de charge à lit fluidisé

C'est le procédé le plus utilisé pour le chargement tribo-électrique [40-47]. Le fonctionnement du lit fluidisé dans ces dispositifs est défini par six phénomènes (Figure I.11).

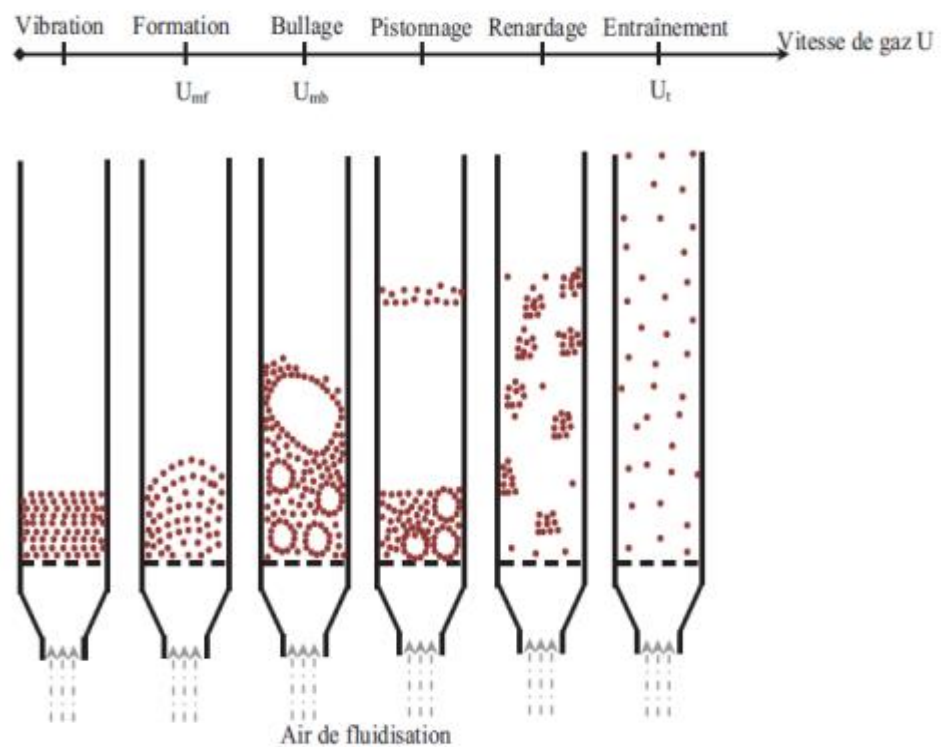


Figure I. 11 : Régimes d'un lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation [42].

- la vibration: pour les plus faibles vitesses du gaz, la couche des particules reste sur le disperseur sans mouvements visibles. Si on augmente encore la vitesse, on observe des vibrations de particules.
- formation: le lit commence à être fluidisé (avoir des caractéristiques des fluides : ondes, petites bulles, viscosité ...) grâce à une vitesse superficielle de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimale de fluidisation U_{mf} , le lit montre une certaine expansion de la couche, on atteint ainsi la transition entre l'état fixe et l'état fluidisé du lit de particules.
- le bullage: à une vitesse de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimum de bullage U_{mb} , des bulles se forment dans la région de la plaque poreuse de distribution de gaz au bas du cylindre, s'élèvent dans le lit, grossissent par coalescence et viennent finalement éclater en surface comme dans le cas d'un liquide à ébullition.
- le pistonage: en excès au-delà de U_{mb} , le diamètre des bulles atteint cette fois des dimensions comparables à celles du cylindre. Il y a alternance dans le lit de passage de grosses bulles et de lit stable. La surface du lit se soulève et retombe de manière très régulière.
- le renardage: les particules s'accolent et créent des passages préférentiels pour le gaz.
- l'entraînement : quand la vitesse du gaz est approximativement égale à la vitesse limite de chute des particules dans le gaz au repos U_t , l'ensemble des particules est alors expulsé hors de la chambre de fluidisation : c'est le phénomène d'entraînement.

I.4.5 Chargement tribo-aéro-électrostatique

Un article récent [36] décrit une combinaison de deux modes de chargement en cascade (Figure I.12). La première section du dispositif assure le chargement triboélectrique en lit fluidisé. Les particules sont dirigées vers la deuxième partie du dispositif, destinée au chargement statique sur des plaques inclinées. Cette solution technique permet de mieux contrôler le processus, multipliant les mécanismes de charge employés.

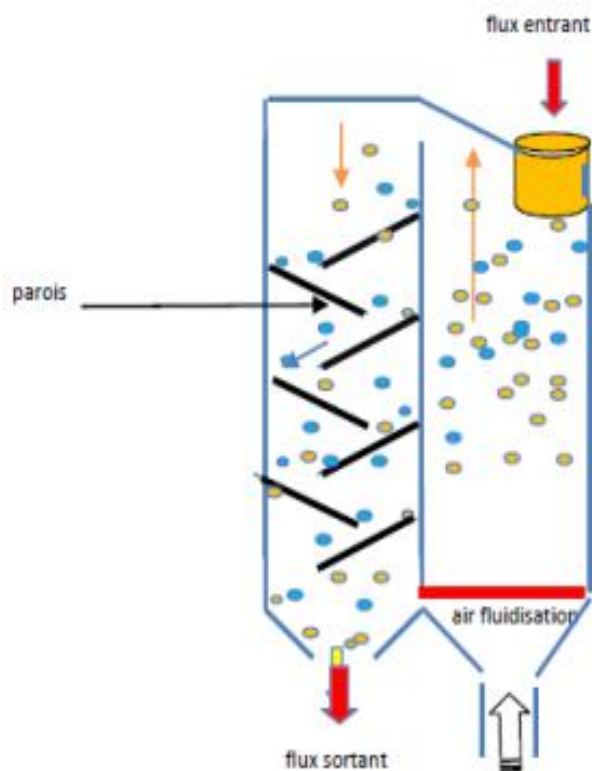


Figure I. 12 : Représentation schématique d'un dispositif composé d'un lit fluidisé et d'un chargeur statique

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions générales relatives aux matériaux plastiques ainsi qu'aux principaux phénomènes électrostatiques impliqués dans leur chargement. Les mécanismes de tribo-électrification, les différentes forces agissant sur les particules granulaires et les principaux dispositifs de chargement utilisés dans la littérature ont également été décrits.

Cette étude bibliographique met en évidence l'importance des paramètres opératoires et des propriétés des matériaux sur l'acquisition de charge électrostatique. Ces connaissances constituent la base nécessaire à la compréhension des travaux expérimentaux présentés dans le chapitre suivant, consacré à l'étude du chargement triboélectrique des particules dans différents dispositifs.

CHAPITRE II :
ETUDE EXPERIMENTALE DES METHODES DE
CHARGEMENT DES PARTICULES

CHAPITRE II : ETUDE EXPERIMENTALE DES METHODES DE CHARGEMENT DES PARTICULES

Introduction

Le résultat de tout processus de séparation électrostatique dépend fortement de la bonne efficacité du chargement des particules. Plusieurs études comparatives ont été menées sur les méthodes de chargement, notamment le chargement par lit fluidisé et le chargement par glissement à l'aide de divers tubes, comme les tubes en aluminium et en PVC. Les résultats concernant l'acquisition de charge diffèrent d'une étude à l'autre.

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus avec les dispositifs de chargement par tube (aluminium, PVC), dont le fonctionnement est basé sur le glissement des particules à l'intérieur du tube. Nous exposerons également les différents résultats sur le chargement triboélectrique obtenus grâce au dispositif à lit fluidisé.

II.1. Matériaux utilisés :

On a utilisé plusieurs types de particules isolantes et composites dans les expériences. Les matériaux étudiés sont largement utilisés dans le domaine de l'équipement électrique et électronique [1-3]. On a étudié les particules suivantes :

- PS NOIR
- ABS BLEU
- PS BLANC
- FIBRE DE CARBONE
- ABS BLANC

Le PS et l'ABS sont des polymères thermoplastiques isolants que l'on trouve couramment dans les équipements électriques et électroniques. La fibre de carbone, elle, est un matériau composite qui possède des propriétés électriques conductrices à semi-conductrices et une excellente résistance mécanique. Elle est largement utilisée dans les domaines de l'aéronautique, de l'automobile, de l'aérospatiale et des matériaux composites avancés.

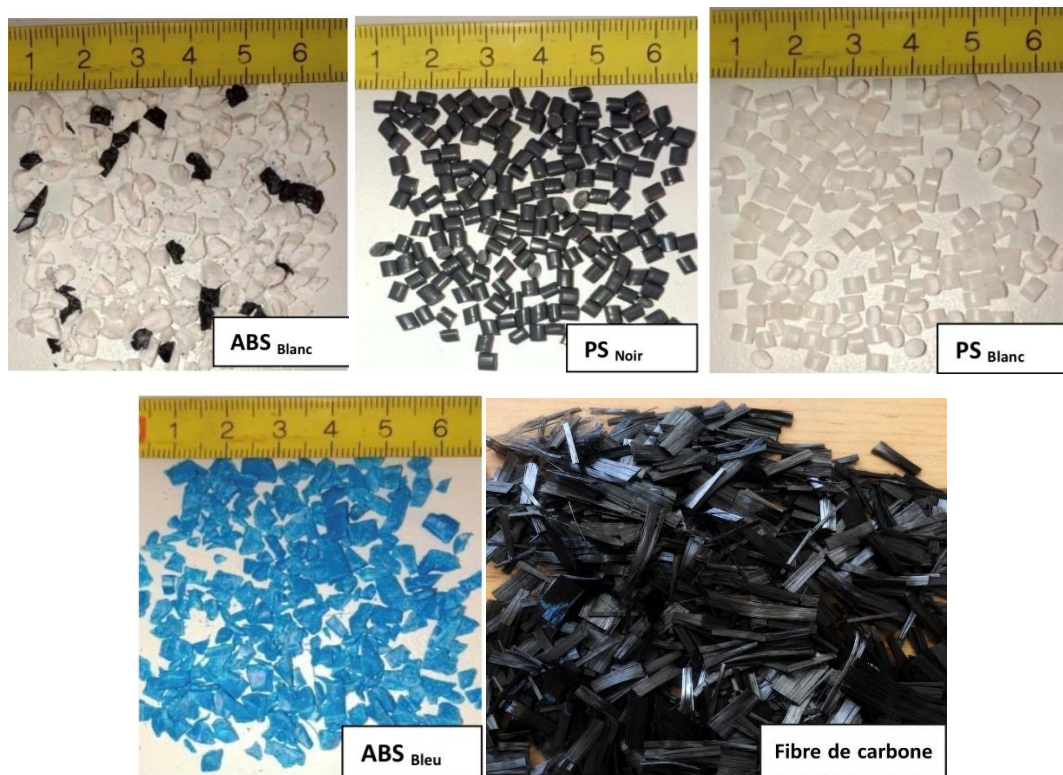


Figure II. 1 : Echantillons de particules utilisés

II.2. Installations expérimentales

II.2.1. Dispositif de chargement triboélectrique à tube :

L'installation est composée d'un tube de diamètre 50 mm et de longueur 640 mm (Figure II.2), qui repose sur un support qui est aussi posé sur une table [48]. Le chargement s'effectue par glissement des particules à l'intérieur du tube incliné.

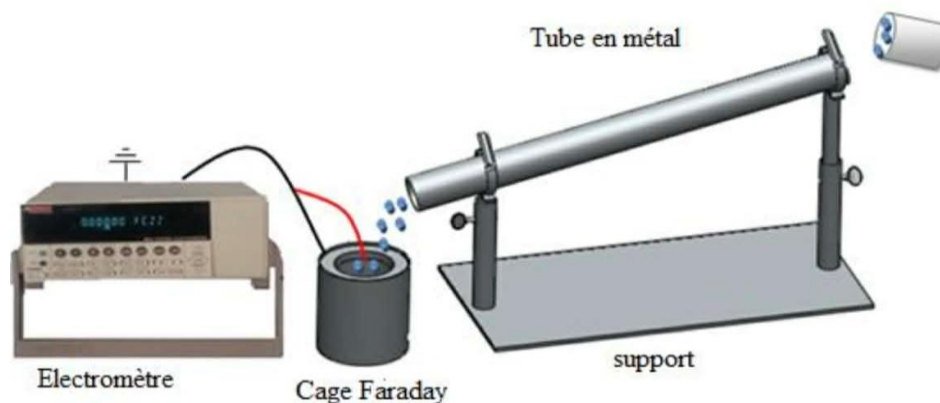


Figure II .2 : Installation de chargement triboélectrique à tube (Solidworks)

Nous avons utilisé deux tubes en aluminium et en PVC, montrés à la figure II.3.



(b) Tube en Aluminium



(c) Tube en PVC

Figure II. 3 : Photos des tubes utilisés pour le chargement par glissement

II.2.2. Dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé :

Le lit fluidisé est formé d'une enceinte principale correspondant à une chambre parallélépipédique en plexiglas transparent, d'une hauteur d'environ 52,9 cm, d'une largeur de 12 cm et d'une profondeur de 13 cm. La paroi supérieure de cette chambre est trapézoïdale de manière à faciliter l'introduction et la circulation du flux d'air dans le dispositif. Ce dernier sert à créer le chargement triboélectrique des particules par les collisions répétées entre les particules elles-mêmes et les parois du système.



Figure II .4 : Dispositif du Chargement tribo-électrique à lit fluidisé

II.3. Matériels et méthode

Après avoir récupéré la matière granulaire chargée, il est impératif de passer par trois techniques de mesure :

II.3.1. Mesure de la charge

Il est primordial de disposer de méthodes permettant d'évaluer la polarité et l'intensité des charges électrostatiques présentes au sein des particules. Cet objectif peut être atteint par la cage de Faraday. La cage de Faraday (figure II.5) est l'un des dispositifs les plus courants pour mesurer la charge des particules tribo-électrisées. Une cage de Faraday est constituée de deux cylindres conducteurs concentriques séparés par un isolant. Le cylindre extérieur est relié à la terre, non seulement pour éviter que les charges extérieures ne soient mesurées mais aussi pour réduire tous les perturbations électriques extérieurs. Le produit dont on doit mesurer la charge est introduit dans le cylindre intérieur. Ce cylindre est isolé de la terre et connecté à un électromètre dont le rôle est de mesurer la charge électrique qui s'y répartit sur la surface extérieure par répulsion électrostatique (les charges de même signe se repoussent le plus loin possible sur la surface) [11].



Figure II .5 : Cage de Faraday utilisés

Afin de mesurer précisément la charge acquise, Un électromètre numérique Keithley modèle 6514 (Figure II.6) a été utilisé, ayant les avantages principaux suivants :

- Mesures de charge de 10fC à $20\text{ }\mu\text{C}$;
- Haute vitesse - jusqu'à 1200 lectures / seconde ;
- Interfaces facilement avec les commutateurs, les ordinateurs et les gestionnaires de composants ;
- Annule les offsets de tension et de courant facilement.



Figure II .6 : Electromètre numérique Keithley modèle 6514

II.3.2. Mesure de l'humidité relative :

Avant de réaliser des expériences de chargement électrostatique (effet triboélectrique) et de séparation électrostatique, il est essentiel de mesurer la température et l'humidité relative, étant donné que les résultats de ces processus sont affectés par les conditions ambiantes. On a utilisé un thermo-hygromètre numérique modèle testo 625.



Figure II .7 : thermo-hygromètre numérique modèle testo 625.

II.3.3. Mesure de la masse granulaire

Il est essentiel de mesurer la masse granulaire de chaque échantillon pour obtenir des résultats expérimentaux qui soient comparables. La figure II.8 montre la balance électronique que nous utilisons pour peser les échantillons. **Spécifiée par :**

- Capacité de 120 à 610g
- Sensibilité 0,0001 g
- Affichage LCD avec rétro-éclairage
- 3 pare-vent en verre
- Taille du plateau $\varnothing$ 80 mm



Figure II. 8 : Balance analytique électronique automatique

II.3.4. Souffleurs et variateur de tension :

Le rôle de souffleur (**Figure II.9**) consiste à envoyer l'air comprimé à la chambre de lit fluidisée où existe le répartiteur d'air au-dessous du cylindre, Un mouvement d'air aléatoirese crée à l'intérieur de la chambre, ce qui donne un frottement des granules. Grâce à la collision entre les particules et entre particules et parois, cette méthode est appelée chargement tribo-électrique par lit fluidisé. On peut appliquer un débit variable selon la tension qui est réglée par un variateur de tension.



Figure II. 9 : Photographie représente variateur de tension avec souffleur

II.4. Résultats et Discussion du dispositif de chargement à tube :

II.4.1. Déroulement de l'expérience :

On a pris l'échantillon du produit utilisées durant nos expériences, puis on a versé l'échantillon dans les tubes de façon uniforme. Les particules de plastique se mettent en frottement par glissement avec la paroi du tube.

Après avoir chargé ces particules tribo- électriquement, elles sont mises dans une cage de faraday pour estimer le taux de la charge acquise.

Les essais ont été réalisés sur les cinq types d'isolants précédemment cités (PS BLANC et NOIR . FIBRE DE CARBON. ABS BLEU , ABS BLANC)

Les paramètres mesurés sont :

- la masse du produit granulaire [g] ;

Le taux d'humidité HR pendant l'étude expérimentale était de l'ordre de 37 % à 67% et la température ambiante T était entre 19°C et 21°C.

Tous les résultats obtenus concernant le taux de chargement des particules sont divisés par la masse granulaire, autrement dit la charge acquise par le matériau granulaire s'exprime en $\mu\text{C/g}$.

- **Les résultats suivants ont été obtenus avec le tube en aluminium pour différentes masses de particules :**

Tableau II. 1: Charge massique ($\mu\text{C/g}$) des particules

Masse (g)	5	10	15	20
Particules				
ABS bleu	-0,000493	-0,0003495	-0,0005347	-0,0007175
PS BLANC	-0,000261	-0,0002015	-0,0002056	-0,0002125
PS noir	-0,00013	-0,00006155	-0,00042	-0,0003275
ABS BLANC	-0,000584	-0,0002625	-0,0002816	-0,0003335
carbon	-0,000178	-0,000095	-0,000746	-0,0007025

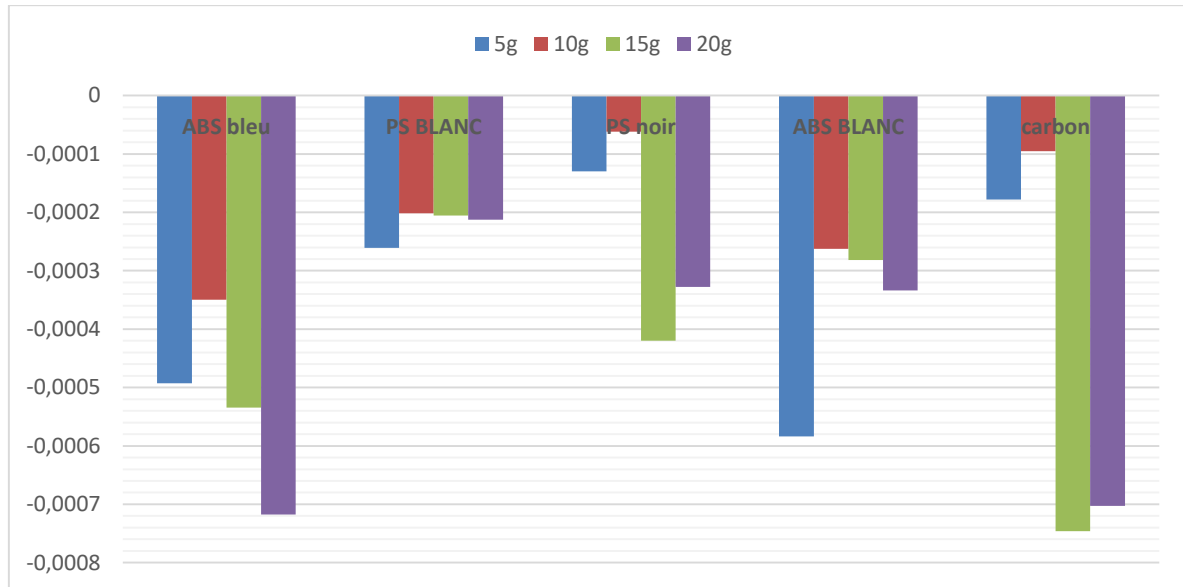


Figure II. 10 : Évolution de la charge acquise en fonction de la masse pour les cinq produits dans le tube en aluminium.

Analyse des résultats :

Le tableau et l'histogramme montrent que les valeurs de la charge massique acquise par les particules sont en grande partie négatives. Cela indique que les particules ont tendance à gagner des électrons lors du contact et du frottement avec la paroi en aluminium. L'intensité de la charge change cependant selon la nature du matériau et la masse utilisée.

ABS bleu : Les valeurs deviennent plus négatives avec l'augmentation de la masse, passant de $-0,000493 \mu\text{C/g}$ à $-0,0007175 \mu\text{C/g}$. Cette progression montre que l'ABS bleu a une bonne capacité de chargement triboélectrique. L'augmentation de la masse favorise l'accumulation des charges électrostatiques.

PS blanc : Les valeurs de charge sont relativement faibles par rapport aux autres matériaux, allant de $-0,000261 \mu\text{C/g}$ à $-0,0002125 \mu\text{C/g}$. Le PS blanc montre donc une faible capacité au chargement électrostatique. L'influence de la masse est limitée car les valeurs varient peu.

PS noir : Pour une masse de 5 g, la charge acquise est faible ($-0,00013 \mu\text{C/g}$), mais sa valeur absolue augmente progressivement avec la masse. Cela montre que l'effet de la masse devient plus

important lorsque la quantité de matière grandit. Le PS noir se charge électriquement, mais moins que les matériaux ABS.

ABS blanc : L'ABS blanc montre l'une des charges négatives les plus élevées observées. Cette forte valeur montre une grande aptitude au chargement triboélectrique. Les charges diminuent légèrement avec l'augmentation de la masse puis se stabiliser.

Fibre de carbone : Les charge acquises sont relativement faibles pour les masses de 5 g et 10g. Et leur valeur absolue augmente nettement pour les masses de 15 g et 20 g. La fibre de carbone présente ainsi un comportement plus sensible au phénomène de chargement électrostatique lorsque la masse augmente.

➤ **Les résultats suivants ont été obtenus avec le tube en PVC pour différentes masses de particules :**

Tableau II. 2 : Charge massique ($\mu\text{C} / \text{g}$) des particules

la masse (g) Les particules	5	10	15	20
ABS bleu	0,000119	0,0002915	0,0003243	0,0003441
PS blanc	0,000672	0,000884	0,0005663	0,00050581
PS noir	0,000941	0,0008706	0,0009725	0,0009856
ABS BLANC	0,000158	0,000293	0,0002326	0,0003635
Fibre carbone	0,0013711	0,00137	0,001589	0,0016

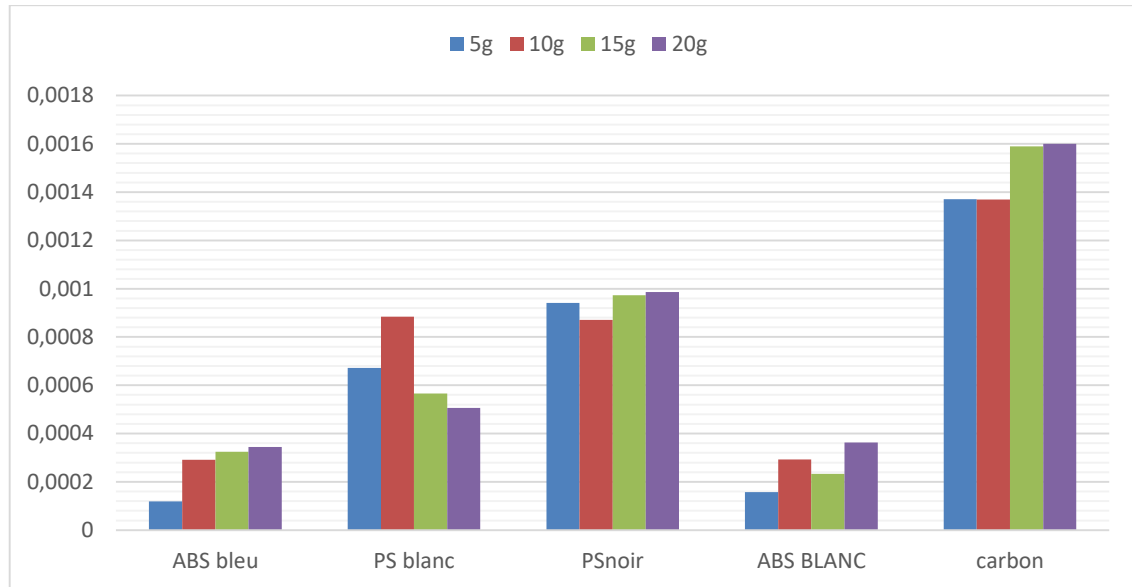


Figure II. 11 : Évolution de la charge acquise en fonction de la masse pour les cinq produits

Analyse des résultats :

La Figure II.12 montre l'évolution de la charge massique des différents matériaux en fonction de la masse des particules dans le tube en PVC. Comme toutes les charges mesurées (contrairement au tube en aluminium) sont positives, Ceci veut dire que les particules ont cédé des électrons lors du contact avec la paroi en PVC et sont donc devenues positivement chargées. L'intensité de la charge dépend de la nature du matériau et de la masse introduite.

ABS bleu : les valeurs augmentent avec la masse, de façon progressive, de 0,000119 à 0,0003441 $\mu\text{C/g}$. Cela indique que l'augmentation de la masse favorise l'accumulation de charge électrique. Les valeurs restent cependant relativement faibles par rapport aux autres matériaux.

PS blanc : Les masses volumiques sont supérieures à celles de l'ABS bleu. On observe une forte augmentation à 10 g (0,000884 $\mu\text{C/g}$) puis une légère diminution aux points 15 g et 20 g. Le matériau a donc une bonne capacité de chargement mais une certaine instabilité.

PS noir : les valeurs sont élevées et quasiment stables : entre 0,0008706 et 0,0009856 $\mu\text{C/g}$. Cela indique que le PS noir est très apte au chargement électrostatique. L'effet de la masse est moins prononcé car les valeurs restent proches.

ABS blanc : les valeurs sont faibles à 5 g (0,000158 $\mu\text{C/g}$) puis augmentent progressivement jusqu'à 0,0003635. Le matériau se charge positivement, mais moins bien que le PS noir ou le carbone.

Fibre de Carbone : Le carbone présente les valeurs les plus élevées de toutes les particules : de 0,0013711 à 0,0016 $\mu\text{C/g}$. Cela indique une très grande capacité d'accumulation de charge électrique. L'augmentation de la masse entraîne une augmentation nette de la charge massique.

II.5. Résultats et Discussion du dispositif de chargement à lit fluidisé :

La difficulté de commande et de réglage des paramètres d'un chargeur tribo-électrostatique réside dans le fait que les signes peuvent s'inverser de manière facile, est très surprenant, c'est une particularité de l'électricité statique. Il est donc très important de formuler l'ensemble des paramètres qui ont une grande influence sur le contrôle de dispositif.

Les essais ont été réalisés sur les cinq types d'isolants précédemment cités séparément, en utilisant une paroi interne de dispositif en PLEXIGLASS.

Les paramètres de contrôle sont :

- le temps de chargement durant chaque expérience [s] ;
- La vitesse de l'air de fluidisation 112.5 à 450 tr/min ;

Le taux d'humidité HR pendant l'étude expérimentale était de l'ordre de 37 % à 67% et la température ambiante T variante entre 19°C et 21.3°C.

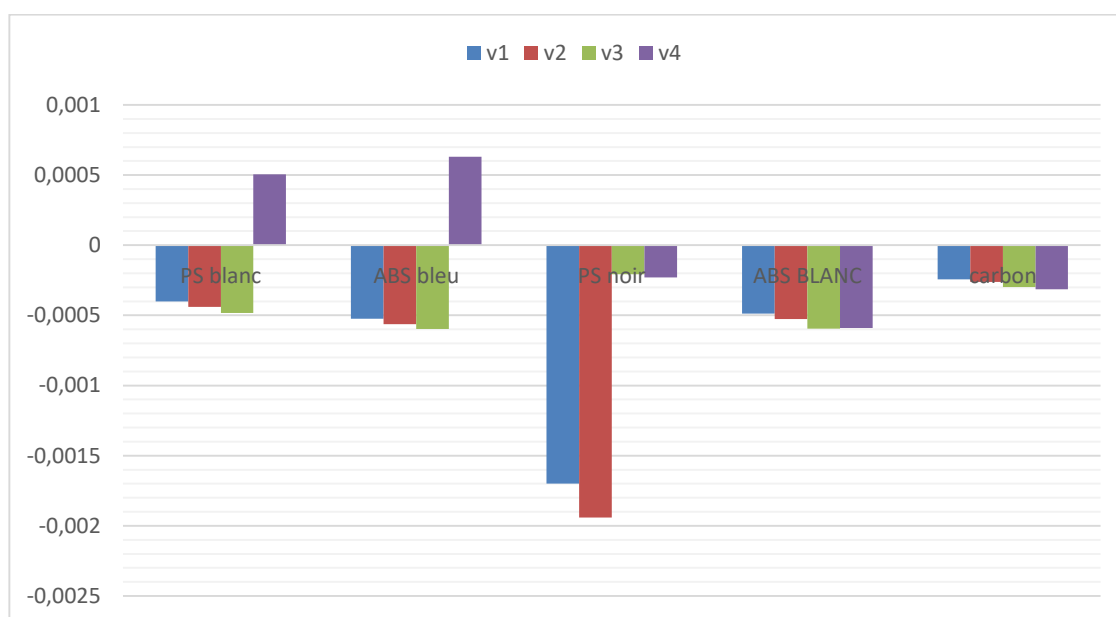
Tous les résultats obtenus concernant le taux de chargement des particules sont divisé par la masse granulaire, autrement dit la charge acquise par le matériau granulaire s'exprime en $\mu\text{C/g}$ (charge massique).

II.5.1 Influence de la vitesse de fluidisation pour une masse de 5 g

La figure II.13 représente l'influence du temps de chargement sur la charge acquise par le produit granulaire, pour $t = 5 \text{ s}$ et la vitesse de rotation du souffleur de 112.5 à 450 tr/min et la masse est maintenu constante $m = 5\text{g}$.

Tableau II. 3 : Charge massique ($\mu\text{C/g}$) des particules en fonction du temps (5s)

Vitesse(tr/min)	112,5	225	337,5	450
Particule				
PS blanc	-0,0004	-0,00044	-0,000482	0,000504
ABS bleu	-0,000524	-0,000562	-0,000598	0,00063
PS noir	-0,0017	-0,00194	-0,000208	-0,00023
ABS BLANC	-0,000488	-0,000526	-0,000594	-0,00059
Fibre de carbone	-0,000244	-0,000262	-0,000298	-0,000314

**Figure II. 12 :** Influence de la vitesse de fluidisation sur la charge acquise par les cinq particules pour un temps de chargement de 5 s.**Tableau II. 4 :** Charge massique ($\mu\text{C/g}$) des particules en fonction du temps (10s)

Vitesse(tr/min) Particule	112,5	225	337,5
ABS bleu	-0,00119	-0,001484	-0,0003
PS BLANC	-0,001044	-0,001302	-0,001362
ABS BLANC	-0,001136	-0,00146	-0,001362
PS NOIR	-0,000244	-0,000406	-0,00053
carbon	-0,00024	-0,00028	-0,000336

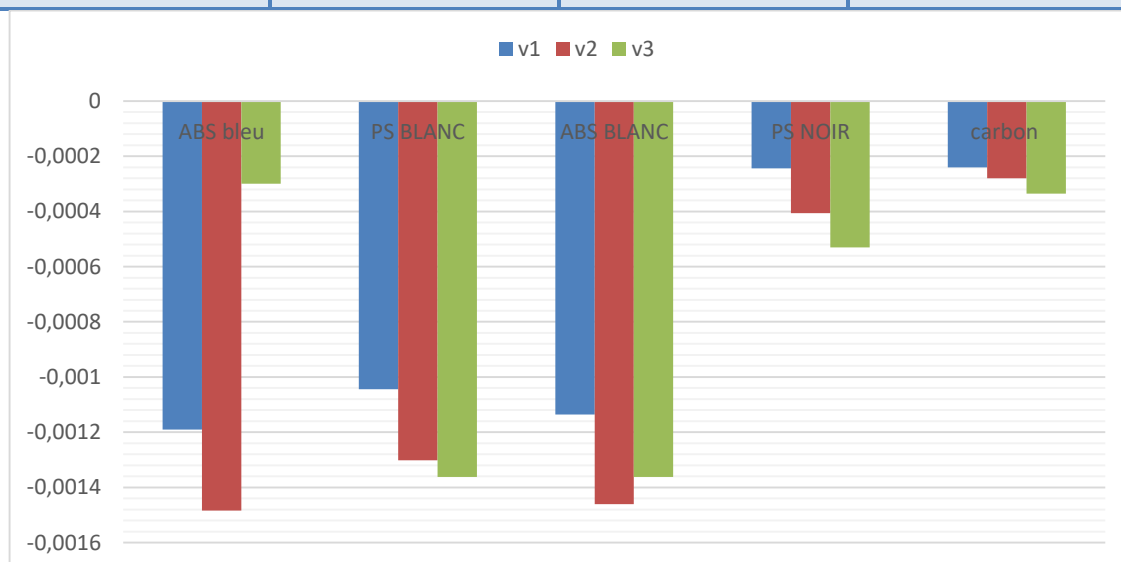


Figure II. 13 : Influence de la vitesse de fluidisation sur la charge acquise par le produit granulaire, pour $t = 15s$ et la Vitesse de rotation du souffleur de 112.5 à 337,5 tr/min et la masse est maintenu constante $m = 5g$.

Tableau II. 5 : Charge massique ($\mu C / g$) des particules en fonction du temps (15s)

masse/v particule	v1	v2	v3
PS noir	-0,000244	-0,00036	-0,000432

PS blanc	-0,001262	-0,001488	-0,001742
ABS BLANC	-0,00124	-0,00189	-0,00212
ABS bleu	-0,001282	-0,001654	-0,001832
carbon	-0,00016	-0,000208	-0,00025

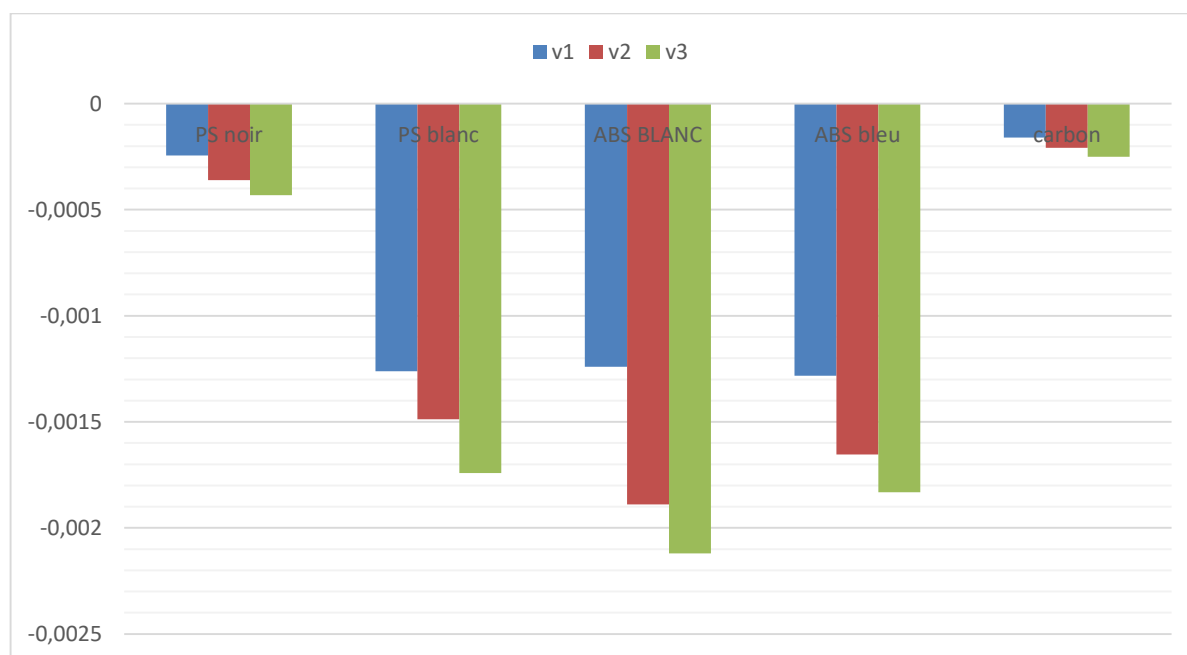


Figure II. 14 : Influence de la vitesse de fluidisation sur la charge acquise par les cinq particules pour un temps de chargement de 15 s.

II.5.2 Influence de la vitesse de fluidisation pour une masse de 10 g

Tableau II. 6 : Charge massique ($\mu\text{C} / \text{g}$) des particules en fonction du temps (5s)

Vitesse (tr/min)	112,5	225	337,5
Particule			
PS blanc	-0,000988	-0,001024	-0,001125
ABS bleu	-0,001019	-0,001243	-0,00128

PS noir	-0,000102	-0,000104	-0,000116
ABS BLANC	-0,001078	-0,001152	-0,001172
carbon	-0,000116	-0,000128	-0,000137

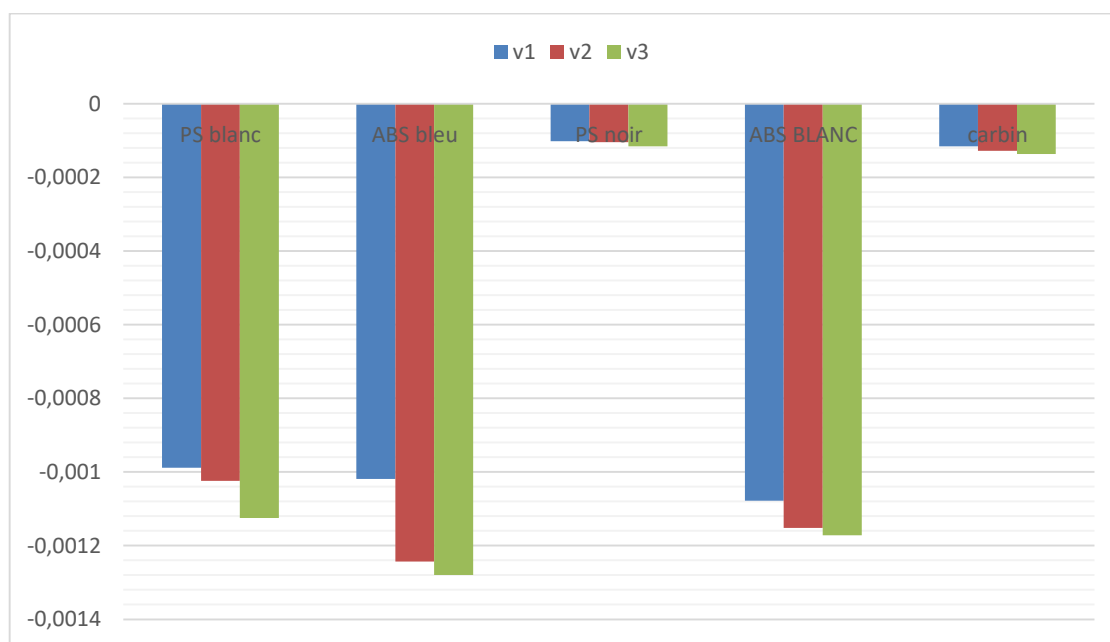


Figure II. 15 : Représente Influence de la vitesse de fluidisation sur la charge acquise par le produit granulaire, pour $t = 10s$ et la Vitesse de rotation du souffleur de 112.5 à 337,5 tr/min et la masse est maintenu constante $m = 10g$.

Tableau II. 7 : Charge massique (nC /g) des particules en fonction du temps (10s)

Vitesse(tr/min)	112,5	225	337,5
Particule			
PS blanc	-0,001134	-0,001323	-0,001422
ABS BLEU	-0,001391	-0,001533	-0,001749
PS noir	-0,0009	-0,0001	-0,00018

ABS BLANC	-0,001471	-0,001515	-0,001594
carbon	-0,00012	-0,000128	-0,000141

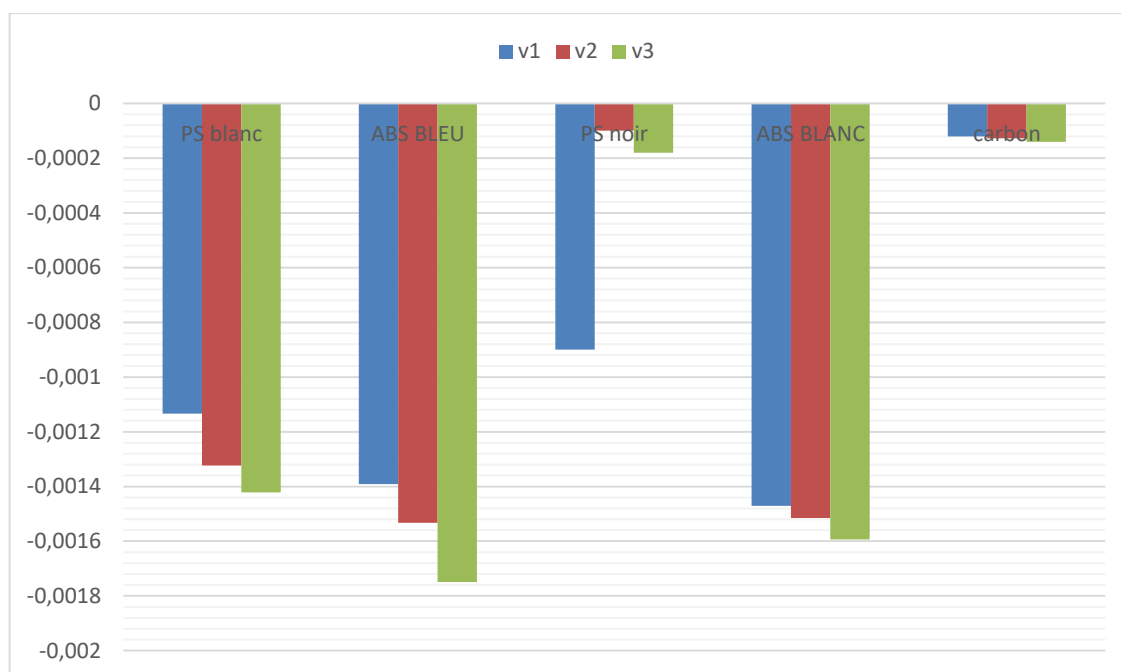


Figure II. 16 : Influence de la vitesse de fluidisation sur la charge acquise par les cinq particules pour un temps de chargement de 10s

Tableau II. 8 : Charge massique ($\mu\text{C/g}$) des particules en fonction du temps (15s)

Vitesse(tr/min)	112,5	225	337,5
Particule			
PS blanc	-0,001593	-0,00161	-0,001637
ABS bleu	-0,001522	-0,001658	-0,001824
PS noir	-0,000135	-0,000147	-0,000163
ABS BLANC	-0,015	-0,0152	-0,01608

carbon	-0,000125	-0,000131	-0,000148
---------------	-----------	-----------	-----------

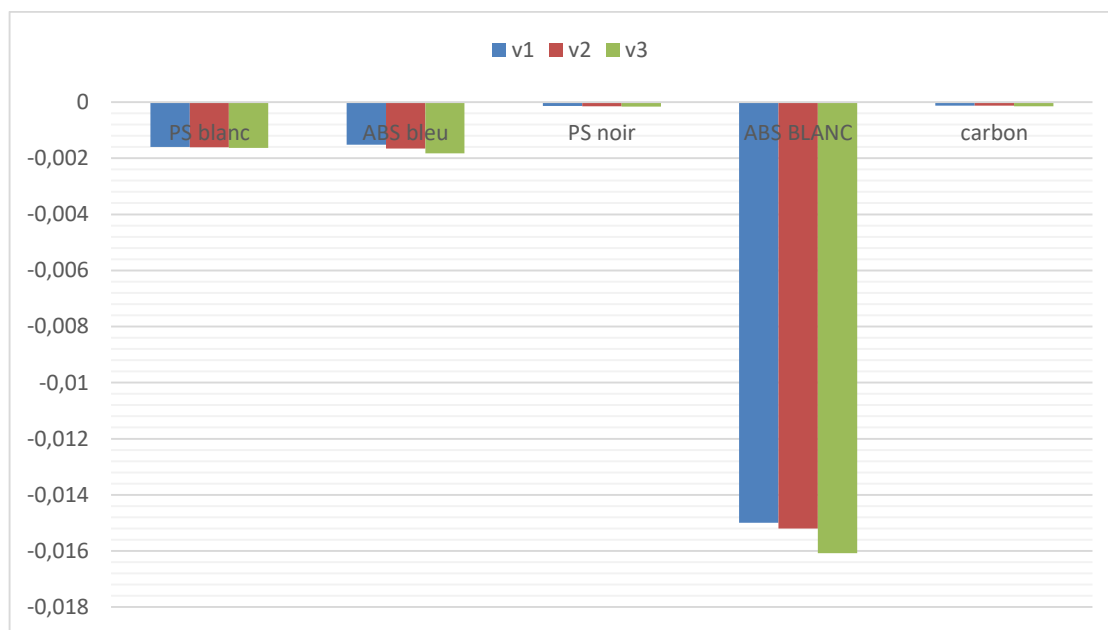


Figure II.17 : représente Influence de la vitesse de fluidisation sur la charge acquise par le produit granulaire, pour $t = 5s$ et la Vitesse de rotation du souffleur de 112.5 à 337,5 tr/min et la masse est maintenu constante $m = 15g$.

II.5.3 Influence de la vitesse de fluidisation pour une masse de 15 g

Tableau II. 9 : Charge massique (nC /g) des particules en fonction du temps (5s)

Vitesse(tr/min)	112,5	225	337,5
Particule			
Ps blanc	-0,000663	-0,000693	-0,000698
Abs bleu	-0,001016	-0,001066	-0,0012053
Abs blanc	-0,00074	-0,00078	-0,000795
Ps noir	-0,000073	-0,000079	-0,000086
carbon	-0,000008	-0,0000913	-0,0000953

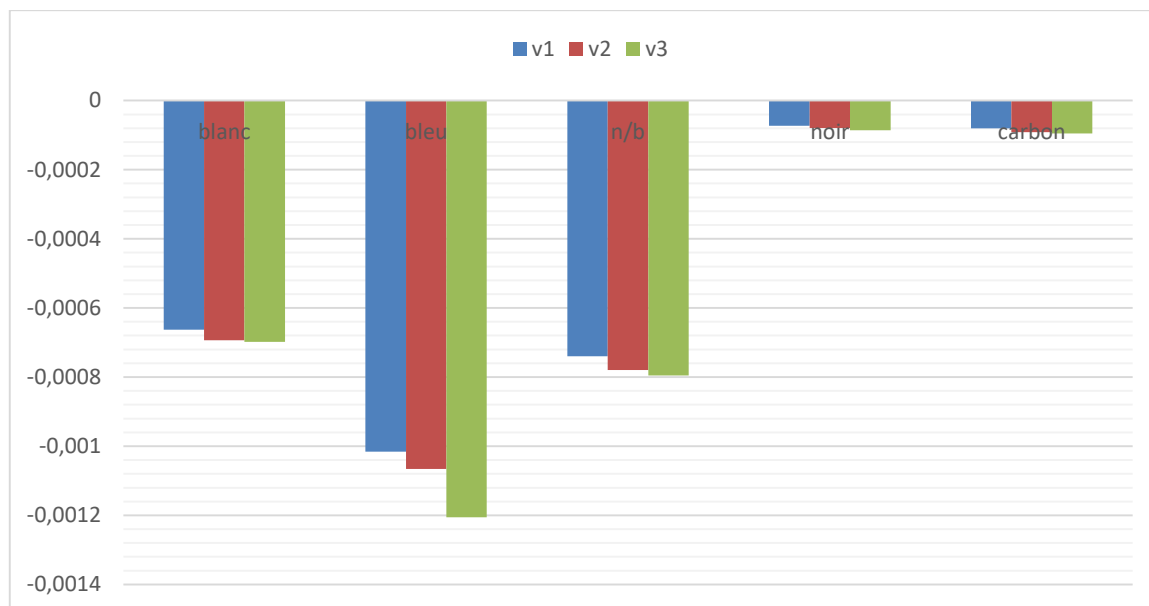


Figure II. 18 : Influence de la vitesse de fluidisation sur la charge acquise par les cinq particules pour un temps de chargement de 5s

Tableau II. 10 : Charge massique ($\mu\text{C} / \text{g}$) des particules en fonction du temps (10s)

Vitesse (tr/min)	112,5	225	337,5
Particule			
PS blanc	-0,000773	-0,00093	-0,000948
ABS bleu	-0,000953	-0,0001031	-0,001174
ABS BLANC	-0,0009887	-0,00101	-0,00107
PS noir	-0,0000693	-0,000087	-0,00009
carbon	-0,000079	-0,000087	-0,00009

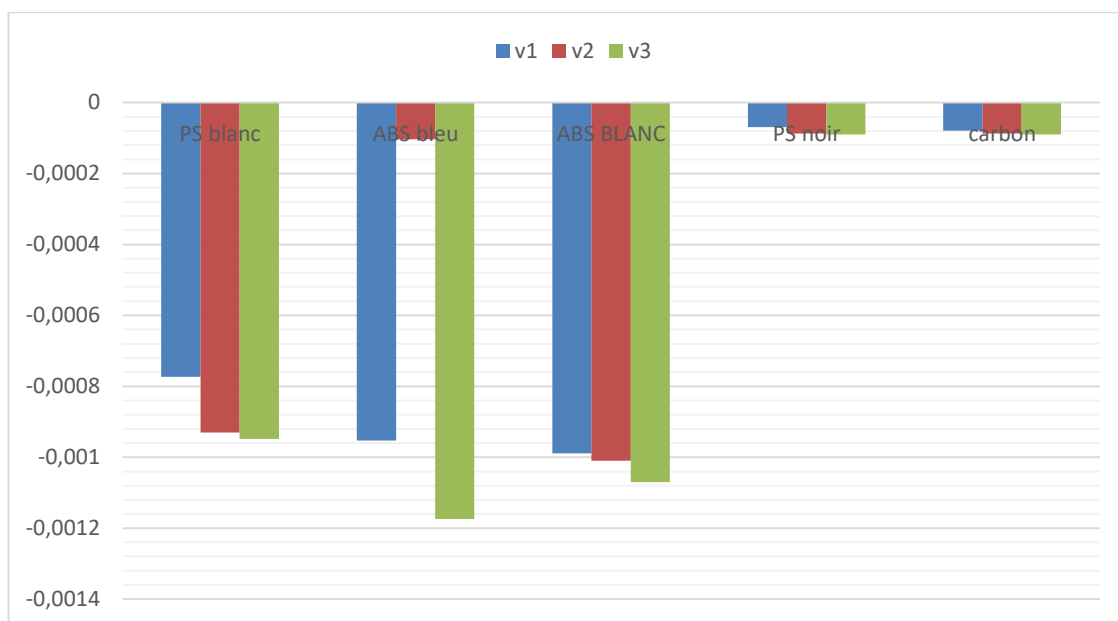


Figure II. 19: représente Influence de la vitesse de fluidisation sur la charge acquise par le produit granulaire, pour $t = 15s$ et la Vitesse de rotation du souffleur de 112,5 à 337,5 tr/min et la masse est maintenue constante $m = 15g$.

Tableau II. 11 : Charge massique ($\mu C / g$) des particules en fonction du temps (15s)

Vitesse (tr/min)	112,5	225	337,5
Particule			
PS blanc	-0,005064	-0,001082	-0,001095
ABS bleu	-0,0010187	-0,001109	-0,001223
ABS BLANC	-0,001007	-0,001015	-0,001085
PS noir	-0,000095	-0,0001007	-0,0001127
carbon	-0,000087	-0,000091	-0,000102

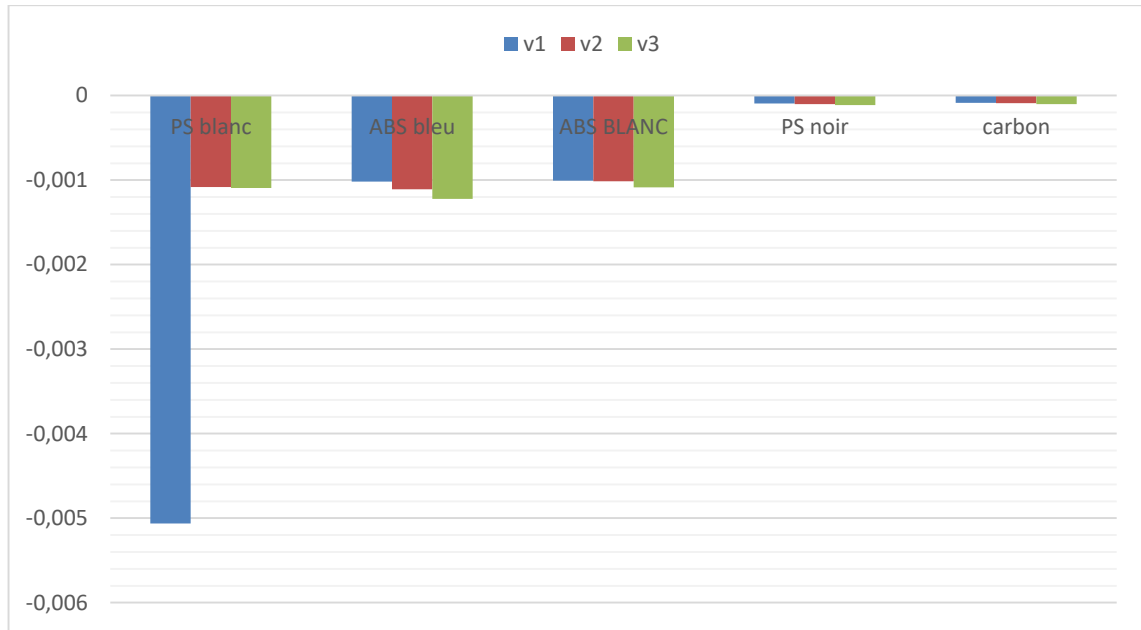


Figure II. 20 : Influence de la vitesse de fluidisation sur la charge acquise par les cinq particules pour un temps de chargement de 15s

Interprétation des résultats :

Un lit fluidisé est un système dynamique où les particules granulaires sont suspendues et continuellement agitées par un flux ascendant d'air. Ce mouvement entraîne des collisions répétées et aléatoires entre les particules elles-mêmes et entre les particules et les parois en Plexiglas. C'est justement cette répétition des contacts qui provoque le transfert de charges par effet triboélectrique.

Toutes les charges mesurées sont négatives, sauf de rares exceptions. Ce résultat est en accord avec la place du Plexiglas (PMMA) dans la série triboélectrique : le PMMA a tendance à donner des électrons aux matériaux polymères qui sont en contact avec lui, et les rend donc négativement chargés.

L'augmentation de la vitesse de rotation du souffleur ($112,5 \rightarrow 337,5$ tr/min) entraîne, pour la majorité des matériaux, une augmentation de la charge en valeur absolue. L'explication est mécanique : la vitesse de l'air étant plus élevée, l'énergie cinétique des particules augmente, et par conséquent le nombre et l'intensité des collisions s'accroissent. C'est à l'occasion de ces impacts que se fait le transfert électronique à l'interface particule-paroi.

On observe toutefois à 450 tr/min pour le PS blanc et l'ABS bleu ($t = 5$ s) un phénomène très significatif : inversion du signe de la charge (passage de négatif à positif). Ce comportement,

surprenant à première lecture, est en réalité caractéristique de l'électricité statique en régime fluctuant. Au-delà d'un certain seuil de vitesse, la nature du mécanisme de contact dominant change : les collisions particule-particule, devenant majoritaires sur les contacts particule-paroi, inversent la dynamique de transfert de charge.

Pour une vitesse et une masse spécifiques, l'extension de la durée d'exposition (5 s $\rightarrow$ 15 s) provoque invariablement une augmentation de la charge en valeur absolue. On s'attend physiquement à ce résultat : plus les particules demeurent en mouvement, plus les contacts s'accumulent et plus le volume de charges transférées augmente. On s'approche graduellement de la charge de saturation spécifique à chaque matériau.

L'examen des résultats selon les trois niveaux de masse (5 g, 10 g, 15 g) montre un lien non monotone:

L'augmentation de 5 g à 10 g entraîne habituellement une hausse de la charge massique, ce qui est compréhensible, car une plus grande quantité de matière procure plus de surface de contact disponible.

Par contre, à 15 g, on observe généralement une tendance à la diminution ou à la stabilisation de la charge massique pour divers matériaux. Lorsque le niveau de charge dépasse un certain seuil, les particules commencent à interférer les unes avec les autres, ce qui diminue leur mobilité individuelle et par conséquent l'efficacité des collisions. En outre, il est possible de neutraliser partiellement les charges acquises par certaines particules grâce à des interactions ultérieurs avec des particules de polarité opposée.

Conclusion

Les essais expérimentaux effectués dans ce chapitre ont permis d'évaluer le comportement triboélectrique de cinq types de particules à l'aide de deux dispositifs de chargement : le chargement par glissement dans des tubes d'aluminium et de PVC, et le chargement par lit fluidisé en plexiglas. Les résultats ont montré que la nature du matériau de paroi, la masse des particules, le temps de chargement et la vitesse de fluidisation influencent fortement la polarité et l'intensité de la charge acquise. Les données expérimentales ainsi obtenues constitueront la base de l'étude numérique et de la modélisation par intelligence artificielle présentées au chapitre suivant.

CHAPITRE III :

**DÉVELOPPEMENT D'UN ALGORITHME
D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR LA
DÉTERMINATION DE L'ÉTAT DE CHARGE
ÉLECTROSTATIQUE**

CHAPITRE III : DÉVELOPPEMENT D'UN ALGORITHME D'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR LA DÉTERMINATION DE L'ÉTAT DE CHARGE ÉLECTROSTATIQUE

Introduction

L'intelligence artificielle est aujourd'hui une des avancées majeure de la recherche appliquée, notamment grâce à son intégration dans les domaines de l'ingénierie et des sciences expérimentales. L'IA, grâce à ses capacités d'apprentissage automatique, de reconnaissance de motifs et de modélisation de phénomènes non linéaires, ouvre de nouvelles perspectives pour l'analyse et la prédiction de grandeurs physiques complexes. Les approches analytiques classiques, reposant sur des modèles physiques simplifiés, ont du mal à rendre compte de la richesse des interactions entre les variables expérimentales — nature des paroi, type de matériau, masse des particules, vitesse de l'air et humidité — et la charge mesurée. L'apprentissage automatique, et même les méthodes d'ensemble telles que la Forêt Aléatoire (« Random Forest »), permet de dépasser ces limites en construisant directement à partir des données expérimentales un modèle de prédiction, sans nécessiter d'hypothèses a priori sur la forme des relations.

Dans ce chapitre, nous décrivons le développement complet d'un algorithme d'IA, implémenté en Python, qui prédit la charge massique électrostatique ainsi que l'état de charge qui lui est associé. Il décrit dans l'ordre l'environnement de développement choisi, la structure des données expérimentales utilisées, l'architecture pas à pas de l'algorithme, les résultats obtenus et leur analyse critique à partir de cinq graphiques.[50]

III.1. Environnement de développement : le langage Python

III.1.1. Présentation générale

Python est un langage de programmation interprété, créé en 1989 par Guido van Rossum et publié publiquement en 1991. Son développement est aujourd'hui assuré par la **Python Software Foundation (PSF)**. Multiplateforme, gratuit et open source, il s'est imposé comme langage de référence dans les domaine de la science des données et de l'intelligence artificielle, comme en attestent les classements TIOBE et IEEE Spectrum qui le placent

régulièrement en première position mondiale. La version utilisée dans ce travail est Python 3.14.[50]

III.1.2. Pourquoi Python pour ce travail ?

Le choix de Python pour ce projet repose sur trois arguments fondamentaux :

Simplicité et lisibilité : la syntaxe épuré de Python permet de se concentrer sur la logique de l'algorithme plutôt que sur les détails techniques du langage.

Richesse de l'écosystème scientifique : Python dispose de bibliothèques spécialement conçues pour le traitement de donnée et l'apprentissage automatique, matures et largement validées par la communauté scientifique.

Interopérabilité : Python lit nativement les fichiers Excel, ce qui permet une intégration directe des données expérimentales sans étape de conversion intermédiaire.

III.1.3. Bibliothèques utilisées

Le tableau suivant récapitule le bibliothèque employée dans l'algorithme développé, avec leurs rôle spécifique :

Tableau III. 1 : Bibliothèques Python utilisées dans l'algorithme

Bibliothèque	Version	Rôle dans l'algorithme
pandas	≥ 1.5	Lecture du fichier Excel, manipulation et exploration des données
NumPy	≥ 1.24	Calculs numériques matriciels, calcul des métriques (RMSE)
Matplotlib	≥ 3.7	Génération des 5 graphiques d'analyse et de visualisation

Scikit-learn	≥ 1.2	RandomForestRegressor, StandardScaler, LabelEncoder, métriques
--------------	------------	--

III.2. Présentation du donnée expérimentale

III.2.1. Source et structure du jeu de données

Les données utilisées proviennent des essais de triboélectrification réalisés en laboratoire et décrits au Chapitre II. Elles sont consignées dans un fichier Excel (« Data.xlsx »), feuille « Données_expérimentales ». Ce jeu de données comprend **172 échantillons** et **10 variables**, couvrant 2 méthodes expérimentales : la méthode par tube (méthode 1) et la méthode par lit fluidisé (méthode 2).

Tableau III. 2 : Description des 10 variables du jeu de données expérimentales

Variable	Type	Description	Plage
methode	Entier	1 = tube (PVC/Alu) ; 2 = lit fluidisé (Plexiglas)	1 – 2
paroi	Catégorielle	Nature de la paroi (PVC, Aluminium, Plexiglas)	3 modalités
matériau	Catégorielle	Type de particule (PS blanc, ABS bleu, PS noir, ABS blanc, Fibre Carbone)	5 modalités
masse_g	Réel (g)	Masse de particules introduites	5 – 20 g
temps_s	Entier (s)	Durée de l'expérience	5 – 15 s

vitesse_air	Réel (m/s)	Vitesse de l'air (0 pour méthode 1)	0 – 3 m/s
humidite	Entier (%)	Humidité relative de l'air	40 – 45 %
taille_mm	Réel (mm)	Taille caractéristique des particules	2 mm
charge_massique	Réel (C/kg)	Variable cible : charge électrostatique massique	Variable
état_charge	Entier	Polarité : +1 (positif/PVC) ; -1 (négatif/Alu, Plexiglas)	-1 ; +1

III.2.2. Observations préliminaires

L'analyse du jeu de données met en évidence plusieurs tendances physiquement cohérentes. Les parois en PVC créent toujours des charges positives (de l'ordre de 10^{-3} C/kg), alors que les parois en Aluminium et en Plexiglas donnent lieu à des charges négatives. Cette attitude dépend directement de la position relative des matériaux dans la série triboélectrique standard. Par ailleurs, dans l'intervalle de 5 g à 20 g, l'effet de la masse de particules sur l'intensité de la charge accumulée est modéré, et que la vitesse de l'air et la durée d'exposition ont une influence importante.

III.3. Architecture et développement de l'algorithme

L'algorithme développé suit un pipeline structuré en six étapes successive, de la lecture des données brutes jusqu'à la production des visualisations graphique. Chaque module est indépendante, ce qui facilite la maintenance et l'extension de l'outil.

Tableau III. 3 : Pipeline de traitement de l'algorithme développé

Étape	Module	Opérations principales
1	Lecture	Importation Excel, vérification structurelle, statistiques descriptives
2	Prétraitement	Encodage LabelEncoder (paroi, matériau), normalisation StandardScaler
3	Partition	Séparation 80 % / 20 % (apprentissage / test), graine aléatoire fixée
4	Entraînement	Ajustement Random Forest Regressor (200 arbres, random_state=42)
5	Évaluation	Prédiction sur l'ensemble de test, calcul R^2 , MAE, RMSE
6	Visualisation	Génération de 5 graphiques, tableau de prédictions

III.3.1. Étape 1 — Lecture et exploration des données

La première étape charge le fichier Excel à l'aide de la fonction `pd.read_excel()` de la bibliothèque Pandas. Après l'importation, le programme vérifie la dimensionnalité de tableau, affiche les noms des colonnes et produit le résumé statistique pour chaque variable. Cette étape garantit l'intégrité des données avant tout traitement.

Étape 1 — Lecture des données expérimentales

```
df = pd.read_excel('Data.xlsx', sheet_name='Donnees_experimentales')
print(f'Données chargées : {df.shape[0]} échantillons, {df.shape[1]} variables')
print(df.describe())
```

III.3.2. Étape 2 — Prétraitement des données

Le prétraitement comprend deux opérations essentielles. La première étape consiste à encoder les variables qualitatives : les colonnes « paroi » et « matériau », de type textuel, sont transformées en valeurs entières grâce à LabelEncoder. La seconde est la mise à l'échelle : toutes les variables numériques sont centrées et réduites par le StandardScaler, pour aucune variable à grande échelle ne domine de façon artificielle le processus d'apprentissage.

```
# Étape 2 — Encodage et normalisation
```

```
le_proi = LabelEncoder()
```

```
le_materiau = LabelEncoder()
```

```
df['paroi_enc'] = le_proi.fit_transform(df['paroi'])
```

```
df['materiau_enc'] = le_materiau.fit_transform(df['materiau'])
```

```
features = [methode, 'paroi_enc', 'materiau_enc',
```

```
             'masse_g', 'temps_s', 'vitesse_air', 'humidite', 'taille_mm']
```

```
scaler = StandardScaler()
```

```
X_norm = scaler.fit_transform(df[features])
```

III.3.3. Étape 3 — Partition apprentissage / test

Le jeu de données est séparé en deux sous-ensembles grâce à `train\_test\_split` : 80 % des données sont utilisées pour entraîner le modèle, et 20 % sont gardées pour tester ses performances sur des échantillons qu'il n'a jamais vus. En fixant random_state=42, on s'assure que les résultats sont strictement reproductibles.

```
# Étape 3 — Partition 80 / 20
```

```
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(
```

```
    X_norm, y, test_size=0.20, random_state=42
```

```
)
```

```
# Apprentissage : ~138 échantillons | Test : ~34 échantillons
```

III.3.4. Étape 4 — Entraînement du modèle Random Forest

L'algorithme principal choisi est le Random Forest Regressor. C'est une méthode d'ensemble qui crée de nombreux arbres de décision à partir de sous-échantillons aléatoires des données. Ensuite, il calcule la prédiction finale en moyennant les résultats individuels. Cette structure protège le modèle du surapprentissage et lui donne une grande robustesse face à la variabilité expérimentale. Le modèle utilise 200 arbres de décision, sans limitation de profondeur.

```
# Étape 4 — Entraînement Random Forest
```

```
model = RandomForestRegressor(  
    n_estimators=200,  
    max_depth=None,  
    random_state=42,  
    n_jobs=-1)  
model.fit(X_train, y_train)
```

III.3.5. Étape 5 — Prédiction et évaluation des performances

Le modèle est appliqué à l'ensemble de test. 3 métriques standards évaluent la qualité des prédictions :

R^2 (Coefficient de détermination) : proportion de la variance de la charge massique expliquée par le modèle. Une valeur proche de 1 indique un modèle excellent.

MAE (Mean Absolute Error) : erreur absolue moyenne entre les valeurs réelles et prédites, exprimée en C/kg.

RMSE (Root Mean Square Error) : racine de l'erreur quadratique moyenne, qui pénalise davantage les grands écarts de prédiction.

Étape 5 — Prédiction et métriques

```
y_pred = model.predict(X_test)  
mae = absolute_error(y_test, y_pred)  
rmse = np.sqrt(mean_squared_error(y_test, y_pred))  
r2 = r2_score(ytest, y_pred)  
print(f'R² = {r2:.4f}')  
print(f'MAE = {mae:.6f} C/kg')  
print(f'RMSE = {rmse:.6f} C/kg')
```

Les résultats obtenus sur l'ensemble de test sont les suivants :

Tableau III. 4 : Métriques de performance du modèle Random Forest Regressor

Métrique	Valeur obtenue	Interprétation
R^2	0.7926	Le modèle explique 79.26 % de la variance de la charge massique
MAE	0.000558 C/kg	Erreur absolue moyenne de l'ordre de 0.56×10^{-3} C/kg
RMSE	0.001241 C/kg	Erreur quadratique faible par rapport à la plage de valeurs
Err. relative moy.	~30 – 40 %	Amplifiée par les échantillons à charge proche de zéro

III.4. Analyse des résultats et visualisations graphiques

L'étape 6 de l'algorithme produit automatiquement 5 graphique destinées à analyser les résultats sous de angles complémentaires : validation du modèle, analyse physique des variables et interprétabilité de l'IA. Ces figures sont générés en haute résolution et sauvegardés automatiquement.

III.4.1. Comparaison charges réelles vs charges prédites

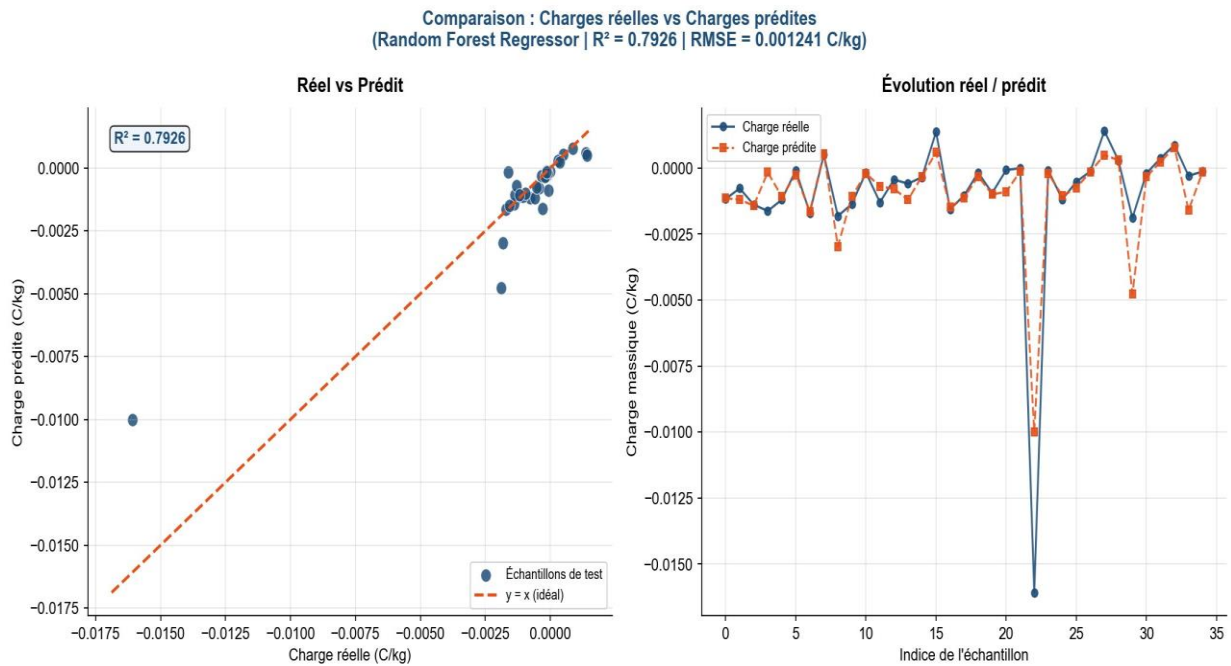


Figure III. 1 Comparaison des charges réelle et prédite par le modèle Random Forest ($R^2 = 0.7926$)

Cette figure est composée de deux panneaux complémentaires. Le panneau de gauche, intitulé « Réel vs Prédit », montre pour chaque échantillon de l'ensemble de test la charge mesurée en abscisse et la charge prédite en ordonnée. La droite en tirets oranges matérialise la cible idéale $y = x$: plus les points s'en rapprochent, meilleure est la prédiction. On voit que presque tous les échantillons sont bien alignés sur cette droite entre -0.003 C/kg et $+0.001$ C/kg. Deux points s'en éloignent beaucoup : un près de -0.005 C/kg et un autre autour de -0.016 C/kg. Ces différences viennent d'échantillons dont les conditions expérimentales (masse élevé, durée maximal, Plexyglas) ne sont pas très représentées dans l'ensemble d'apprentissage. Le panneau de droite, intitulé « Évolution réel / prédit », montre comment changent indice par indice les deux courbes. La très bonne sur la majorité des échantillons où les courbes bleue et orange se superposent presque parfaitement confirme la qualité du modèle sur les configurations expérimentales les plus fréquentes.

III.4.2. Charge massique en fonction de la masse des particules

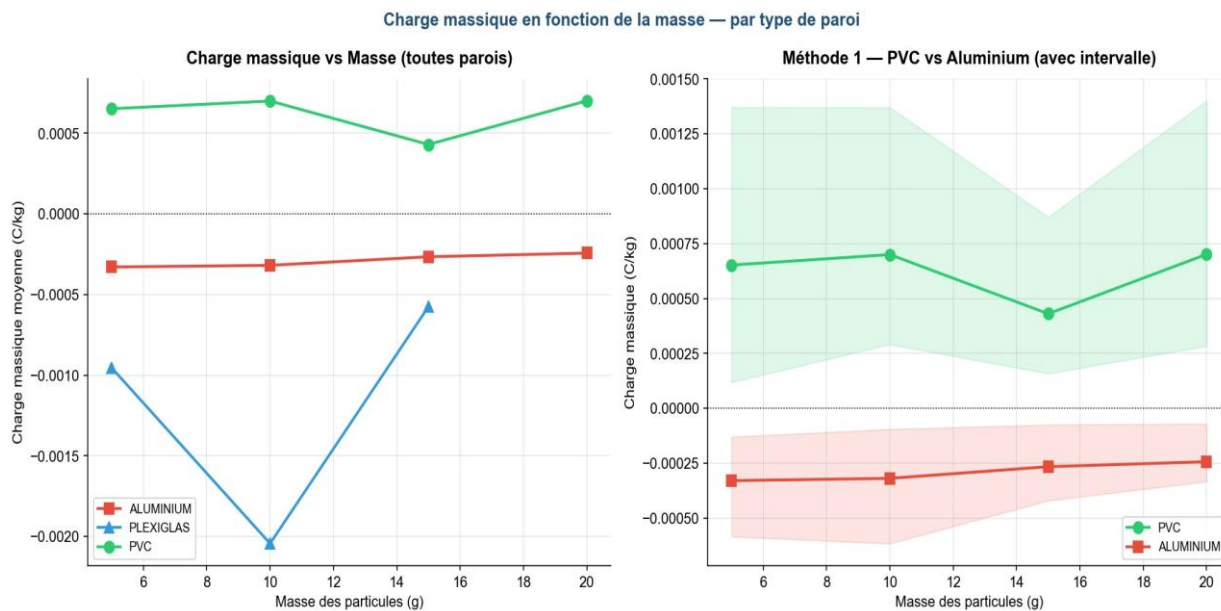


Figure III. 2 : Évolution de charge massique en fonction de la masse pour les trois types de parois

La Figure III.2 montre l'effet de masse des particules sur la charge massique pour les trois types de paroi étudiés. La paroi PVC donne des charges toujours positives ($+0.6$ à $+0.8 \times 10^{-3}$ C/kg), assez stables entre 5 et 20 g. La paroi Aluminium donne des charges négatives de faible intensité (-0.25 à -0.30×10^{-3} C/kg). La paroi Plexiglas a un comportement non-monotone intéressant, avec un pic négatif à 10 g (-2×10^{-3} C/kg), ce qui montre une interaction complexe entre la masse et les conditions du lit fluidisé. Le panneau de droite, limité à la méthode 1 (tube), confirme que PVC et Aluminium ont des polarités opposées et l'intervalle [min, max] des mesures pour chaque masse. La zone ombrée verte (PVC) est beaucoup plus grande que la rouge (Aluminium), ce qui veut dire qu'il y a plus de variabilité entre le matériaux pour le PVC.

III.4.3. Influence du temps et de la vitesse de l'air (lit fluidisé)

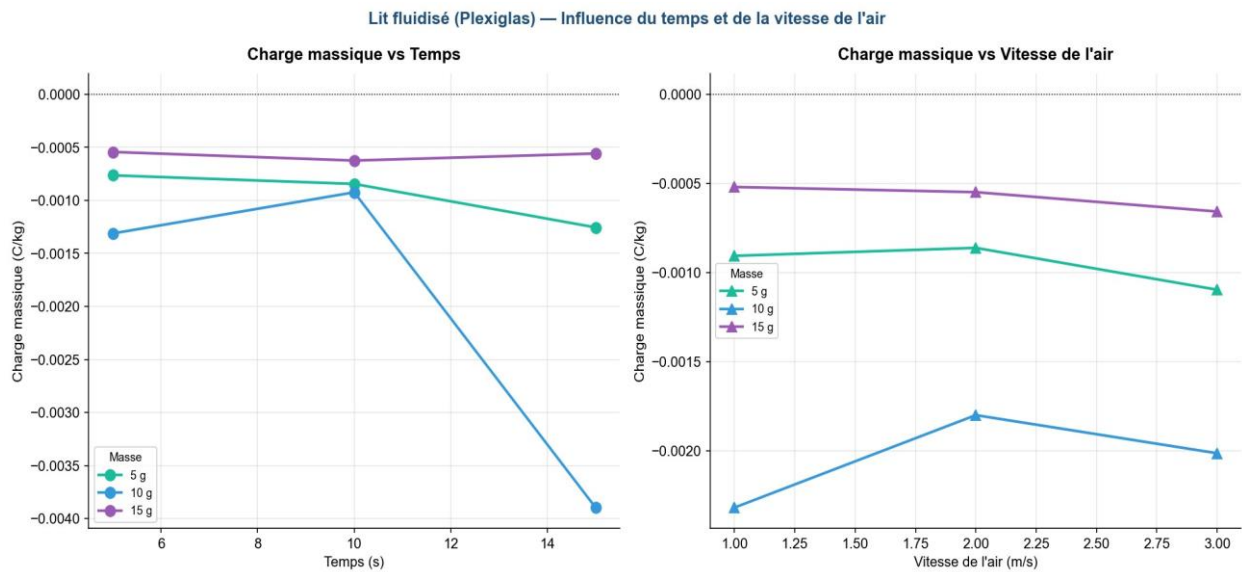


Figure III. 3 : Charge massique en fonction du temps et de la vitesse de l'air pour le lit fluidisé (Plexiglas)

Pour ce qui est de l'effet du temps (panneau gauche), les courbes de 5 g et 15 g montrent une variation modérée de la charge entre 5 et 15 seconde. La masse de 10 g a un comportement intéressant : la charge tombe à -4.0×10^{-3} C/kg à 15 secondes, ce qui indique une saturation pour cette configuration particulière.

En ce qui concerne l'effet de la vitesse de l'air (panneau droit), pour 5 g et 15 g, la charge change un peu avec la vitesse. La masse de 10 g est différente avec un meilleur chargement à 2 m/s (-2.5×10^{-3} C/kg) avant de baisser un peu à 3 m/s.

III.4.4. Importance des variables et graphe des residu

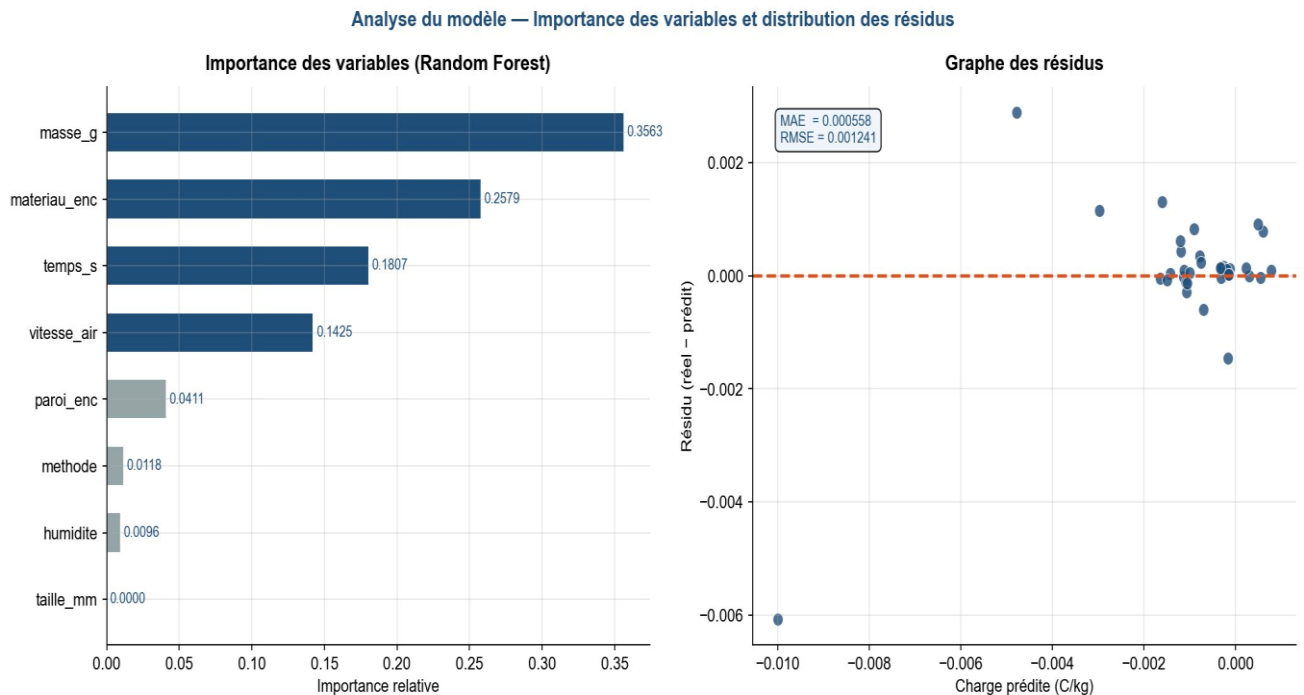


Figure III. 4 : Importance des variables calculée par Random Forest et distribution des résidus de prédiction

Le panneau de gauche montre le classement d'importance des variables, calculé nativement par l'algorithme Random Forest. La masse_(g) domine avec une importance de 0.3563, suivie du matériau encodé (0.2579), du temps_s (0.1807) et de la vitesse_air (0.1425). Ces quatre variables totalisent presque 90 % de l'information utile au modèle. La nature de la paroi (0.0411), la méthode (0.0118), l'humidité (0.0096) et la taille des particules (0.0000) contribuent très peu, cette dernière étant constant dans tout le jeu de données (2 mm). Le panneau de droite montre le graphe de résidus réel moins prédit. Les résidus sont répartis aléatoirement autour de zéro pour la plage $-0,003$ à 0 C/kg ce qui indique un bon comportement du modèle. Un résidu négatif important -006 C/kg apparaît pour les échantillons extrêmes à charge très élevée Plexiglas 10 g 15 s.

III.4.5. Charge massique moyenne par matériau et type de paroi

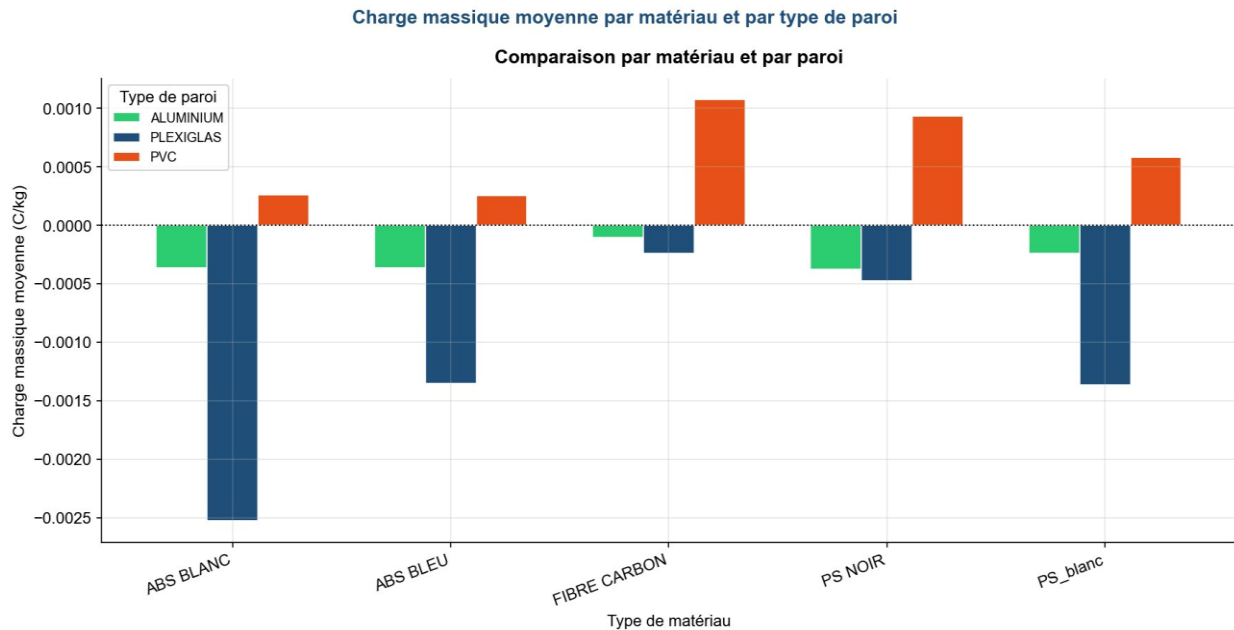


Figure III. 5 : Charge massique moyenne par type de matériau et par type de paroi
(comparaison exhaustive)

La Figure III.5 est la comparaison expérimentale la plus complète. Pour tous les matériaux, la paroi PVC (barres orange) donne la charge la plus positive, de $+0.2$ à $+1.1 \times 10^{-3}$ C/kg. La Fibre de Carbone donne les charges les plus hautes avec le PVC ($+1.1 \times 10^{-3}$ C/kg). La paroi Plexiglas (barres bleues) donne les charges négatives les plus fortes, surtout pour l'ABS Blanc (-2.6×10^{-3} C/kg) et l'ABS Bleu (-1.3×10^{-3} C/kg). La paroi Aluminium (barres vertes) donne des charges négative faibles (-0.2 à -0.4×10^{-3} C/kg) pour tous les matériaux. Ces résultats sont totalement en accord avec la série triboélectrique classique.

III.5. Discussion générale

L'analyse des résultats numériques et des visualisations graphiques permet de faire un bilan équilibré du modèle développé. Le modèle Random Forest donne une prédiction cohérent et physiquement de charge massique, avec un R^2 de 0.79 sur un phénomène expérimental reconnu comme complexe et bruité. L'algorithme identifie correctement l'importance prépondérante de masse et du matériau dans la détermination de la charge, ce qui est cohérent avec la théorie physique de la triboélectrification.

4 axes d'amélioration sont à envisager pour de futurs travaux : un grand nombre d'essais dans les configurations extrêmes (masse = 10 g, Plexiglas, temps élevée) réduirait l'erreur sur ces échantillons typique. Optimisation des hyperparamètre : l'utilisation de la validation croisée (GridSearchCV) permettrait d'affiner le nombre d'arbres et la profondeur maximale pour maximiser le R^2 . Comparaison avec algorithmes : Gradient Boosting (XGBoost), Réseau de Neurones (MLP) ou Support Vector Regression pourraient donner de meilleures performances. Intégration de nouvelles variables : l'ajout de la température, pression et état surface des parois renforcerait le pouvoir prédictif du modèle.

Conclusion

Ce chapitre a montré le développement complet et rigoureux d'un algorithme d'intelligence artificielle pour prédire l'état de charge électrostatique de particules soumises à des phénomènes de triboélectrification. Il est écrit en Python et se compose de six modules qui couvrent toutes les étapes d'un projet de machine learning : depuis l'importation des données brutes jusqu'à la création de visualisations scientifiques.

Le modèle Random Forest Regressor, entraîné sur 80 % des 172 échantillons expérimentaux disponibles, atteint un coefficient de détermination R^2 de 0.79 et une RMSE de 1.24×10^{-3} C/kg sur l'ensemble test. Ces résultats montrent que l'algorithme peut généraliser à des configuration non vues pendant et capturer les tendances physiques essentielles du phénomène étudié.

L'analyse de l'importance des variables montre que la masse de particule (35.6 %) et le type de matériau (25.8 %) sont les facteurs les plus déterminants, devant le temps d'exposition (18.1 %) et la vitesse de l'air (14.2 %). Cette hiérarchie est cohérente avec la compréhension physique de la triboélectrification et valide la pertinence de l'approche adoptée. Les perspectives ouvertes par ce travail sont prometteuses, notamment l'intégration de cet outil dans un système contrôle en ligne d'un procédé fluidisation.

Conclusion Générale et perspectives

Conclusion Générale

Le recyclage de plastique n'est plus un simple choix écologique, c'est devenu une nécessité économique. Face à la quantité croissante de déchets issus des équipements électriques et électroniques, il faut des techniques de séparation capables de vraiment améliorer la qualité des matériaux qu'on récupère. C'est là que la séparation électrostatique tire son épingle du jeu : elle consomme peu d'énergie, ne pollue pas, et se montre particulièrement efficace sur les matériaux isolants. Ce mémoire construit autour de 2 axes : d'un côté, une étude expérimentale des méthodes de chargement électrostatique des particules granulaires, et d'autre, la mise au point d'un algorithme d'intelligence artificielle pour déterminer l'état de charge de ces particules.

On a commencé par une revue bibliographique, en s'attardant sur les phénomènes de triboélectrification, les forces qui agissent sur les particules granulaires, et les différents dispositifs utilisés pour les procédés de séparation électrostatique. Cette première étape a surtout permis de comprendre à quel point les propriétés des matériaux et les conditions opératoires pèsent sur l'acquisition des charges électriques.

Vient ensuite la partie expérimentale, où plusieurs matériaux granulaires — ABS bleu, ABS blanc, PS noir, PS blanc et fibre de carbone — ont été testés selon deux méthodes : le chargement par glissement dans des tubes en aluminium et en PVC, puis le chargement triboélectrique en lit fluidisé. Un résultat ressort clairement : la nature de la paroi de contact change radicalement la polarité des charges. Dans le tube en aluminium, les charges obtenues sont majoritairement négatives ; dans le tube en PVC, c'est l'inverse pour tous les matériaux testés. Le lit fluidisé, de son côté, a confirmé que la vitesse de fluidisation, le temps de chargement et la masse des particules jouent tous un rôle important dans la charge finale.

En analysant les résultats, on observe qu'un temps de chargement plus long et une vitesse de fluidisation plus élevée tendent à augmenter la charge électrostatique en valeur absolue, tout simplement parce que les collisions entre particules et parois se multiplient. Autre constat intéressant : chaque matériau réagit à sa façon, avec un comportement triboélectrique qui lui est propre et qui dépend directement de ses propriétés physicochimiques.

Enfin, la dernière partie du travail a consisté à développer, sous Python, un algorithme d'intelligence artificielle pour exploiter toutes ces données expérimentales. Les modèles de classification et de régression construits ont réussi à prédire aussi bien la polarité et la valeur de la charge massique, simplement à partir des paramètres opératoires. Cela confirme que l'apprentissage automatique est un outil solide pour modéliser ce type de phénomène, et qu'il pourrait même réduire considérablement le nombre d'expériences nécessaires quand on cherche à optimiser un procédé industriel.

Au final, ce travail montre bien que l'expérimentation et l'intelligence artificielle, combinées, forment une approche vraiment intéressante pour comprendre et prédire le comportement triboélectrique des matériaux granulaires. Les résultats obtenus confirment que cette démarche a du sens, et qu'elle ouvre des perspectives concrètes pour le recyclage et la séparation électrostatique des plastiques.

Perspectives :

- Étudier l'influence d'autres paramètres opératoires tels que l'humidité relative, la température ambiante, la granulométrie des particules et la des parois de chargement.
- Réaliser plusieurs des essais sur des mélanges réels issus des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) afin de se rapprocher des conditions industrielles de recyclage.
- Développer et comparer d'autres modèles d'intelligence artificielle plus performants, tels que les réseaux de neurones artificiels (ANN), XGBoost ou les méthodes d'apprentissage profond.
- Augmenter le nombre d'expériences afin d'améliorer la précision et la robustesse des modèles de prédiction.
- Développer un système intelligent capable de prédire en temps réel l'état de charge des particules et d'optimiser automatiquement les paramètres de chargement.
- Combiner le modèle d'intelligence avec un procédé complet de séparation électrostatique afin d'améliorer l'efficacité globale du recyclage des matériaux plastiques.

- Étendre cette approche à d'autres types de matériaux granulaires utilisés dans les domaines industriels, minier ou environnemental.

Bibliographie

Bibliographie

1. J.B.Bahers, Dynamique des filières de récupération-recyclage et écologie territoriale: l'exemple du traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) en Midi-Pyrénées, Toulouse: Université de Toulouse, 2012.
2. A. Deprouw, M. Jover, S. ADEME et E. Fangeat, «Rapport annuel du registre des déchets d'équipements électriques et électroniques. Données 2016,» Deloitte développement durable, 2017.
3. E. ADEME, « Enquête sur l'état de l'art et les perspectives des techniques de tri
4. automatique des déchets,» 2003.
H. Pratt, « « Plastics from residential electronics recycling ». In: The report analyzes the types of plastics found in consumer electronics and the current technologies available to recycle these plastics» American Plastics Council, 2000.
5. M. Radu, L. Dascalescu, S. Cănanău et A. Rădulescu, «La séparation tribo-électrostatique des déchets électriques,» Revista constructia, 2003.
6. C. DRAGAN, Modélisation du processus de charge et séparation tribo-aero-électrostatique de matériaux plastiques granulaires, 2010.
7. A. Iuga, R. Morar, A. Samuila et L. Dascalescu, «Electrostatic separation of metals and plastics from granular industrial wastes» IEEE Proceedings-Science, Measurement and Technology, vol. 148, pp. 47-54, 2001.
8. A. Tilmatine, S. Flazi, K. Medles, Y. Ramdani et L. Dascalescu, «Séparation électrostatique : complément des procédés mécaniques de recyclage des déchets industriels,» Journal of Electrostatics, vol. 61, pp. 21-30, 2004.
9. I. Inculet, G. Castle et J. Brown, «Electrostatic separation of plastics for recycling,» Science & Technology , vol. 16, pp. 1691-100, 1998.
10. L. Dascalescu, A. Samuila, A. Mihalcioiu, S. Bente et A. Tilmatine, «Robust design of electrostatic separation processes,» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, pp. 715-720, 2005.
11. A. Tilmatine, S. Bendimered, F. Boukhoulda, K. Medles et L. Dascalescu, «Electrostatic separators of particles. Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures» Waste Management, vol. 29, pp. 228-232, 2009.

12. J. FOURNIER , N. HAVARD, M. LACRAMPE, M. RYCKEBUSCH et P. KRAWCZAK « Conduite adaptative du procédé d'injection des thermoplastiques» techniques-ingenieur,2006.
13. D. Taylor et P. Secker, «Industrial Electrostatics: Fundamentals and Measurements» Baldock, UK: Research Studies Press, United kingdom, 1994.
14. W. R. Harper, «Contact and Frictional Electrification» Oxford University Press, London, 1967.
15. W. D. Greason, « Investigation of a test methodology for triboelectrification» Journal of Electrostatics, vol. 49, p. 245–256, 2000.
16. L. Lee, «Dual mechanism for metal polymer contact electrification» Journal of Electrostatics , vol. 32, pp. 1-29, 1994.
17. C. H. Park, H. S. Jeon, B. G. Cho et J. K. Park, «Triboelectrostatic separation of covering plastics in chopped waste electric wire» Polymer Engineering and Science, vol. 47, pp. 1975-1982, 2007.
18. C. H. Park, J. K. Park, H. S. Jeon et B. C. Chun, «Triboelectric series and charging properties of plastics using the designed vertical-reciprocation charger» Journal of Electrostatics, vol. 66, pp. 578-583, 2008.
19. É. Lévy, Dictionnaire de Physique, Paris, 1988.
20. F. ORTMANN, W. SCHMIDT, G. Wolf et F. BECHSTEDT, «Attracted by long-range electron correlation: adenine on graphite» Physical review letters, vol. 95, n° 18, p. 186101, 2005.
21. H. C. Hamaker, «The London-van der Waals attraction between spherical particles» Physica, vol. 4, p. 1058, 1937.
22. R. Pascoe et B. Connel, « Development of a method for separation of PVC and PET using flame treatment and flotation» Minerals Engineering, vol. 16, pp. 1205-1212, 2003.
23. M. Blajan, R. Beleca, A. Iuga et L. Dascalescu, «Triboelectrification of granular plastic wastes in vibrated zigzag-shaped square pipes in view of electrostatic separation» IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 46, p. 1558 – 1563, 2010.
24. L. Calin, L. Caliap, V. Neamtu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila et L. Dascalescu, «Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation» IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 44, pp. 1044-1051, 2008.

27. M. Bilici, L. Dascalescu, C. Dragan, O. Fati, A. Iuga et A. Samuila, «Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices» IEEE Trans. Diel. Electr. Insul, vol. 18, pp. 1476-1483, 2011.
28. L. Calin, A. Mihalcioiu, A. Iuga et L. Dascalescu, «Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification» Part.Sci. & Technol, vol. 25, pp. 205-211, 2007.
29. C. Dragan, O. Fati, M. Radu, L. Calin, A. Samuila et L. Dascalescu, «Tribocharging of mixed granular plastics in a fluidized bed device» IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 47, pp. 1922-1928, 2011.
30. M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami et L. Dascalescu, «Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials» J. Electrostat, vol. 69, pp. 631-637, 2011.
31. M. Sarki et A. Masumoto, «Electrostatic separation of chopped waste electric cables» Journal of Environmental Engineering, vol. 2, pp. 227-236, 2007.
32. A. Benabboun, A. Tilmatine, Y. Brahami, S. Bendimerad, M. Miloudi et K. Medles, «Experimental investigation of electrostatic separators of plastic particles using different charging devices» Separation Science and Technology, vol. 49, n° 13, pp. 464-468, 2014.
33. M. Zelmat, A. Rizouga, K. Medles et L. Dascalescu, «Experimental comparative study of different tri-bocharging devices for triboelectric separation of insulating particles» IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 49, pp. 1113-1118, 2013.
34. J. Li, G. Wu et Z. Xu, «Tribo-charging properties of waste plastic granules in process of tribo-electrostatic separation» Waste Management, vol. 35, pp. 36-41, 2014.
35. S. Masuda, M. Toraguchi, T. Takahashi et K. Haga, «Electostatic beneficiation of coal using a cyclone-tribocharger» IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 19, pp. 789-793, 1983.
36. M. Zelmat, A. Tilmatine, M. Rizouga, R. Gouri , K. Medles and L. Dascalescu «Experimental Analysis of a Cyclone Tribocharging Device for Free-fall Triboelectric
37. Separation of Plastic Particles» IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation
38. ,Vol. 20(5), p.1584 -1589, October 2013.
39. Y. Higashiyama et K. Asano, «Recent progresses in electrostatic separation technology»

40. Part. Sci. & Technol, vol. 16, pp. 77-90, 1998.
41. S. Kazmierczak, P. Anglaret et J. Filippi, Technologie génie chimique. Tome 3, Centre Régional De Documentation Pédagogique, 1989.
42. S. Escalante, G. Touchard et G. Dominguez, «Electrification study in dielectric material fluidized beds for different fluidization regimes» Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 694-697, 2002.
43. L. Dascalescu, M. Bilici, C. Dragan, A. Samuila, Y. Ramdani et A. Tilmatine, «Robust design and capability evaluation of a tribo-aerodynamic charging process for fine particles» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 47, pp. 1086-1092, 2011.
44. C. Dragan, M. Bilici, S. Das, A. Samuila et L. Dascalescu., « Tribocharging of insulating powders in the annular ducts of pneumatic devices» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, pp. 1138-1143, 2010.
45. Applications, vol. 46, pp. 1138-1143, 2010.
46. C. Dragan, A. Samuila, S. Das, D. Iancu, M. Bilici et L. Dascalescu., « Factors that influence the tribo-charging of insulating ducts in suction-type dilute-phase pneumatic transport systems» Journal of Electrostatics, vol. 67, pp. 184-188, 2009.
47. Z. Chen, F. Liu, L. Wang, Y. Li, R. Wang et Z. Chen, «Tribocharging properties of wheat bran fragments in air-solid pipe flow» Food Research International, vol. 62, pp. 262-271, 2014.
48. F. S. Ali, I. I. Inculet et A. Tedoldi, «Charging of polymer powder inside a metallic fluidized bed,» Journal of Electrostatics, vol. 45, pp. 199-211, 1999.
49. R. Messafeur, I. Mahi, R. Ouidir, K. Medles, L. Dascalescu et A. Tilmatine, «Tribo-electrostatic separation of a quaternary granular mixture of plastics,» Particulate Science and Technology, pp. 1-6, 2018.
50. Introduction à la programmation Python pour la biologie <https://python.sdv.u-paris.fr/>

Résumé

Ce travail a pour objet l'étude expérimentale des méthodes de chargement électrostatique de particules granulaire utilisées dans les procédés de séparation des matériaux plastiques. Des essais ont été réalisés avec des dispositifs de chargement par glissement dans de tubes d'aluminium et de PVC, ainsi qu'avec un lit fluidisé. On a analysé l'influence de la masse, du temps de chargement et de la vitesse de fluidisation sur la charge acquise. Les résultats expérimentaux ont ensuite permis de développer un algorithme d'intelligence artificielle sous Python, capable de prédire l'état de charge électrostatique des particules. Les résultats obtenus montrent que cet approche est efficace pour analyser et optimiser le procédé de chargement triboélectrique.

Mots-clés : Triboélectrification, charge électrostatique, matériaux plastiques, lit fluidisé, intelligence artificielle, Python.

Abstract

This work focuses on the experimental study of electrostatic charging methods for granular particles used in plastic material separation processes. Experiments were carried out using charging devices based on particle sliding through aluminum and PVC tubes, as well as a fluidized-bed system. The influence of particle mass, charging time, and fluidization velocity on the acquired electrostatic charge was investigated. The experimental results were then used to develop an artificial intelligence algorithm in Python capable of predicting the electrostatic charge state of the particles. The obtained results demonstrate that this approach is effective for analyzing and optimizing triboelectric charging processes.

Keywords: Triboelectrification, electrostatic charge, plastic materials, fluidized bed, artificial intelligence, Python.

الملخص

يهدف هذا العمل إلى دراسة تجريبية لطرق الشحن الكهروستاتيكي للجسيمات الحبيبية المستخدمة في عمليات فصل المواد البلاستيكية. أُجريت التجارب باستخدام أجهزة شحن تعتمد على انزلاق الجسيمات داخل أنابيب من الألمنيوم وPVC، بالإضافة إلى جهاز السرير المميع. وتمت دراسة تأثير كتلة الجسيمات وزمن الشحن وسرعة التميع على الشحنة الكهروستاتيكية المكتسبة. كما استخدمت النتائج التجريبية لتطوير خوارزمية للذكاء الاصطناعي باستخدام لغة Python قادرة على التنبؤ بحالة الشحنة الكهروستاتيكية للجسيمات. وقد أظهرت النتائج المتحصل عليها فعالية هذه المقاربة في تحليل وتحسين عمليات الشحن التريبوكهربائي.

الكلمات المفتاحية: التريبوكهربية، الشحنة الكهروستاتيكية، المواد البلاستيكية، السرير المميع، الذكاء الاصطناعي، بايثون.