

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 -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commandes Electriques
Thème

**Contrôle et commande d'un dispositif de chargement
pour la manipulation précise des matériaux**

Présenté Par :

- 1) Melle Bendaoud hadjar
- 2) Melle Mouffok wiem

Devant le jury composé de :

Mme TOUHAMI Aicha	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr AOUMER Djilali	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr MESSAFEUR Radjaa	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année universitaire 2023/2024

REMERCIEMENTS

Nous rendons grâce à **DIEU** de nous avoir donné le courage et la patience afin de mener ce travail à terme.

Nous remercions en particulier à :

Madame **MESSAFEUR Radjaa** notre encadrant qui nous a éclairé avec ces conseils et suggestions, merci pour votre aide précieuse.

Monsieur **AOUIMER Djilali**, pour l'aide, le suivi jusqu'à
L'achèvement de notre travail.

A tous les enseignants qui se sont investis pour guider nos pas et pour leur disponibilité.

Nous tenons également à remercier le président et tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.

Enfin, nos chaleureux remerciements vont également à tous ceux qui par leur fonction, ont contribué de près ou de loin à notre formation.

Aussi, nous tenons à présenter nos remerciements munis d'expression de reconnaissance et de considération à tous les professeurs et au cadre administratif de la faculté des sciences et technologie, en particulier le département électrotechnique.

Dédicace

Je tiens à remercier mon dieu créateur de monde, et je dédie ce travail:

A ma mère, la plus belle maman, tu es l'architecte de ma vie, tu m'as montré le juste chemin pour réussir, et mon père, merci pour toutes.

A mes frères, mes sœurs, pour tous les instants de bonheur passés ensemble.

A ma cher famille, mes tantes et tous mes amis, pour tous les bon moments, en espérant de partager plus de succès ensemble.

A tous mes professeurs, merci de m'avoir enseigné et de m'avoir guidé jusqu'a ici.

Table des métiers

Introduction générale	
Chapitre I Généralité sur l'électrostatique	
I-1. Mécanismes de charge électrique	4
I-1.1. Effet couronne	4
I-1.1.1. Description	4
I-1.1.2. Dispositifs de charge	5
I-1.1.3. Applications de la décharge couronne	6
I-1.2 Induction électrostatique	8
I-1.2.1. Description L'induction électrostatique	8
I-1.2.2. Dispositifs de charge	9
I-1.3. Effet triboélectrique	10
I-1.3.1. Description	10
I-1.3.2. Dispositifs de chargement triboélectrique	11
I-2 Les séparateurs électrostatiques	14
I-2.1. Séparateur de matériaux conducteurs et isolants	14
I-2.2. Séparation de matériaux isolants	18
Conclusion	22
Chapitre II Arduino dans le Contrôle de Vitesse du Convoyeur : Méthodes et Dispositifs	
II.1 introduction	24
II.2 Historique	24
II.3 Définition du module Arduino	24
II.4 Caractéristique de la carte Arduino	25
II.5 La carte Arduino Due	26
II.5.1-Définition	26
II.5.2-Caractéristiques de la carte Arduino utilisé (arduino due)	26

II.5.3 Caractéristiques techniques	27
II.5.4-Principe de fonctionnement	29
II.6 Présentation matériel de la plateforme Arduino	31
II.7- Utilisation de l'IDE Arduino	32
II.8. Structure d'un programme	36
II.8.1 Explication du code	37
II.9 Description du dispositif du chargement	39
CONCLUSION	44
Chapitre III Performance du chargement par effet couronne pour la séparation électrostatique	
III.1. Déroulement de l'expérience	46
III.2. Matériaux utilisés	47
III.3. Résultats et Discussion du dispositif de chargement	48
III.3.1.Electrode à fil	48
III.3.2.1 Influence de la haute tension positive	48
III.3.2.2Influence de la haute tension négative	51
III.3.2.3 Interprétation des résultats d'électrode à fil	54
III.3.2 Electrode à lame dents de scie	54
III.3.2.1 Influence de la haute tension positive	54
III.3.2.2 Influence de la haute tension négative	57
III.3.2.3 Interprétation des résultats d'électrode à lame dents de scie	60
III.3.3. Electrode à lame	60
III.3.3.1 Influence de la haute tension positive	60
III.3.3.2 Influence de la haute tension négative	63

III.3.3.3 Interprétation des résultats d'électrode à lame	66
III.4. Applications de la séparation électrostatique	67
III.4.1. Séparateur a tapis roulant	67
III.4.2. Résultats et discussion de la séparation électrostatique	68
Conclusion	73
Conclusion générale	75

Liste des figures

Figure I-1: Génération d'une avalanche électronique et de la décharge couronne.	5
Figure I-2 : Différents types de l'électrode couronne ; (a) : Photographie d'une décharge couronne avec une électrode à aiguilles;(b): Photographie d'une électrode couronne à fil.	6
Figure I-3: Configuration d'électrodes pour la génération de la décharge couronne	6
Figure I-4: Principe de fonctionnement d'un filtre électrostatique.	7
Figure I-5: Effet couronne dans les lignes de transmission (735 kV) .	8
Figure I-6 : Représentation schématique du mécanisme induction électrostatique sur des particules conductrices	10
Figure I-7: Transferts de charges électriques dus au frottement de deux corps ; l'un s'électrise positivement et l'autre négativement.	11
Figure I-8: Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur [57]	11
Figure I-9 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone	12
Figure I-10: Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique	13
Figure I.11: Représentation schématique d'un dispositif de charge à cylindre tournant.	14
Figure I.12 Schéma simplifié du principe de l'électro-séparation à plaque	15
Figure I.13: Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour	16
Figure I.14: Photographie de l'électro-séparateur réalisé au laboratoire IRECOM	17
Figure I.15 Séparateur électrostatique à tambour industriel installé à l'ERO	18
Figure I-16: Photos du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages	19
Figure I-17: Photographie d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques	20
Figure I.18: Photographie du séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes cylindrique tournantes.	21
Figure II.1: La carte Arduino Due.	26
Figure II.2 : Schéma synoptique de la carte Arduino due	30
Figure II.3 : Architecture interne de la carte Arduino Due	30
Figure II.4 : Une photo représentative d'un moteur à courant alternatif Relié à une carte Arduino Due	31
Figure II.5 : Relais module	32
Figure II.6 : Schéma de l'IDE Arduino : édition, compilation , téléversement et communication	33
Figure II.7 : choix de la carte Arduino	34
Figure II.8 : choix du port de connexion de la carte	35
Figure II.9 : résumé du processus de rédaction de programme	36
Figure II.10 : Structure du programme de convoyeur	37
Figure II.11 : Convoyeur à bande transportant des produits	39
Figure II.12 : Source Haute Tension	40
Figure II.13 : Photographie de L'électromètre utilisé.	40
Figure II.14 : cage faraday	41

Figure II.15 : Balance	41
Figure II.16 : Les électrodes utilisée A) électrode à fil, B) électrode à lame, C) électrode à lame dents de scie	42
Figure II.17 : Alimentation AC-DC	43
Figure II.18 : moteur AC	43
Figure III.1 : échantillon utilisée.	47
Figure III.2 : Influence de la haute tension sur la charge acquise par les 05 particules dans t=1s.	48
Figure III.3 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=5s.	49
Figure III.4 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=10s	50
Figure III.5 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=15s.	50
Figure III.6 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=1s.	51
Figure III.7 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=5s.	52
Figure III.8 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=10.	53
Figure III.9 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=15.	53
Figure III.10 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=1s.	55
Figure III.11 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=5s.	55
Figure III.12 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=10s.	56
Figure III.13 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=15s.	57
Figure III.14 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=1s.	57
Figure III.15 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=5s.	58
Figure III.16 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=10s.	59
Figure III.17 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=15s.	59
Figure III.18 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=1s.	61
Figure III.19 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=5s.	62
Figure III.20 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=10s.	62
Figure III.21 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t= 15s.	63
Figure III.22 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=1s.	64

Figure III.23: Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=5s.	64
Figure III.24 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t= 10s.	65
Figure III.25 : Influence du tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=15s.	66
Figure III.26: Photos du séparateur électrostatique.	67
Figure III.27: Echantillon des granules utilisés.	68
Figure III.28: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec produit binaire (ABS et PS) avec électrode à fil	69
Figure III.29: Récupération et Pureté de chaque isolant obtenue (PS et ABS) avec électrode à fil.	69
Figure III.30: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec produit binaire (ABS et PS) avec électrode à lame dents de scie.	70
Figure III.31: Récupération et Pureté de chaque isolant obtenue (PS et ABS)avec électrode à lame dents de scie .	70
Figure III.32: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec produit binaire (ABS et PS) avec électrode à lame.	71
Figure III.33: Récupération et Pureté de chaque isolant obtenue (PS et ABS)avec électrode à lame.	71

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	48
Tableau III.2 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	49
Tableau III.3 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	49
Tableau III.4 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	50
Tableau III.5 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	51
Tableau III.6 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	52
Tableau III.7 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	52
Tableau III.8 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	53
Tableau III.9 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	54
Tableau III.10 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	55
Tableau III.11 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	56
Tableau III.12 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	56
Tableau III.13 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	57
Tableau III.14 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	58
Tableau III.15 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	58
Tableau III.16 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	59
Tableau III.17 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	61
Tableau III.18 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	61
Tableau III.19 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	62
Tableau III.20 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	63
Tableau III.21 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	63
Tableau III.22 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	64
Tableau III.23 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	65
Tableau III.24 : la charge massique (nC /g) des particules isolantes	65

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les mélanges de matières plastiques contenues dans les DEEE doivent être séparés en différents types de polymères afin d'être recyclés [59]. Au cours des vingt dernières années, la séparation électrostatique est avérée être une solution efficace à ce problème dont elle représente la classe la plus importante pour le tri sélectif des matériaux solides par des forces électriques qui agissent sur les particules chargées ou polarisées [60]-[61].

De nombreuses solutions de tri existent au niveau industriel allant du tri optique au tri densimétrique en passant par le tri manuel ou le criblage. La plupart de ces installations sont gourmandes en énergie et ne permettent pas de séparer tous les types d'éléments composant les déchets.

La manipulation précise des matériaux constitue un défi majeur dans de nombreux secteurs industriels, où des exigences strictes en matière de contrôle et de précision sont nécessaires pour garantir des processus efficaces et fiables. Parmi les matériaux utilisés, les polymères occupent une place prépondérante en raison de leurs propriétés physiques et chimiques remarquables, qui les rendent indispensables dans des applications aussi diverses que la microélectronique, l'aérospatiale, l'optique, et le biomédical. Cependant, l'utilisation de ces polymères peut être entravée par leurs caractéristiques intrinsèques, notamment leur inertie chimique, leur non-porosité et leur hydrophobie, qui peuvent rendre difficile leur modification ou leur manipulation dans certains processus.

Pour répondre à ces défis, des techniques de traitement de surface ont été développées pour modifier les propriétés des polymères tout en préservant leurs caractéristiques fondamentales. Parmi ces techniques, les décharges couronnes se sont avérées particulièrement efficaces, offrant une méthode robuste et uniforme pour modifier la surface des matériaux diélectriques. Ces décharges, utilisant des dispositifs électriques spécifiques, sont capables de déposer des charges électriques sur la surface des polymères, permettant ainsi d'améliorer l'adhérence entre différents matériaux et même de faciliter des processus tels que la séparation ou la manipulation de matériaux granulaires.

L'uniformité de la distribution des charges électriques déposées est un aspect crucial de ces processus de traitement, car elle influe directement sur l'efficacité et la reproductibilité des résultats obtenus. Cependant, garantir cette uniformité nécessite une compréhension approfondie des paramètres impliqués, tels que la géométrie des électrodes couronnes, les propriétés des polymères traités et les conditions opérationnelles.

Dans cette optique, cette étude se focalise sur le développement d'un dispositif de chargement contrôlé utilisant l'effet couronne pour la manipulation précise des matériaux. En exploitant les capacités de contrôle offertes par la plateforme Arduino, l'objectif est de concevoir un système intégré permettant d'optimiser le processus de chargement des mélanges granulaires en vue de leur séparation électrostatique. Cette approche permettra non seulement d'améliorer

la précision et l'uniformité du processus, mais aussi de faciliter son intégration dans des environnements industriels où la fiabilité et l'efficacité sont primordiales.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre présente les trois principaux mécanismes permettant de conférer des charges électriques distinctes aux particules d'un mélange : l'effet corona, l'induction électrostatique et l'effet triboélectrique. Pour chacun d'entre eux, nous détaillons le principe physique sous-jacent, les types d'électrodes communément employés et les applications représentatives. Enfin, nous décrivons la construction et présentons les principes de fonctionnement des dispositifs de séparation électrostatique.

Le second chapitre met en œuvre comment la technologie Arduino peut être utilisée pour améliorer le contrôle du chargement, en mettant l'accent sur la régulation de la vitesse du convoyeur. Il offre une vision globale de la plateforme Arduino, en soulignant ses caractéristiques et bénéfices, tels que sa programmation flexible, son intégration avec différents capteurs et actionneurs, ainsi que son accessibilité financière. Le chapitre aborde également de manière approfondie l'histoire, les spécificités techniques et le fonctionnement des cartes Arduino, notamment l'Arduino Due. Finalement, il expose les équipements matériels employés, tels que le convoyeur à bande, les électrodes et les moteurs, et explique comment ils sont intégrés afin d'assurer un contrôle précis et efficace du chargement.

Le troisième chapitre porte sur une analyse approfondie du chargement par effet de couronne, une méthode prometteuse pour optimiser la séparation des matériaux isolants dans les procédés de recyclage. Cette technique consiste à transporter les particules isolantes sur un tapis roulant et à les charger en utilisant plusieurs types d'électrodes couronne telles que les électrodes à fil, à dents de scie et à lame, reliées à une haute tension positive ou négative. Cela permet d'impartir des charges électriques aux matériaux utilisés, issus des déchets d'équipements électriques et électroniques fournis par la société Enie de Sidi Bel Abbès, tels que Polycarbonate (PC), Polystyrène blanc et noir, ABS (Acrylonitrile butadiène styrène) bleu et blanc. Ces matériaux, largement utilisés dans les équipements électroniques, feront l'objet d'une étude approfondie pour évaluer leur aptitude au recyclage et leur comportement lors du processus de chargement par effet de couronne. Enfin, nous mettrons en pratique la séparation électrostatique des matériaux pour démontrer l'efficacité du système de chargement par effet couronne.

CHAPITRE I
Généralité sur l'électrostatique

Electrostatique, branche de la physique étudiant les interactions entre charges électriques stationnaires, trouve une multitude d'applications dans divers domaines scientifiques et technologiques. Parmi celles-ci, la séparation électrostatique des matériaux s'impose comme une technique de choix pour le traitement de mélanges complexes.

Ce chapitre s'attache à présenter les trois principaux mécanismes permettant de conférer des charges électriques distinctes aux particules d'un mélange : l'effet corona, l'induction électrostatique et l'effet triboélectrique. Pour chacun d'entre eux, nous détaillerons le principe physique sous-jacent, les types d'électrodes communément employés et les applications représentatives.

Le choix du mécanisme de chargement optimal dépend d'un certain nombre de facteurs, notamment des propriétés du matériau à séparer, du débit du matériau à traiter et des exigences de sécurité. Et enfin, nous décrivons la structure et le principe de fonctionnement du séparateur électrostatique.

I-1. Mécanismes de charge électrique

La séparation électrostatique d'un mélange de matériaux pulvérulents est possible si les constituants de celui-ci portent des charges électriques différentes. Ces charges peuvent être générées par un ou plusieurs des trois mécanismes physiques différents [1-2]. Il s'agit de l'effet couronne, de l'induction électrostatique et de l'effet tribo-électrique.

I-1.1. Effet couronne

Longtemps observé lors des phénomènes météorologiques intenses, l'effet couronne a trouvé aujourd'hui des applications diverses dans le domaine de l'électrostatique et a fait l'objet de plusieurs recherches scientifiques, il est utilisé pour la précipitation de poussières [3], et la fabrication des films plastiques et textiles [4], ainsi que dans les processus de l'électro-photographie [5] et la séparation des mélanges granulaires [6-7].

I-1.1.1. Description

L'effet couronne est lié à l'ionisation de l'air dans une zone de champ électrique très intense produite entre deux électrodes métalliques : l'une dite active, se présente généralement sous la forme d'une pointe ou d'un fil de petit diamètre, et est reliée à une source de haute tension de plusieurs kilovolts, et l'autre passive qui n'est autre qu'une plaque ou une grille métallique reliée à la terre. À proximité de l'électrode active la tension varie fortement sur une courte distance créant ainsi un fort champ électrique, responsable de l'accélération des quelques électrons issus de l'ionisation naturelle de l'air. L'avalanche électronique a lieu à proximité de l'électrode active quelle que soit la polarité qui lui est appliquée.[8](**Figure I-1**)

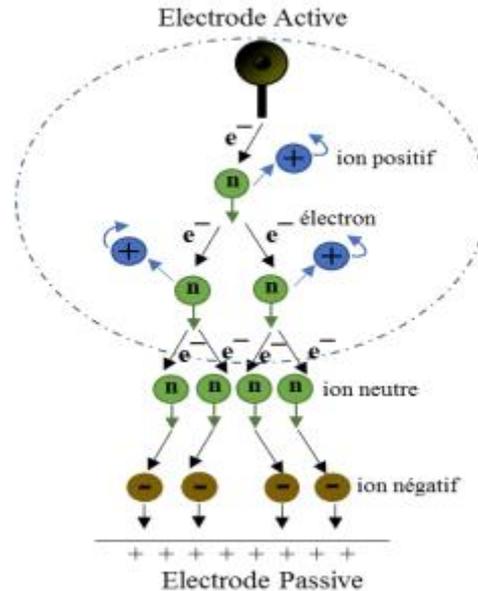


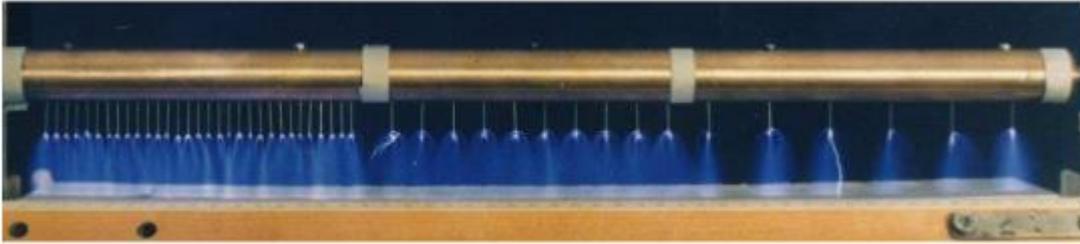
Figure I-1: Génération d'une avalanche électronique et de la décharge couronne.

Les électrons libérés vont se heurter aux molécules d'air présentes dans l'espace. Ces électrons portent un haut niveau d'énergie et de cet impact résulte la libération d'un ou plusieurs électrons par ces molécules. Ces derniers vont continuer leur trajet vers l'électrode passive, de polarité opposée, vers laquelle ils sont attirés, tout en heurtant d'autres molécules de gaz et ainsi, en multipliant leur nombre. Les molécules ayant libéré des électrons sont devenues des ions positifs et sont donc attirés par l'électrode active. De cette façon, elles regagnent un électron et redeviennent neutres. Ce phénomène est délimité dans l'espace (quelques micromètres de l'électrode) dans une zone caractérisée par une forte intensité du champ électrique : la zone d'ionisation. Au-delà de cette dernière, le champ électrique n'est plus suffisamment fort pour que les électrons aient assez d'énergie pour heurter les molécules d'air de façon à ce qu'elles cèdent un autre électron. Ils vont alors s'associer aux molécules

d'air et former des ions chargés négativement. Ces ions entrent en contact avec les particules et leurs durées de vie sont suffisamment longues pour que la séparation des matériaux ait lieu. Les particules, soumises au flux ionique, vont se charger négativement [9-10].

I-1.1.2. Dispositifs de charge

Au fil du temps plusieurs dispositifs ont été mis en place pour générer des décharges couronnes. Les plus utilisés sont les électrodes à fil et à aiguilles (Figure 1-2), et à moindre degré l'électrode à lame. Les électrodes couronnes à fil fin – par leur facilité de réalisation et leur faible coût de revient – sont les plus appréciées dans l'industrie. Mais même si elles répondent bien à des critères économiques importants, elles peinent cependant à répondre à des critères pratiques au cours du processus de séparation électrostatique d'un mélange isolant-conducteur [11-12].



(a)



(b)

Figure I-2 : Différents types de l'électrode couronne ; (a) : Photographie d'une décharge couronne avec une électrode à aiguilles;(b): Photographie d'une électrode couronne à fil.

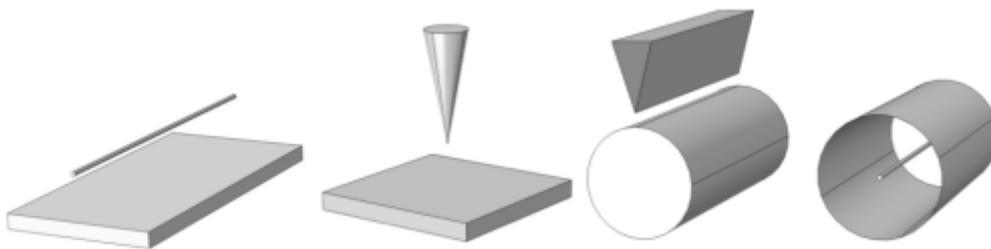


Figure I-3: Configuration d'électrodes pour la génération de la décharge couronne

I.1.1.3. Applications de la décharge couronne :

La décharge couronne a de nombreuses applications dans l'industrie, la médecine et dans la vie quotidienne également. Certaines de ces applications ont été découvertes et commercialisés depuis plus d'un siècle. La première grande application commerciale réussie de la précipitation électrostatique a été accomplie en 1907 [13]. Depuis ce temps, de nombreux chercheurs ont consacré leurs attentions à la charge des particules et des précipitateurs électrostatiques utilisant différentes géométries (Fig. I-4) [14]. L'effet couronne est largement utilisé dans les techniques de séparation électrostatique des matériaux

granulaires [15]. Cette dernière représente une technologie économiquement viable pour la préservation de l'environnement, car elle offre du plastique recyclé de qualité élevée et une meilleure efficacité pour le recouvrement des métaux par rapport aux méthodes conventionnelles de traitement des déchets. Les électro-séparateurs à effet couronne (Fig. I-12), assurent la séparation de mélanges composés de particules granuleuses isolant-métal de tailles moyennes différentes, allant des particules micronisées jusqu'à des tailles d'ordre millimétrique [16].

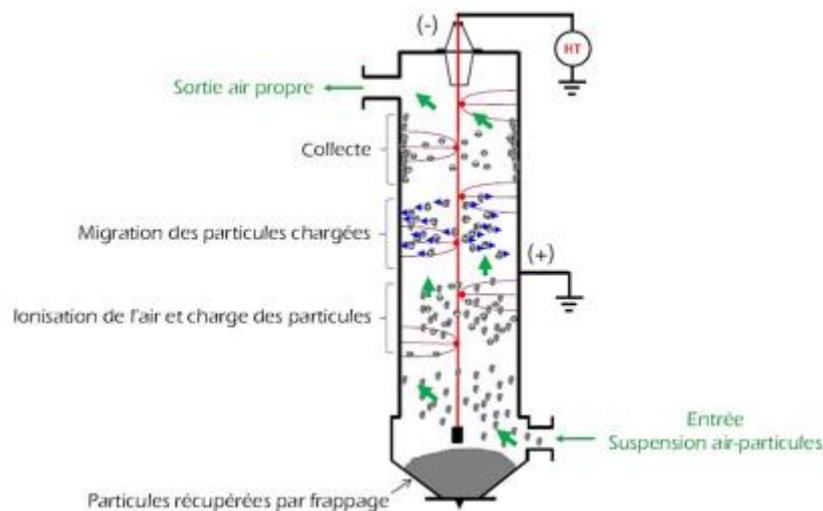


Figure I-4: Principe de fonctionnement d'un filtre électrostatique, (a) configuration cylindrique [17].

La génération d'ozone est aussi une application importante de la décharge couronne. Les propriétés d'oxydation de ce gaz ont été utilisées pour le traitement de l'eau et le contrôle des odeurs [18]. L'ozone est généralement produit en faisant passer un courant d'air sec ou d'oxygène à travers une décharge couronne volumique, où les molécules d'oxygène (O_2) dans le flux sont converties à l'ozone (O_3). Mettre un film diélectrique sur l'électrode de masse convertit la décharge couronne à une décharge à barrière diélectrique (DBD) et augmente l'efficacité du processus.

Le traitement des fumées et le contrôle de la pollution d'air sont d'autres applications connues des décharges couronne. Des études numériques et expérimentales sur l'élimination des NO_x et de SO_x du gaz de combustion ont été menées [19]. L'idée de la fumée a déclenché une décharge couronne pour un capteur de fumée ionique fonctionnant sans une source d'ionisation radioactive, et a été publié par Mokhtari et al. [20]. Elle est basée sur la diminution de la tension d'apparition de la décharge couronne par un facteur de 5 en présence des particules de fumée. Une nouvelle méthode pour la conception d'un capteur de surveillance respiratoire basée sur les impulsions de Trichel a été suggérée par Deng et al. [21]. Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un détecteur d'ionisation de champ simple, qui se compose d'une électrode à aiguille et un plan de masse. Il est montré que différents modèles respiratoires tels que la respiration normale, respiration rapide, et de l'apnée peuvent

être surveillés en temps réel en détectant les changements dans la fréquence des impulsions Trichel. Les applications médicales telles que le traitement de la cavité dentaire à l'aide du plasma produit dans une décharge couronne [22] et la décontamination du biofilm sur la surface des dents en exposant les dents à un streamer positif ou des impulsions négatives de Trichel [23] ont été étudiées par les chercheurs aussi. La charge par effet couronne des matériaux non-tissés utilisés comme des medias filtrants, permet d'améliorer l'efficacité de collecte des particules nocives à la santé par le mécanisme de capture déclenché grâce à des forces électrostatique [24]. L'électro-pulvérisation [25], technologie des semi-conducteurs [26], contrôle du flux d'air [27], décoloration de composés chimiques [28], la nourriture et la décontamination de l'eau [29] sont d'autres applications de la technologie de la décharge couronne.

L'importance de la décharge couronne est non seulement due aux applications utiles dont elle dispose ; elle peut avoir des effets indésirables ainsi. Elle est généralement non souhaitable dans les lignes de transmission de l'énergie électrique (Fig. I-5), où elle provoque la perte de puissance, un bruit audible et des perturbations radioélectriques. La décharge couronne est également néfaste si elle se produit à l'intérieur des composants électriques, tels que les transformateurs, les condensateurs, les moteurs électriques et les générateurs où elle endommage progressivement les matériaux isolants [30].



Figure I-5: Effet couronne dans les lignes de transmission (735 kV) [31].

I.1.2 Induction électrostatique

I-1.2.1. Description L'induction électrostatique

peut se définir comme une méthode par laquelle un objet électriquement chargé est employé pour créer un déplacement de charges électriques dans un deuxième objet, neutre, sans être en contact avec celui-ci. L'objet chargé, qui génère un champ électrique, provoque la polarisation de l'objet neutre (les centres de gravité des charges positives et négatives présentes dans ce dernier se séparent). Si l'objet neutre est conducteur et temporairement en contact avec une électrode liée à la masse, les charges polaires situées au voisinage du point

de contact vont s'écouler vers la terre. De ce fait, lorsque l'objet est déconnecté de la terre, il emporte une charge nette non nulle. Les charges ne s'écoulant pas dans un corps isolant, celui-ci n'est alors jamais chargé par induction électrostatique [32]. Ce mécanisme explique, par exemple, la charge d'une particule conductrice placée entre deux électrodes de polarités différentes. Dans la situation illustrée sur la **Figure I-6**, une particule conductrice, initialement neutre, déposée sur la surface d'une électrode (convoyeur métallique) liée à la terre, se polarise dans le champ électrique créé par une autre électrode (cylindre métallique) connectée à une haute tension de polarité négative. La particule étant conductrice, elle finit par acquérir une charge positive (de même signe que l'électrode avec laquelle elle est en contact). Dans la séparation électrostatique des mélanges conducteur/isolant, les performances peuvent être améliorées en associant l'induction électrostatique et l'effet couronne par l'ajout d'une seconde électrode produisant un champ électrique étendu, intense et quasi-uniforme qui augmente la force électrique de décollage des particules conductrices déposées sur une surface métallique reliée à la terre [33].

I-1.2.2. Dispositifs de charge

Les électrodes de forme tubulaire ou elliptique sont fréquemment employées pour créer un champ électrique qui s'étend de manière uniforme, que l'électrode soit en mouvement ou immobile.

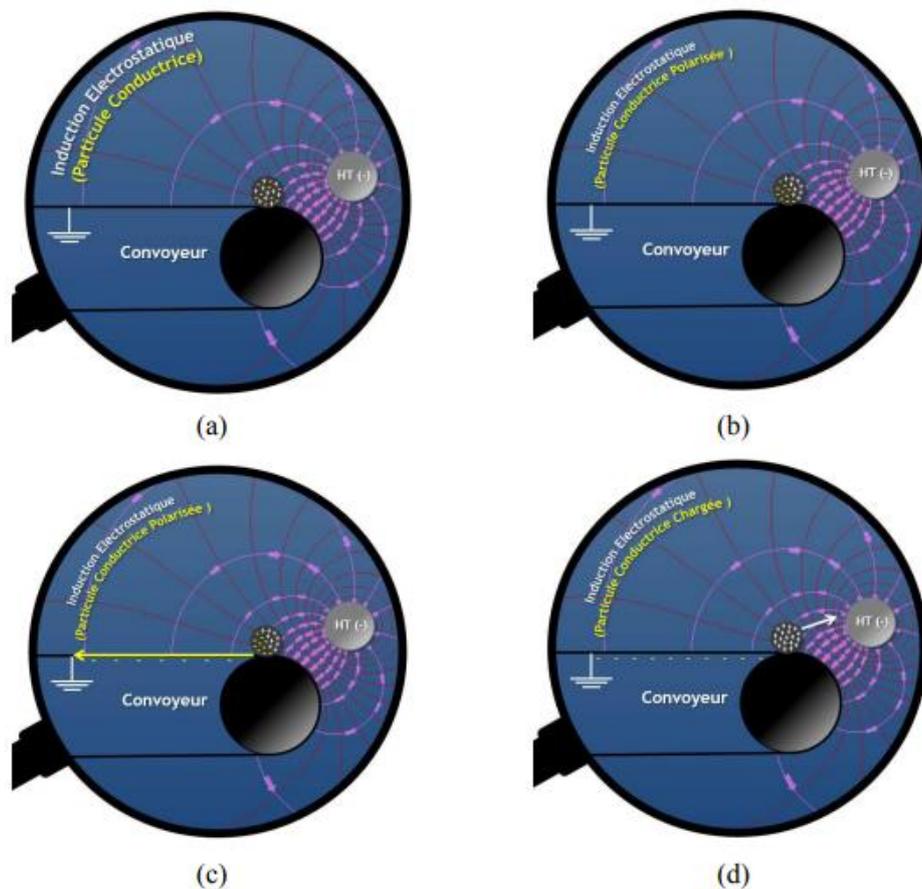


Figure I-6 : Représentation schématique du mécanisme induction électrostatique sur des particules conductrices ; (a) : Particule conductrice neutre ; (b) : Particule conductrice

polarisée ; (c) Ecoulement des charges vers la terre ; (d) : Attraction de la particule conductrice par la force électrostatique[34].

I.1.3.Effet triboélectrique

I.1.3.1.Description

L'électrification par contact, aussi appelée effet triboélectrique (du grec « tribein » signifiant frotter), désigne le phénomène électrostatique par lequel un transfert de charges électriques a lieu lorsque deux objets de natures différentes sont mis en contact, entrent en collision ou se frottent entre eux. « Le frottement étant l'équivalent de contacts suivi de séparations, mais s'accompagnant de génération de chaleur et parfois de transfert de masse »[35].

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.[36]

L'acquisition de charge statique se produit dans un système où la conductivité du matériau est généralement faible (par exemple, un isolant). Cette charge persiste même après la rupture du contact et de nouveaux contacts entraînent d'autres transferts, permettant ainsi de générer des charges à des niveaux élevés **Figure I-7**. Ce mécanisme physique est largement utilisé pour charger des matières granulaires plastiques en vue de leur séparation électrostatique.

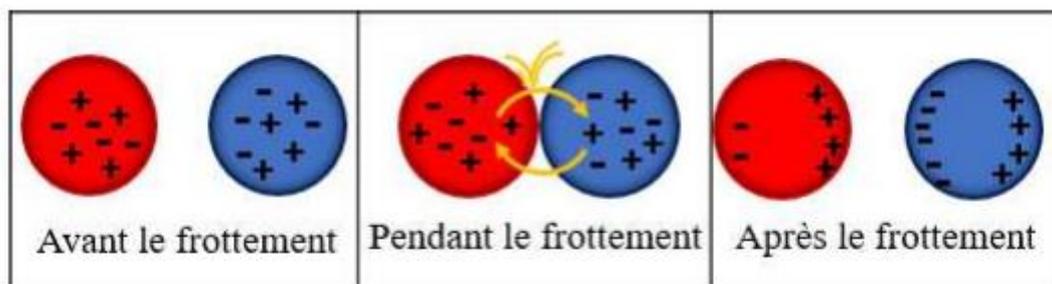


Figure I-7: Transferts de charges électriques dus au frottement de deux corps ; l'un s'électrise positivement et l'autre négativement.

I.1.3.2 Dispositifs de chargement triboélectrique :

Plusieurs procédés d'acquisition de charge par effet triboélectrique peuvent être utilisés pour charger les particules afin de séparer les mélanges des particules :

a. Dispositif de charge par ventilateur:

Chargement par ventilateur Le dispositif consistait en une chambre cylindrique, en PVC (Figure I.8). A son extrémité inférieure, la chambre est munie d'une hélice coaxiale isolante, entraînée par un moteur électrique à courant continu. Ce dispositif entraîne les matériaux granulaires en un mouvement hélicoïdal qui est prévu pour favoriser leur charge triboélectrique par des collisions entre elles ou bien entre les particules et les parois. Le signe

et l'ampleur de la charge de chaque granule sont déterminés par l'action combinée de ces trois mécanismes physiques [37].

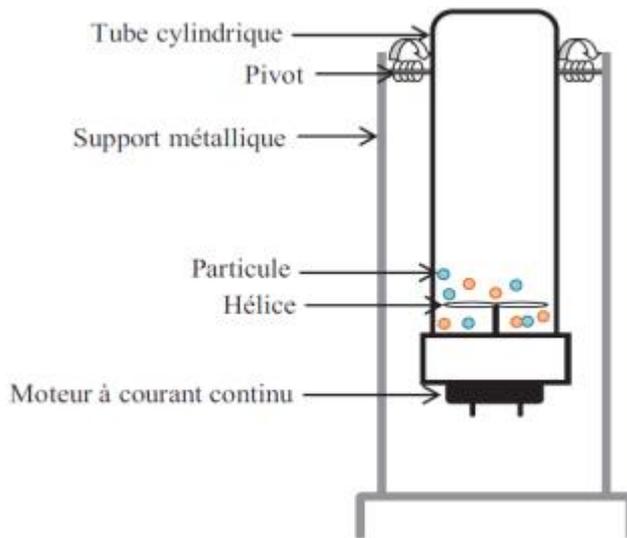


Figure I-8: Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur [37].

b. Dispositif de charge par cyclone

Le dispositif est constitué d'un cylindre isolant (Figure I-12), disposé en position verticale. Les matériaux granulaires ou pulvérulents à charger sont introduits en direction horizontale, normale à la paroi intérieure du cylindre, par un ventilateur, dont la vitesse de rotation peut être modifiée. Le frottement continu entre les particules et la paroi génère la majorité de la charge acquise dans un dispositif de ce type [7], [38–39]. Le fonctionnement de ce dispositif permet également une alimentation ininterrompue du séparateur triboaéro-électrostatique, cependant, son efficacité pour les particules fines doit encore être évaluée.

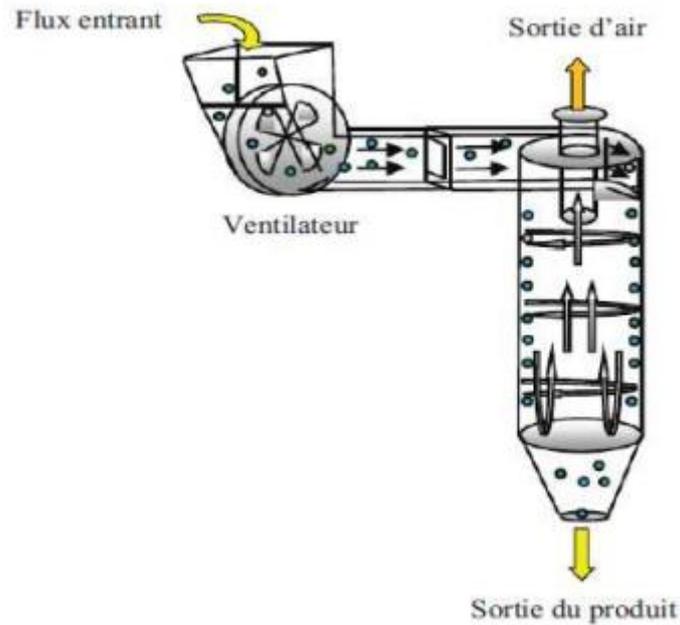


Figure I-9 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone [40].

c. Dispositif de charge de type statique

Le dispositif de chargement statique (Figure I.10) est un dispositif extrêmement simple. En effet, il est composé d'une enceinte parallélépipédique isolante ou métallique à l'intérieur de laquelle sont disposées plusieurs plaques inclinées et détachables. Les particules tombent verticalement et glissent par gravité sur les parois. Le chargement s'effectue donc lors de ce glissement/frottement [41].

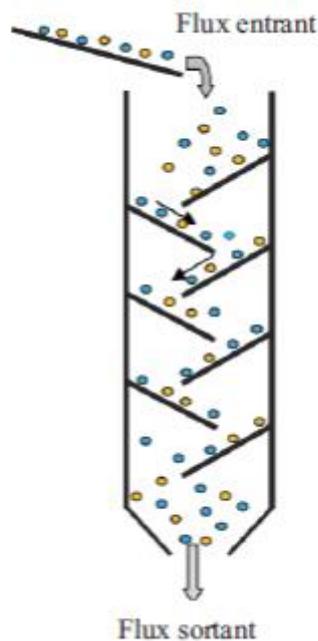


Figure I-10: Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique [42]

d. Dispositif à cylindre tournant (Tube rotatif):

Dans le dispositif à cylindre tournant, le mélange granulaire de plastique est introduit dans un tube rotatif. La rotation du cylindre provoque la culbute des particules qui se chargent par contacts répétés : c'est le phénomène de triboélectricité. Ce cylindre est légèrement incliné par rapport à l'horizontal afin que les particules puissent en sortir par gravité. Différents dispositifs ont été imaginés pour améliorer l'effet de la charge et éliminer les agglomérats. En faisant tourner un cylindre équipé d'ailettes (composées du même matériau que le cylindre) [43], au niveau de sa surface intérieure [44], il pourra fournir non seulement une plus grande probabilité de collisions particule-particule, en raison de l'agitation, mais aussi une plus grande surface de contact pour les collisions particule-paroi par rapport au modèle à surface interne lisse. Ce dispositif se caractérise par sa simplicité et sa faible consommation d'énergie.

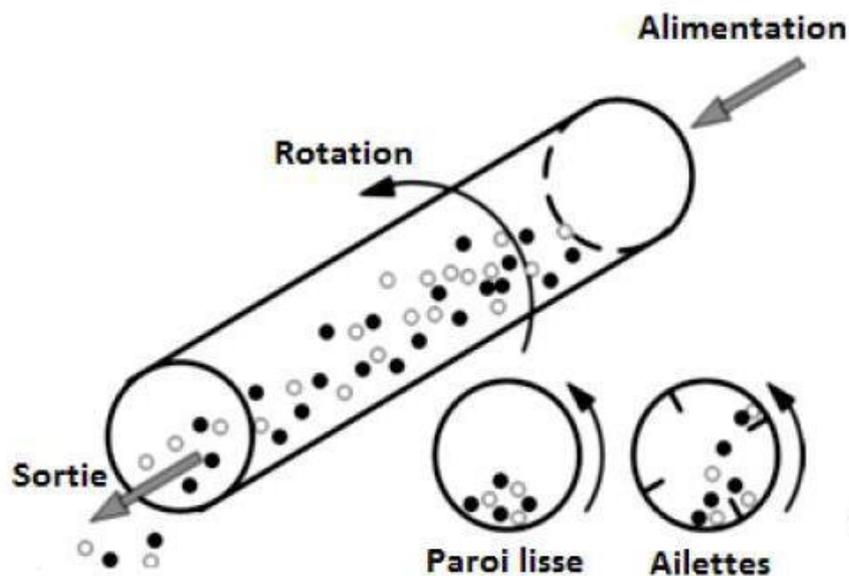


Figure I.11: Représentation schématique d'un dispositif de charge à cylindre tournant.

I.2 Les séparateurs électrostatiques :

Séparation électrostatique de matériaux granulaires De nombreux procédés de séparation existent pour bon nombre de mélanges, qu'ils soient conducteur – isolant, conducteur – conducteur ou isolant – isolant[45]. Toutefois, ces procédés sont souvent coûteux (aussi bien financièrement qu'en termes d'énergie), et sont souvent spécifiques à un seul type de mélange. L'avantage des séparateurs électrostatiques est sans conteste leur faible consommation d'énergie et leur grande adaptation. Ainsi, de nombreux laboratoires de recherche concentrent leur travail dans l'amélioration de cette technologie afin d'obtenir de meilleurs résultats de séparation [46-47].

I.2.1. Séparateur de matériaux conducteurs et isolants

Deux types de séparateurs sont cités ci-dessous qui peuvent être utilisés pour séparer des matériaux conducteurs-isolants comme le séparateur à tambour et des matériaux conducteurs-conducteurs comme le séparateur à électrode plaque.

a) Séparation électrostatique à électrode plaque

Le principe de fonctionnement de l'électro-séparateur à plaque peut être décrit comme suit : les granules semi-conducteurs (mauvais et bon conducteurs) sont transportés par le vibro-transporteur électromagnétique (1) et déposés sur l'électrode plaque reliée à la terre (2). Les particules « glissent » ensuite à la surface de la plaque et se comportent différemment suivant qu'elles sont électriquement plus ou moins bonnes conductrices [48].

- **Les granules conducteurs**, en arrivant dans la zone du champ électrique généré par l'électrode statique de forme elliptique (3), acquièrent par induction électrostatique une charge de signe opposé au potentiel de la haute tension continue. Ils subissent alors une force d'attraction électrique exercée par cette électrode et se déposent dans la partie droite du collecteur (4).
- **Les granules non conducteurs**, vu leur constante de relaxation élevée, n'acquièrent pas de charge par induction électrostatique. Ils ne sont donc pas attirés par l'électrode elliptique et tombent sous l'action de leur poids et de leur vitesse dans la partie gauche du collecteur qui leur est destinée.

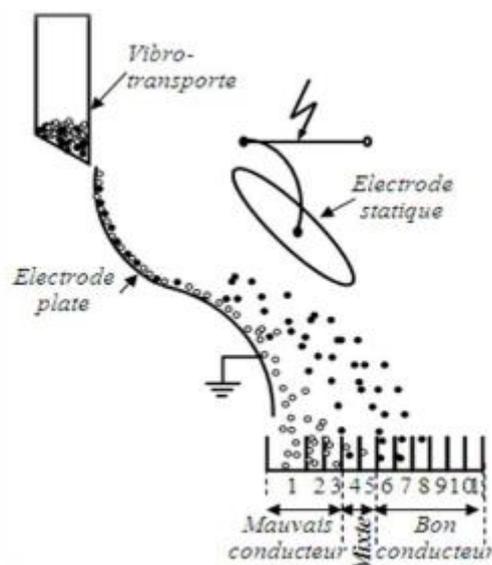


Figure I.12 Schéma simplifié du principe de l'électro-séparation à plaque [48]

b) Séparateur électrostatique à tambour

Le séparateur à tambour, comme celui montré sur la figure I.13, est le modèle le plus utilisé. Son principe de fonctionnement consiste en la création de charges électriques par ionisation de l'air grâce à une électrode (1) et ainsi les granules déposées par le vibro transporteur (4) sur le cylindre tournant (tambour) (3) acquièrent tous une charge électrique de même signe que le potentiel HT.

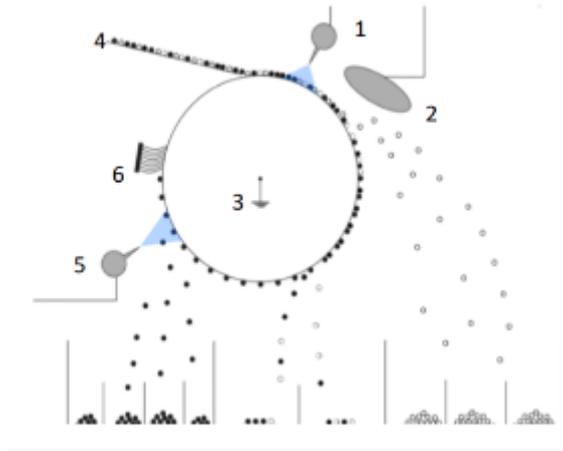


Figure I.13: Représentation schématique d'un séparateur électrostatique à tambour (1) : Electrode couronne reliée à une source de haute tension (HT) ; (2) : Electrode statique reliée à la même source de HT ; (3) : Electrode cylindrique reliée à la terre ; (4) : Vibro-transporteur ; (5) : Electrode de neutralisation reliée à une source HT alternative ; (6) : Brosse ; Les granules isolant à la surface du tambour grâce à une force d'image électrique

$$F_i = \frac{Q^2}{4\pi\epsilon_0(2R)^2}$$

Avec : Q : Charge du granule acquise par bombardement ionique dans la zone de décharge couronne

générée entre les électrodes (1) et (3) (Figure I.13).

R : distance séparant le centre du granule de la surface du tambour relié à la terre.

Les granules conducteurs perdent rapidement leur charge à travers le tambour relié à la terre, en arrivant dans la zone du champ électrostatique généré par l'électrode statique de forme elliptique (2), ils acquièrent par influence électrique une charge de signe opposée au potentiel HT. Ils sont ensuite attirés par l'électrode elliptique et déposés dans la partie droite du collecteur.

Il existe des installations regroupant en série et en parallèle plusieurs unités de séparation de ce type. Ainsi, la société américaine CARPCO [49] propose une installation où le montage de deux ou trois séparateurs en série (l'alimentation d'un séparateur est constituée d'un des produits obtenus dans le séparateur qui le précède) permet à l'utilisateur d'améliorer la pureté des produits obtenus. En mettant en parallèle deux ou plusieurs unités de séparation (parfois même des dizaines d'unités), on obtient une installation capable de traiter des quantités plus importantes de matériaux. L'électro-séparateur à tambour tournant, utilisant la décharge couronne pour charger les granules permet de séparer un mélange granulaire isolant-métal

(PVC/Cuivre par exemple) avec une pureté qui peut atteindre les valeurs de 100%. La séparation électrostatique du cuivre, d'aluminium et des matériaux isolant électrique représente une technologie économiquement viable pour la préservation de l'environnement ; car elle offre du plastique recyclé de qualité élevée et une meilleure efficacité pour le recouvrement des matériaux que les méthodes conventionnelles de traitement des déchets. Elle représente de nos jours, une technologie moderne de recyclage des matériaux usagés issus des déchets industriels, elle est considérée comme la meilleure possibilité utilisée pour la séparation d'un, mélange de granules isolant- métal. (La figure I.14) représente le séparateur électrostatique à cylindre tournant appartenant au laboratoire IRECOM de l'université de Sidi Bel Abbés.



Figure I.14: Photographie de l'électro-séparateur réalisé au laboratoire IRECOM [49]

La figure I.14 représente un projet réalisé dans le cadre d'un Projet National de Recherche PNR, entre les laboratoires IRECOM & APELEC de l'université Djillai Liabes de Sidi Bel-Abbes, pour l'installation d'un séparateur électrostatique de particules métal/plastique en collaboration avec l'entreprise de récupération de l'ouest ERO, spécialisée dans l'industrie de récupération et de recyclage.



Figure I.15 Séparateur électrostatique à tambour industriel installé à l'ERO

I.2.2 . Séparation de matériaux isolants

Des multiples installations destinées à la séparation tribo-électrostatique des matériaux granulaires plastiques ont été conçues et construites comme le séparateur tribo aéro-électrostatique à deux étages, le séparateur à deux disques métalliques tournant et un autre à deux électrodes tournant. Le point commun entre ces dispositifs est de réaliser deux opérations successives, le chargement triboélectrique des particules et leur séparation.

a) Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages

L'installation est composée de deux étages superposés, détachables, attachées à un même support vertical. Le séparateur tribo-aéro-électrostatique, situé à l'étage supérieur, est une enceinte parallélépipédique (hauteur : 500 mm ; largeur : 130 mm ; profondeur : 110 mm), ayant deux parois transparentes, afin de permettre la visualisation des phénomènes. Les parois latérales, opaques, ont des électrodes en aluminium collées sur leurs surfaces internes. Ces électrodes sont connectées à deux alimentations haute tension continue variable (0... 60 kV) de polarités différentes, afin de créer un champ électrique suffisamment fort pour attirer les granules chargés et contrôler ainsi leurs trajectoires. La charge des granules se produit par effet triboélectrique dans le lit fluidisé créé à l'intérieur de cette enceinte. L'air de fluidisation est fourni par une soufflante à débit variable. Le diffuseur d'air (une plaque perforée située à l'extrémité inférieure de l'étage supérieur de l'installation) assure l'uniformité de la fluidisation du lit de granules. Ceux-ci sont introduits dans l'enceinte de séparation par un entonnoir, alimenté par un vibro-transporteur à débit ajustable. Sous l'action combinée des forces électriques, aérodynamiques et gravitationnelles, ils se séparent essentiellement en fonction de la polarité de leur charge et sortent par le bas de cette enceinte (figure I.16). Deux chambres en SAN/PMMA dirigent les deux flux de granules ainsi créés vers l'étage inférieur

de l'installation, composé de deux séparateurs électrostatiques à chute libre. Les électrodes de ces séparateurs ont les dimensions 520 mm x 100 mm et sont collées sur quatre plaques isolantes en plexiglas (650 mm x 110 mm). Les extrémités supérieures de ces quatre plaques sont positionnées aux deux pivots, afin de se déplacer et former des angles allant de 0° jusqu'à 45° par rapport à la verticale. Les deux plaques centrales sont connectées à la terre, tandis que les deux électrodes extérieures, connectées à des alimentations haute tension de polarités opposées. La récupération des produits séparés est faite dans deux collecteurs identiques, comportant chacun dix compartiments (longueur : 100 mm ; largeur : 30 mm ; profondeur : 85 mm) [46].

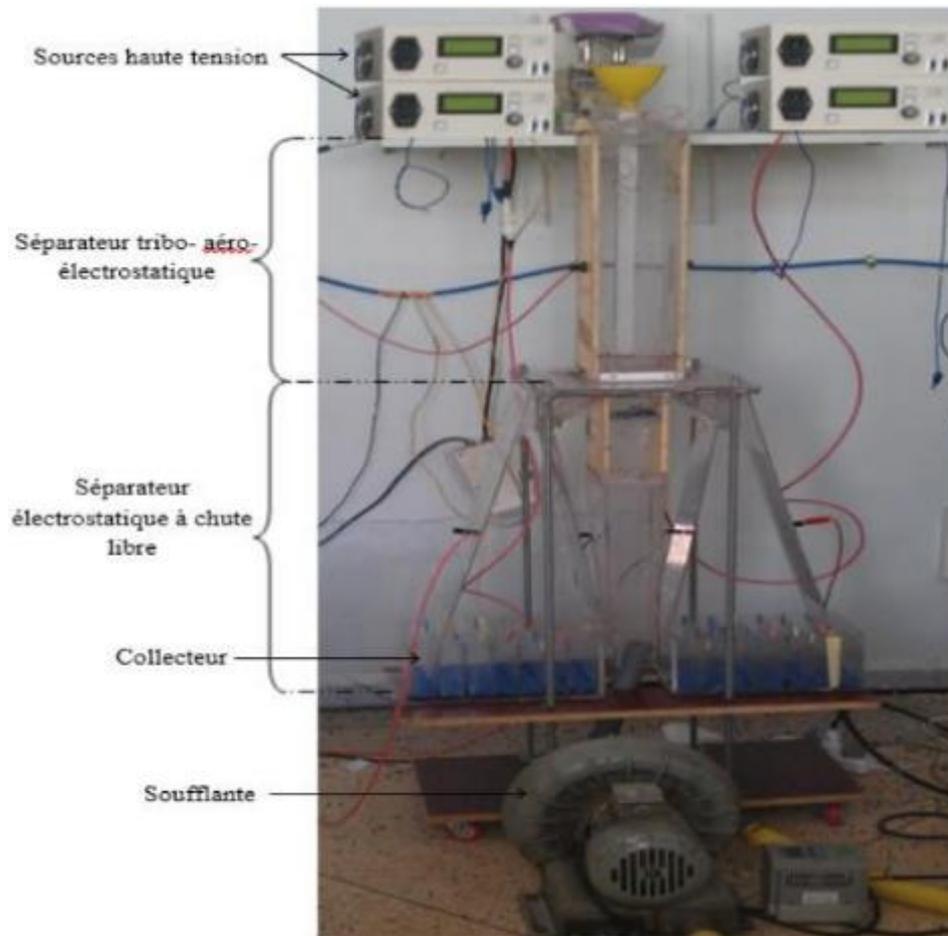


Figure I-16: Photos du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages [46]

b) Séparateurs à disques métalliques tournants

L'aspect général de ce type de séparateur tribo-aéro-électrostatique [50] est présenté sur la figure I.17. Une quantité de matériaux est introduite dans un lit fluidisé généré dans une chambre de séparation ((2) ; 210 x 225 x 180 mm) composée de parois en PMMA transparent. Une turbine de 0,75 kW (7) fournit le débit d'air souhaité. Le lit fluidisé se forme grâce à une plaque poreuse qui distribue uniformément l'air. Les effets électrostatiques dans un lit fluidisé sont dus à des collisions entre les particules elles-mêmes et entre les particules et les parois de la chambre de séparation (2). Il en résulte la tribo-électrification des matériaux [51-50],[52].

Le champ électrique est généré entre deux disques tournants ((3) ; diamètre : 220 mm ; épaisseur : 2 mm) plongés dans un lit fluidisé et situés à une distance d comprise entre 40 mm et 120 mm l'un de l'autre. Chaque disque est relié à un générateur de haute tension de polarité opposée à l'autre et est entraîné en rotation par un moteur à vitesse variable (1). Les produits sont récupérés dans deux boîtes collectrices (5) placées à l'extérieur de la chambre de séparation.



Figure I-17: Photographie d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques [55]. (1) Moteurs électriques ; (2) Chambre de séparation ; (3) Electrodes-disques tournants ; (4) Collecteurs ; (5) Cages de Faraday ; (6) Balances électroniques ; (7) Turbine ; (8) Armoire électrique.

Pour chaque expérience, la turbine est mise en route et les matériaux sont donc chargés dans le lit fluidisé. Ensuite, les disques tournants et la haute tension sont mis en marche et la séparation est maintenue jusqu'à ce que la pureté des produits séparés commence à diminuer. Il a été constaté que la pureté des deux produits récupérés augmente puis commence à diminuer après une certaine durée de traitement. Il n'est pas nécessaire d'utiliser un débit d'air de fluidisation trop important. En effet, quand le débit augmente, les particules vont acquérir une charge triboélectrique plus importante et, par conséquent, l'attraction entre les deux types d'isolants va diminuer l'efficacité de la séparation. Lorsqu'un disque est complètement recouvert d'un type d'isolant, le second isolant va commencer à se coller à celui-ci. En plus de la force d'image électrique, qui provoque l'attachement

des particules sur les disques, une autre force mécanique, la force centrifuge, doit être considérée. Lorsque cette force augmente, proportionnellement à la vitesse de rotation, n , cela provoque le détachement des particules et donc une baisse de l'efficacité de la séparation. Dans un second temps, pour de faibles valeurs de n , les particules ont assez de temps pour

couvrir toute la surface des disques provoquant alors l'attachement de particules de charges opposées, diminuant ainsi la pureté des produits récupérés. Les résultats obtenus sont prometteurs : les mélanges de différents plastiques micronisés sont séparés avec de hauts niveaux de puretés. De premiers essais avec des particules granulaires montrent aussi une bonne efficacité de ce système.

c) Séparateur à électrodes cylindriques tournantes

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques tournantes est présenté sur la figure I.18 a été conçu dans le laboratoire IRECOM (Algérie). Le mélange à séparer est introduit dans la chambre de fluidisation qui sert aussi de chambre de séparation. Celle-ci a une section rectangulaire (230×80×70 mm) et ses parois sont en PMMA transparent. Une turbine, d'une puissance nominale de 1,1 kW, permet l'injection de l'air à vitesse variable dans la chambre de fluidisation. Le champ électrique est généré entre deux électrodes cylindriques tournantes (diamètre : 160 mm, longueur : 300 mm) distantes de 8 cm et situées de part et d'autre de la chambre de séparation. Chaque électrode est connectée à une source de haute tension continue de polarité opposée à la seconde. Leur entraînement à vitesse variable est réalisé par deux moteurs à courant continu. Les produits séparés sont récupérés dans les deux bacs collecteurs placés de chaque côté de la chambre de séparation [53]. Le mélange de matériaux pulvérulents qui a été testé sur cette installation comprend deux types de PVC, l'un de couleur blanche et l'autre de couleur grise broyés dans une usine de fabrication de tuyaux de plastique (CHIALI, Sidi-Bel-Abbès, Algérie). La taille des particules est typiquement comprise entre 150 μm et 250 μm .



Figure I.18: Photographie du séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes cylindrique tournantes. (1) Moteur à courant continu ; (2) Chambre de séparation ; (3) Electrodes cylindriques tournantes ; (4) Bacs collecteurs [53].

Conclusion

De nombreuses recherches ont été menées avec divers dispositifs de chargement triboélectrique et des séparateurs électrostatiques pour le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), ainsi que sur les matériaux récupérés issus du broyage de ces derniers. Le rendement de ces installations est crucial, mais la séparation des matériaux isolants reste complexe en raison de la complexité des phénomènes tribo-électriques. Dans le chapitre qui suit, Nous commencerons par une vue d'ensemble des points essentiels concernant Arduino, son logiciel et le programme utilisé pour le contrôle de la vitesse. Ensuite, nous fournirons une description détaillée du dispositif de chargement.

CHAPITRE II
Arduino dans le contrôle de vitesse du
convoyeur

II.1 introduction

L'utilisation d'un microcontrôleur comme l'Arduino pour la gestion de la vitesse du convoyeur présente de nombreux avantages. L'Arduino est une plateforme de prototypage rapide qui permet une flexibilité de programmation et une intégration facile avec divers capteurs et actionneurs. Avec des modèles comme l'Arduino Due, qui offre une puissance de traitement accrue et de nombreuses broches d'entrée/sortie, il est possible de réaliser un contrôle de vitesse précis et réactif. De plus, l'Arduino est accessible en termes de coût et dispose d'une vaste communauté de support, ce qui en fait un choix idéal pour les applications de contrôle de vitesse dans les systèmes de séparation électrostatique. Grâce à l'Arduino, il est possible de développer des solutions de contrôle de vitesse personnalisées, fiables et économiques, adaptées aux besoins spécifiques de chaque application industrielle.

Ce chapitre commence par donner un aperçu général des points essentiels d'Arduino, de son logiciel et du programme utilisé pour le contrôle de la vitesse. Ensuite, il se termine par une description détaillée du dispositif de chargement.

II.2 Historique

Arduino est un projet issu d'une équipe de développeurs composée d'enseignants qui Banzi et d'étudiants de l'école de Desing à Ivrea en Italie en hiver 2005. Les étudiants qui se plaignent envers leur enseignant appelé Banzi , de ne pas avoir accès à des solutions bas prix pour accomplir leurs projets de robotique. Par la suite ,l'enseignant Banzi a contacté David Cuartielles, qui est un ingénieur Espagnole spécialisé dans les microcontrôleurs pour créer leur propre carte en embarquant dans leur histoire un des étudiants de Banni ,David Mellis qui sera chargé de créer le langage de programmation allant avec la carte .En deux jours David écrira le code !Trois jours de plus la carte était créée .Ils décidèrent de l'appeler Arduino.

II.3 Définition du module Arduino

Le module Arduino est un circuit imprimé en matériel libre(plateforme de contrôle)dont les plans de la carte elle-mêmes ont publiés en licence libre dont certains composants de la carte, comme le microcontrôleur et les composants complémentaires qui ne sont pas en licence libre. Un microcontrôleur programmé peut analyser et produire des signaux électriques de manière à effectuer des tâches très diverses.

Arduino est utilisé dans beaucoup d'applications comme l'électrotechnique industrielle et embarquée ;le modélisme ,la domotique mais aussi dans des domaines différents comme l'art contemporain et le pilotage d'un robot ,commande des moteurs et faire des jeux de lumières ,communiquer avec l'ordinateur ,commander des appareils mobiles (modélisme).Chaque module d'Arduino possède un régulateur de tension +5V et un oscillateur à quartz 16MHz(ou un résonateur céramique dans certains modèles). Pour programmer cette carte, on utilise l'logiciel IDE Arduino [54] [55].

II.4 Caractéristique de la carte Arduino

Parmi les caractéristiques les plus importantes de la carte Arduino, nous avons retenu les suivantes :

- **Pas cher** : les cartes Arduino sont relativement peu coûteuses comparativement aux autres plateformes.
- **Multiplateforme** : le logiciel Arduino, écrit en Java, tourne sous les systèmes d'exploitation Windows, Macintosh et Linux. La plupart des systèmes à microcontrôleurs sont limités à Windows.
- **Environnement de programmation clair et simple** : l'environnement de programmation Arduino est facile à utiliser pour les débutants, tout en étant assez flexible pour que les utilisateurs avancés puissent en tirer profit également.
- **Logiciel open source et extensible** : le logiciel Arduino et le langage Arduino sont publiés sous licence open source, disponibles et peuvent être complétés par des programmeurs expérimentés.
- **Matériel open source et extensible** : les cartes Arduino sont basées sur les microcontrôleurs Atmel ATMEGA2560, ATMEGA168, ATMEGA328, etc. Les schémas des modules sont publiés sous une licence Creative Commons, et les concepteurs de circuits expérimentés peuvent réaliser leurs propres versions des cartes Arduino, en les complétant et en les améliorant.
- **Capacité de stockage de programme** : la carte Arduino est capable de stocker un programme et de l'exécuter.
- **Entrées et sorties** : la carte reçoit des informations analogiques ou numériques sur ses entrées et génère des informations analogiques ou numériques.
- **Traitement de l'information** : le microcontrôleur traite ces informations et les transmet vers les sorties numériques.

- **Collecte de données** : récupère les données des capteurs en vue de les transmettre à l'interface de commande (PC) et traduit les instructions pour faire fonctionner les actionneurs.

II.5 La carte Arduino Due

II.5.1-Définition

La carte Arduino Due est une évolution de la carte Arduino Méga et offre des performances réputées 3 fois supérieures. Elle permet de manipuler rapidement des algorithmes lourds particulièrement utiles dans le monde de la robotique . [56]

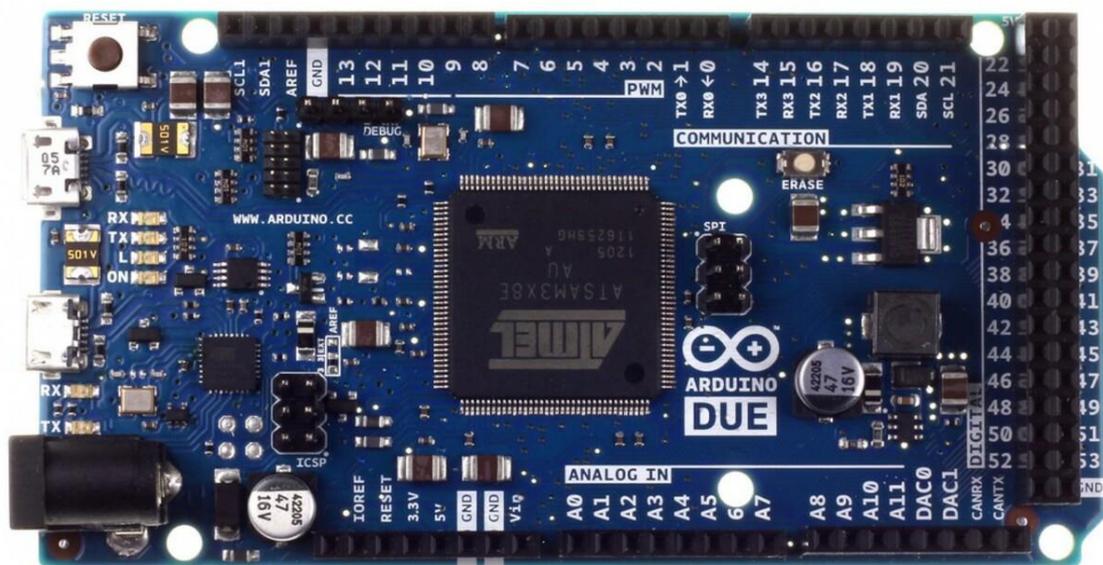


Figure II.1 La carte Arduino Due.

II.5.2- Caractéristiques de la carte Arduino utilisé (Arduino Due)

L'Arduino Due est basé sur des puces de microcontrôleur ou des MCU comme l'Atmel SAM3X8E. C'est la première carte Arduino à être basée sur ARM, en particulier sur le cœur de traitement Cortex-M3 32 bits, offrant une performance supérieure à celle des MCU 8 bits des autres cartes similaires. Cette puce Atmel (actuellement acquise par la société Microchip) a lancé sa série en 2009 pour concurrencer ses propres AVR. Certains MCU RISC sont bien plus intéressants et puissants que les précédents.

En plus de cela, l'Arduino Due offre plus de broches : 54 broches d'E/S numériques, dont 12 sont des sorties PWM. Il comprend également 12 entrées analogiques, 4 UART (ports série matériels), etc. Contrairement aux autres cartes Arduino, l'Arduino Due fonctionne à 3,3 V au lieu des 5 V habituels.

En fonctionnant à 3,3 V, l'Arduino Due est compatible avec tous les shields Arduino fonctionnant à cette même tension. Cependant, ils doivent respecter la norme de brochage Arduino 1.0.

Cette carte Arduino Due a tout ce dont vous avez besoin pour commencer à créer vos projets : connectez-la simplement à un PC en utilisant un câble microUSB et commencez à télécharger vos sketches pour la faire fonctionner. À noter, cet USB ne servira pas d'alimentation externe, mais vous pouvez utiliser un adaptateur AC/DC compatible avec la prise intégrée de cette carte (broche centrale + 2,1 mm).

II.5.3 Caractéristiques techniques

- ✓ Un port de programmation (le plus proche de la prise d'alimentation), sélectionnable dans l'IDE Arduino comme "Arduino Due (ProgrammingPort)", connecté directement à la puce 16U2.

Un port natif (le plus éloigné de la prise d'alimentation), sélectionnable comme "Arduino Due (NativeUSBPort)", connecté dir- Microcontrôleur : Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 32 bits à 84 MHz.

- Mémoire RAM : 96 Ko (répartis en 2 banques de 64 Ko + 1 banque de 32 Ko).

- EEPROM: Non disponible (ARM permet l'écriture IAP - In Application Programming - sur la mémoire flash pour les données non volatiles et le stockage de code).

- Ports microUSB : 2

- ✓ ectement au microcontrôleur SAM3X.

- Mémoire Flash : 512 Ko, tous disponibles pour le programme (aucune partie n'est réservée au chargeur de démarrage, contrairement aux autres cartes Arduino)

- Tension de fonctionnement : 3,3 V (bien qu'elle dispose d'une broche 5 V pour vos projets, ainsi que de GND ou masse)

-Tension d'entrée (recommandée) : 7-12 V

- Tension d'entrée (limite maximale): 6-16 V

- Broches d'E/S numériques : 54, dont 12 PWM

- Broches d'entrée analogiques : 12 canaux

- Broches de sortie analogique : 2 (CNA)
- Intensité du courant par broche d'E/S : 130 mA
- Intensité du courant pour la broche 3,3 V : 800 mA
- Intensité du courant pour la broche 5 V : 800 mA
- Dimensions et poids : 101,52 × 53,3 mm et 36 grammes
- Prix : Environ 30-40 €, disponible sur Amazon

En plus de ce qui précède, l'Arduino Due possède un port USB OTG haute vitesse, 4 UART, un connecteur JTAG, un bouton de réinitialisation, un bouton d'effacement, un connecteur SPI et 2 TWI. En fait, certains de ces connecteurs respectent la norme 1.0 d'Arduino :

- TWI avec les broches SDA et SCL
- Instruction IOREF qui permet à un shield, en se connectant à la configuration appropriée, d'adapter sa tension à celle de la carte.
- Une broche non connectée réservée pour une utilisation future.

Pour compléter cette section, voici le brochage des connecteurs série et autres :

- Série 0 : broche 0 (RX) et broche 1 (TX)
- Série 1 : broche 19 (RX) et broche 18 (TX)
- Série 2 : broche 17 (RX) et broche 16 (TX)
- Série 3 : broche 15 (RX) et broche 14 (TX)
- PWM : de la broche 2 à la broche 13 pour fournir un PWM 8 bits
- E/S numériques : de la broche 0 à la broche 53
- Entrées analogiques : de la broche A0 à la broche A11
- SPI: tête SPI
- CAN : CANRX et CANTX pour la communication CAN
- LED intégrée: connectée à la broche 13

- TWI1 : broche 20 (SDA) et broche 21 (SCL)
- TWI2: marqué comme SDA1 et SCL1
- DAC1 et DAC2 : sortie avec une résolution de 12 bits (4096 niveaux) avec analogWrite(), tensions de 0,55 V à 2,75 V.
- AREF: une entrée analogique comme référence de tension, utilisée avec la fonction analogReference()
- Réinitialiser: si vous placez cette ligne à un niveau de tension bas, le microcontrôleur se réinitialise.

II.5.4.Principe de fonctionnement

Les étapes pour faire fonctionner l'Arduino sont :

- On écrit sur l'ordinateur un programme en utilisant l'environnement spécifique à Arduino. Le langage de programmation est le C. Un C un peu arrangé car il contient de nombreuses fonctions spécifiques à l'Arduino permettant notamment de lire ou d'écrire sur les différentes entrées.
- On compile ce programme : c'est maintenant un code binaire exécutable. On le téléverse dans la ROM de la carte Arduino.
- La carte Arduino est maintenant « indépendante », elle exécute le programme demandé (on peut d'ailleurs la débrancher de l'ordinateur sous réserve de prévoir une alimentation externe avec des piles par exemple).

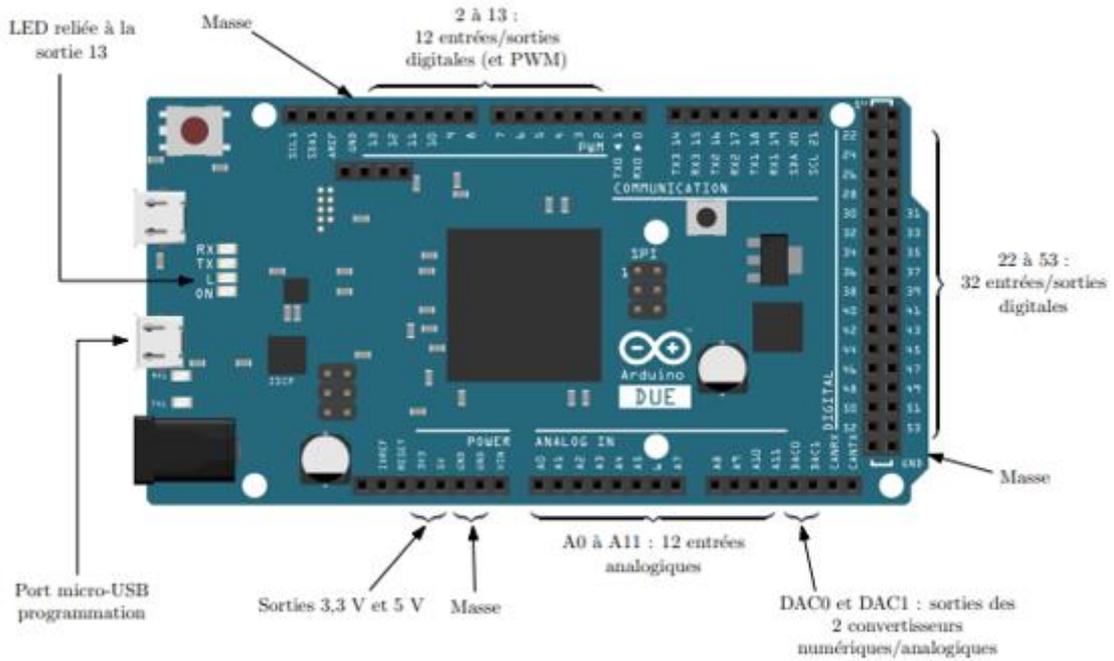


Figure II.2 : Schéma synoptique de la carte Arduino due

La figure suivante montre l'architecture interne d'une carte Arduino Due.

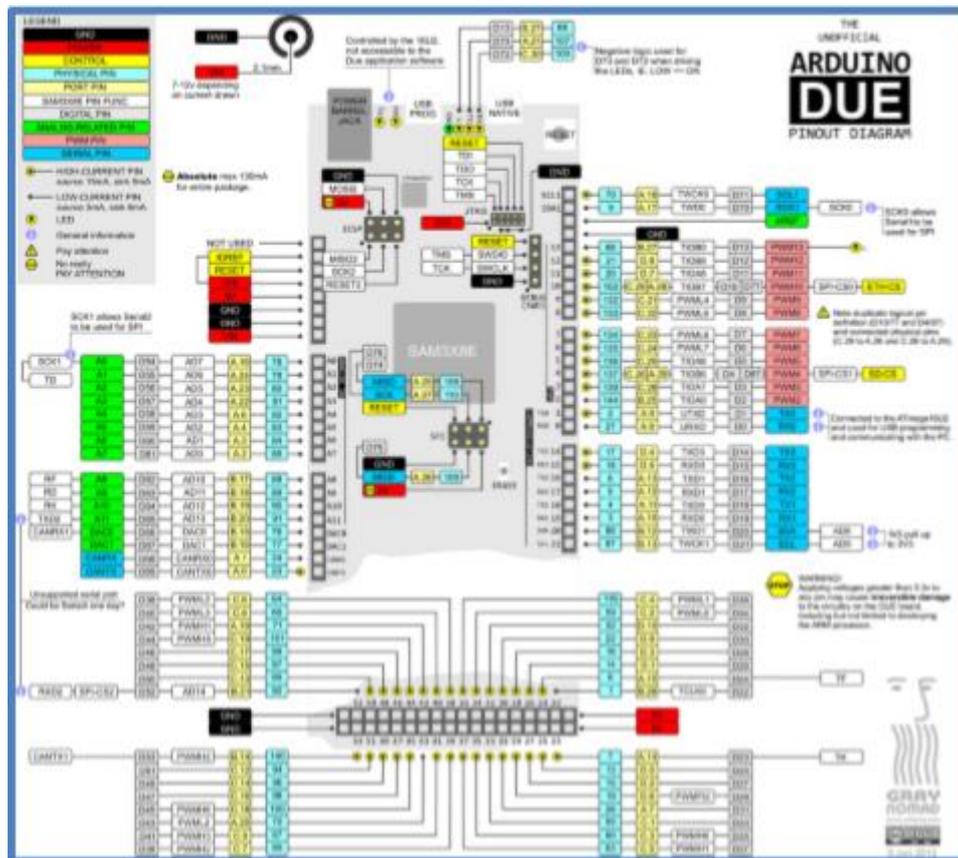


Figure II.3 : Architecture interne de la carte Arduino Due.

II.6 Présentation matériel de la plateforme Arduino

L'Arduino est composée de deux parties indissociables : La carte qui est la partie hardware Avec laquelle on travaille en construisant chaque projet et la plateforme IDE ARDUINO qui est la partie logicielle fonctionnant sur le PC celle-ci permet de mettre au point et de transférer le programme qui sera par la suite.

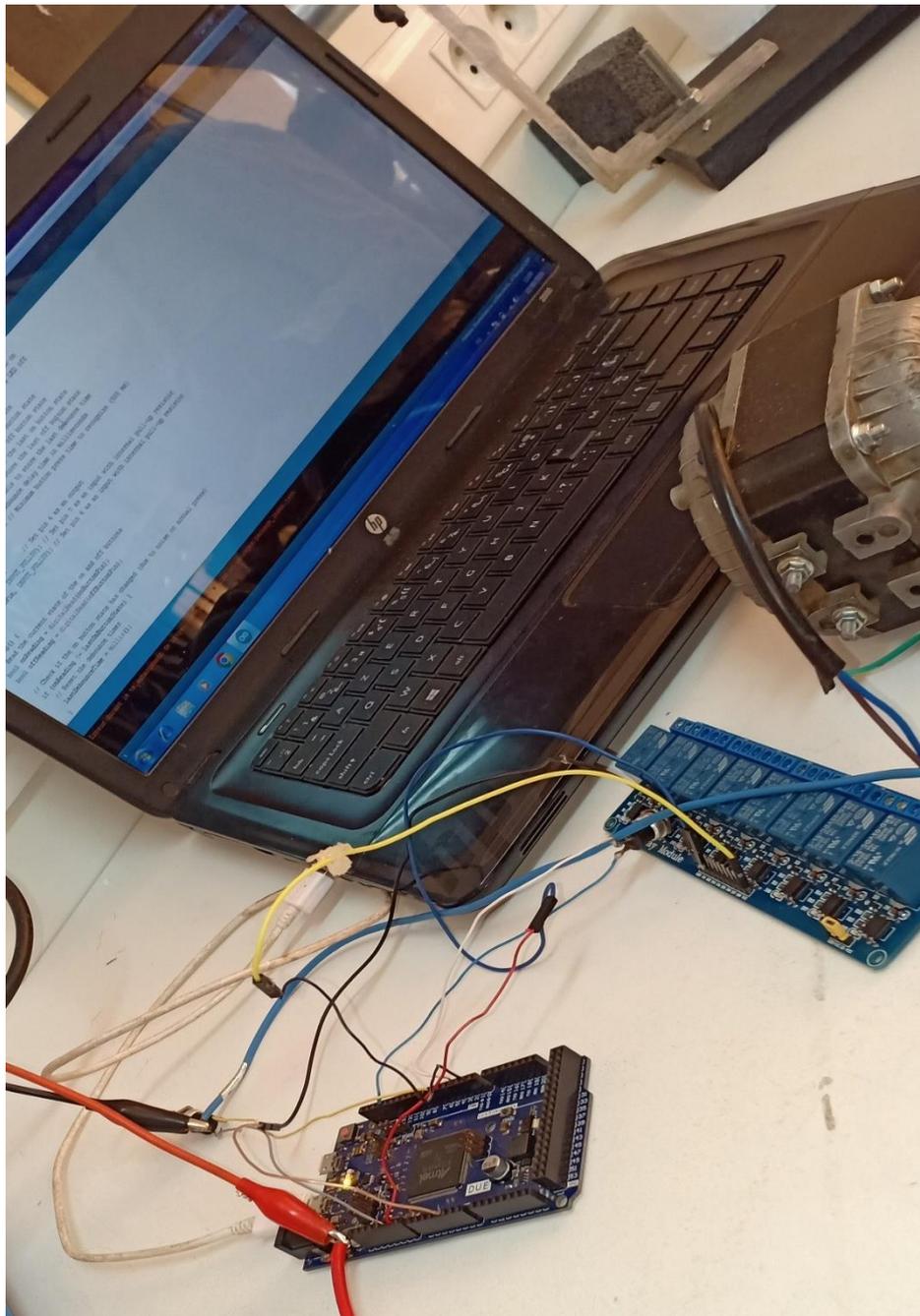


Figure II.4 : Une photo représentative d'un moteur à courant alternatif Relié à une carte Arduino Due.

Suffisamment important sur la bornes d'entrée, le solénoïde se magnétise ce qui force le contacteur à fermer le circuit de puissance. Comme il n'y a pas de liaison mécanique entre le circuit de commande et le circuit de puissance (actionnement magnétique), il y a une isolation galvanique entre les deux circuits; ce qui permet de protéger le circuit de commande.

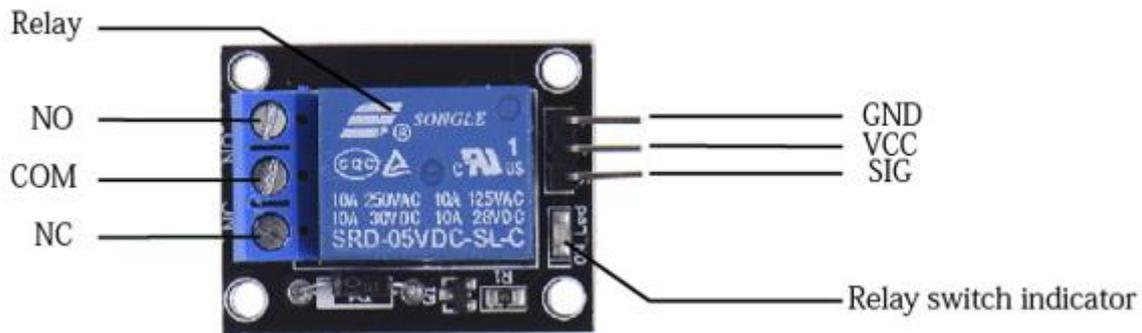


Figure II.5z : relais module

II.7 . Utilisation de l'IDE Arduino

L'IDE Arduino permet :

- ✓ d'**éditer un programme** : un programme est composé de **croquis** (sketch en Anglais), les programmes sont écrits en langage C
- ✓ de **compiler ce programme** dans le langage « machine » de l'Arduino, la compilation est une traduction du langage C vers le langage du microcontrôleur
- ✓ la zone de **sortie** donne des informations sur le déroulement de la compilation et affiche les messages d'erreur et diverses notifications.
- ✓ de **téléverser** le programme dans la mémoire de l'Arduino, le téléversement (upload) se passe via le port USB de l'ordinateur un fois dans la mémoire de l'Arduino, le logiciel s'appelle un **microgiciel**.
- ✓ la zone de **sortie** donne des informations sur le déroulement du téléversement et affiche les messages d'erreur et diverses notifications.
- ✓ de **communiquer** avec la carte Arduino grâce au **terminal** (ou **moniteur série**). pendant le fonctionnement du programme en mémoire sur l'Arduino, il peut communiquer avec l'ordinateur tant que la connexion est active (câble USB, ...)

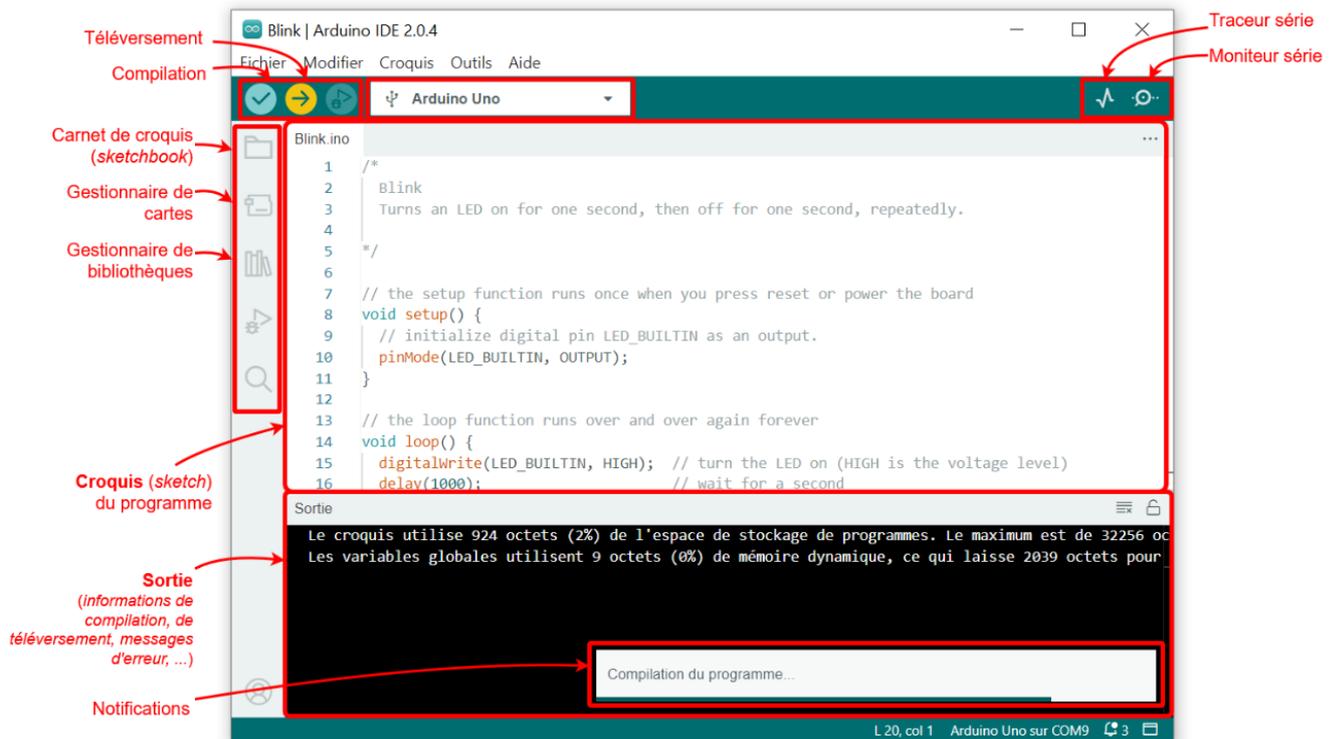


Figure II. Schéma de l'IDE Arduino : Édition, Compilation, Téléversement et Communication

► Choisir la carte que l'on va programmer

Le nom de notre carte est indiqué sur elle .Pour nous, il s'agit de la carte Arduino ARM.Allez dans le menu,<<Tools>>(outils) puis dans « Type de carte ». Vérifiez que c'est bien le nom <<<Arduino ARM 32 bits>> après Arduino Due (programming Port) qui est coché.

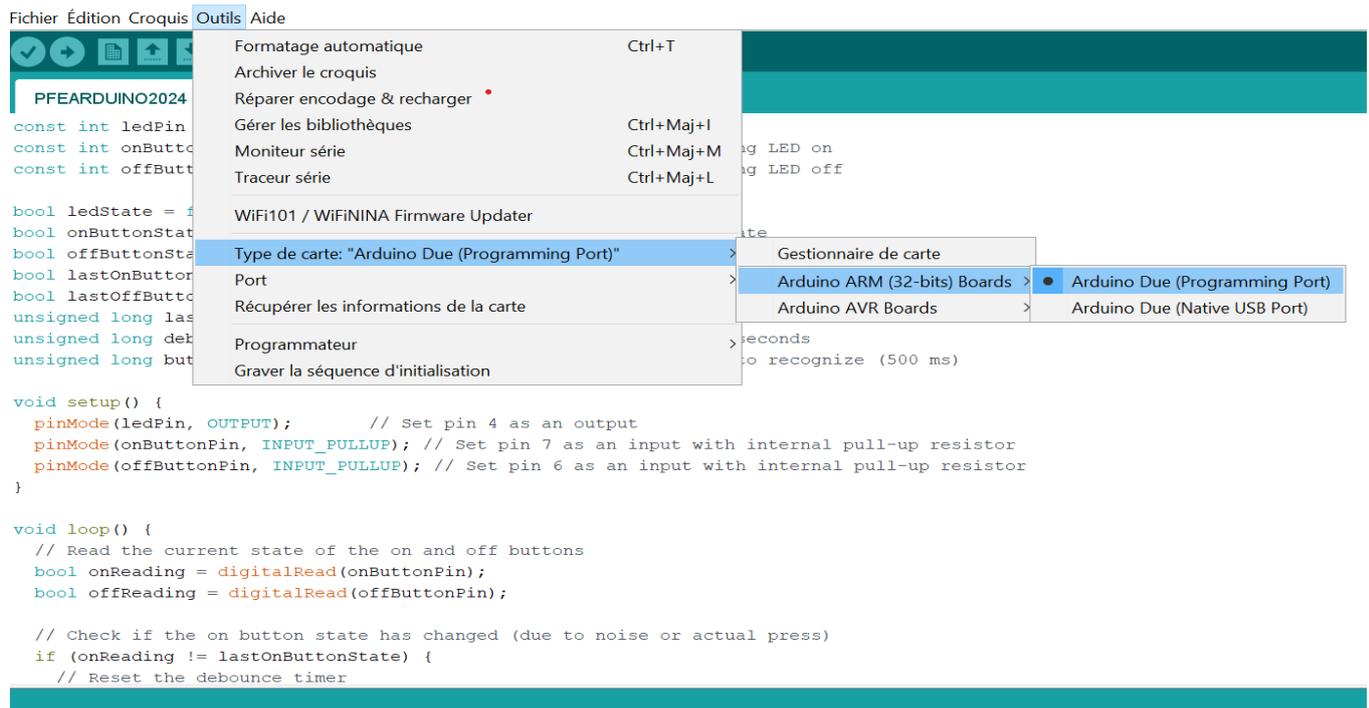


Figure II.7 : choix de la carte Arduino

► Choisir le port de connexion de la carte

Nous allons dans le menu Tools, puis Serial port. Là, nous choisissons le port COMX, X étant le numéro de port qui est affiché. Ne choisissons pas COM1 car il n'est quasiment jamais connecté à la carte. Dans notre cas il s'agit de COM3.

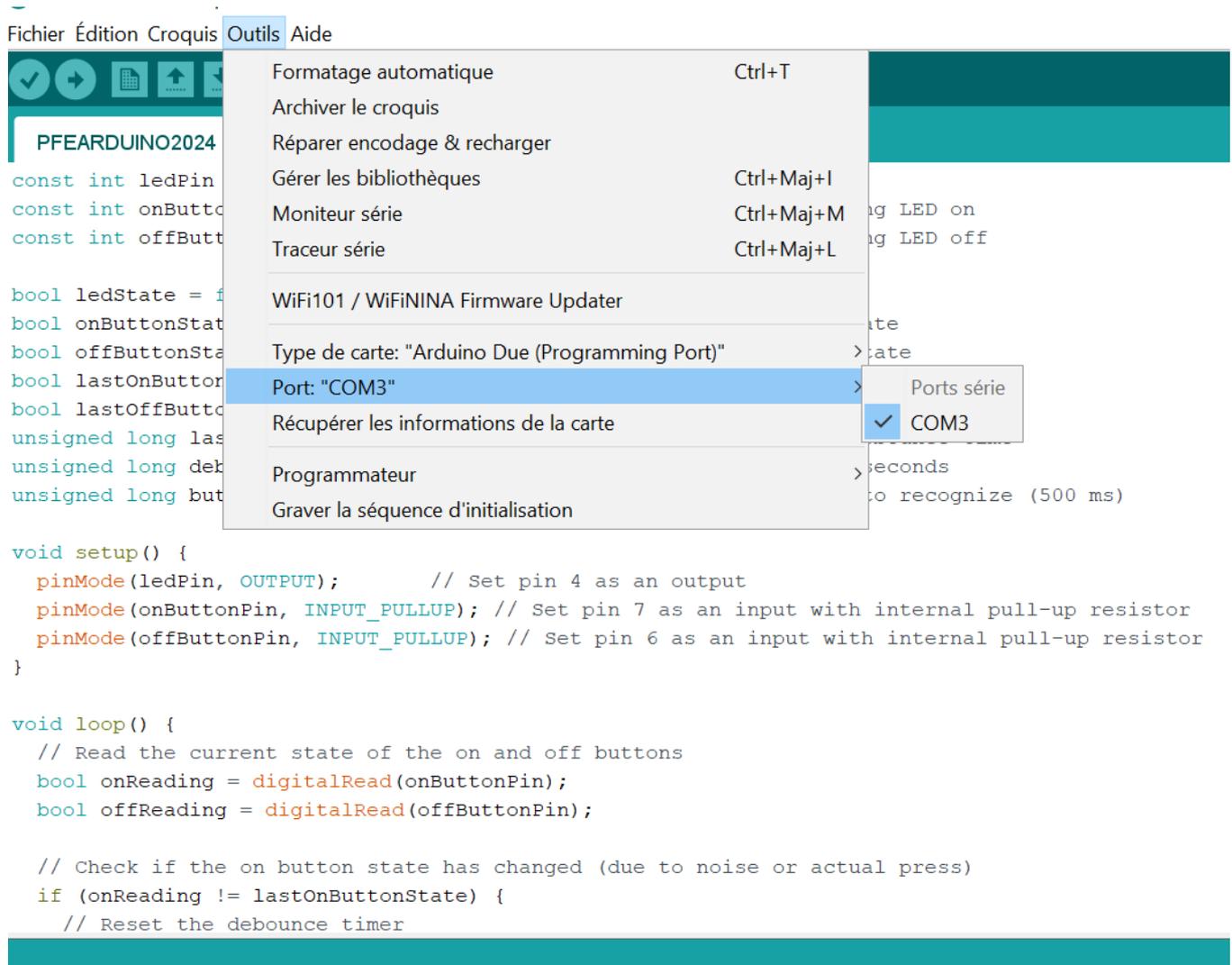


Figure II.8 : choix du port de connexion de la carte

Prochaine étape, il va falloir envoyer le programme dans la carte .Pour ce faire, il suffit de Cliquer sur le bouton Upload ou «Télécharger «en français. Finalement, le processus de rédaction du programme jusqu'à son téléchargement dans la carte peut être résumé grâce au schéma suivant :

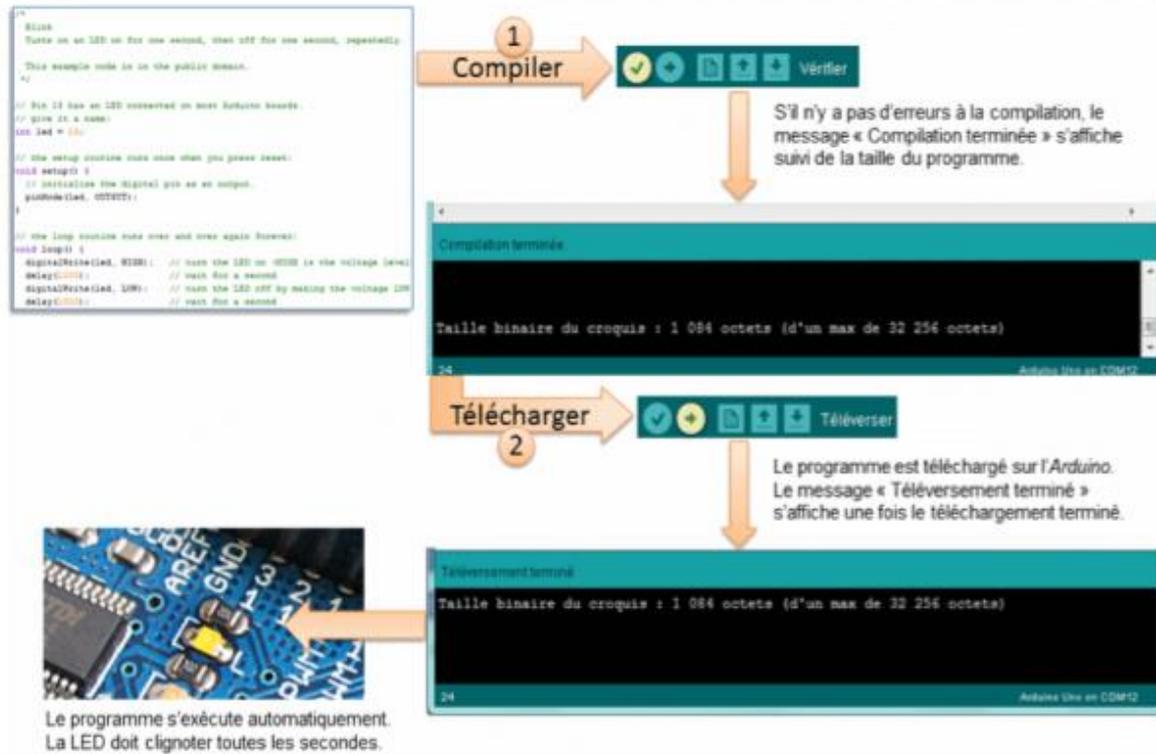


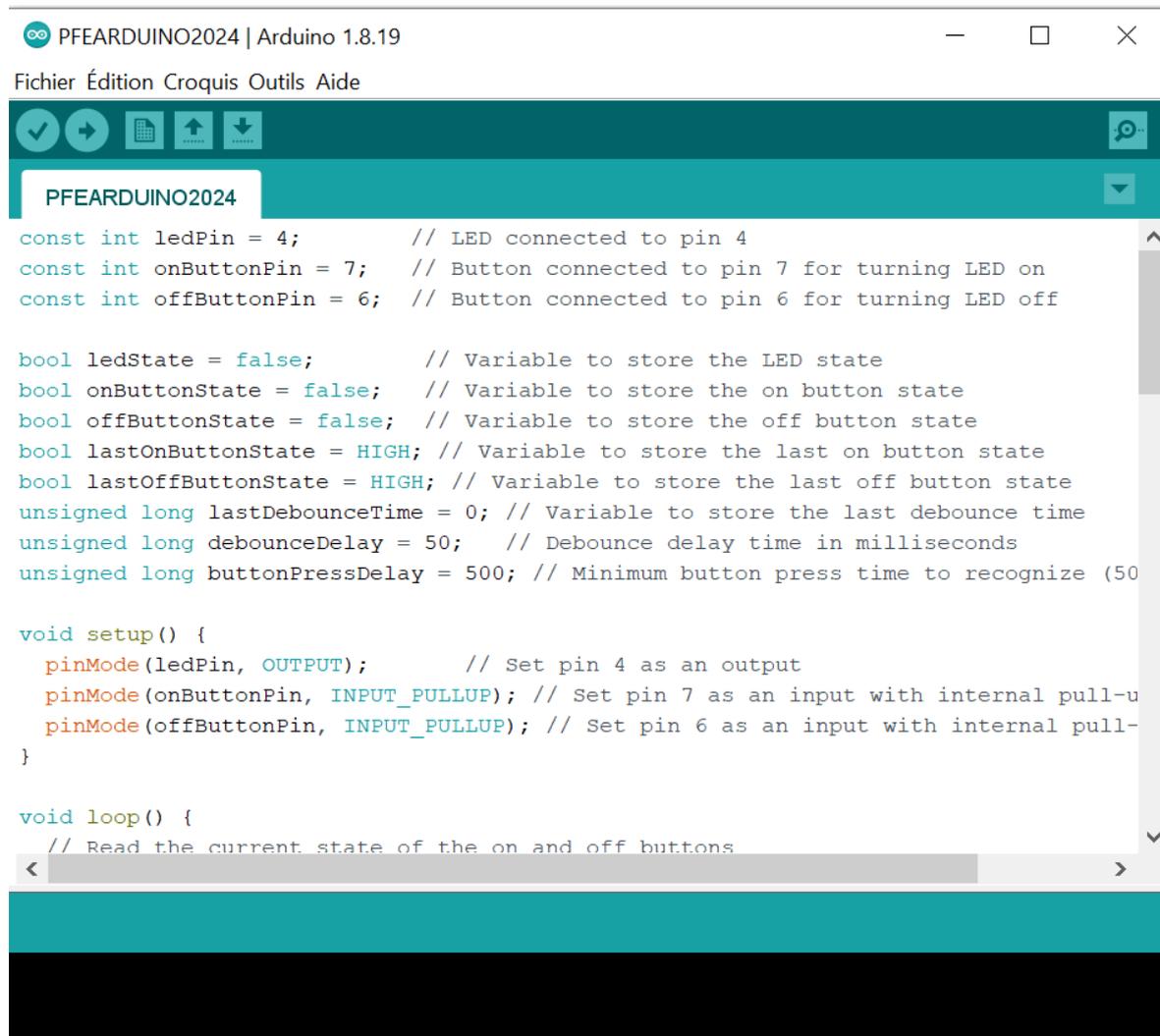
Figure II.9 : résumé du processus de rédaction de programme

II.8. Structure d'un programme

Le langage Arduino ,en plus des fonctions spécifiques accepte pratiquement toutes les instructions C habituelles (boucles, if, déclarations de fonctions, ...), mais la structure d'un programme doit comprendre toujours deux fonctions particulières:

- La fonction void setup(): c'est une fonction qui est exécutée une unique fois, dès que le programme se lance. C'est là notamment où on utilisera la fonction pinMode() qui sert à définir une «patte» digitale comme étant une sortie ou une entrée.
- La fonction void loop ():c'est dans cette fonction que se trouvera le code principal .Comme son nom l'indique ,cette fonction s'exécute en boucle.

Notre programme contrôle l'état d'un convoyeur en fonction des boutons-poussoirs (on/off) utilisés pour démarrer et arrêter le convoyeur. Il utilise des techniques de détection de rebonds pour gérer les actions lors de la pression des boutons tout en minimisant les faux déclenchements.



```
const int ledPin = 4;          // LED connected to pin 4
const int onButtonPin = 7;    // Button connected to pin 7 for turning LED on
const int offButtonPin = 6;   // Button connected to pin 6 for turning LED off

bool ledState = false;        // Variable to store the LED state
bool onButtonState = false;   // Variable to store the on button state
bool offButtonState = false;  // Variable to store the off button state
bool lastOnButtonState = HIGH; // Variable to store the last on button state
bool lastOffButtonState = HIGH; // Variable to store the last off button state
unsigned long lastDebounceTime = 0; // Variable to store the last debounce time
unsigned long debounceDelay = 50; // Debounce delay time in milliseconds
unsigned long buttonPressDelay = 500; // Minimum button press time to recognize (500ms)

void setup() {
  pinMode(ledPin, OUTPUT); // Set pin 4 as an output
  pinMode(onButtonPin, INPUT_PULLUP); // Set pin 7 as an input with internal pull-up
  pinMode(offButtonPin, INPUT_PULLUP); // Set pin 6 as an input with internal pull-up
}

void loop() {
  // Read the current state of the on and off buttons
```

Figure II.10 : Structure du programme de convoyeur

II.8.1 Explication du code

1. Déclarations de variables :

- `ledPin` : Le pin sur lequel est connectée la LED qui servira à simuler l'état du convoyeur.
- `onButtonPin` et `offButtonPin` : Les pins sur lesquels sont connectés les boutons-poussoirs pour contrôler le convoyeur.
- `ledState` : Variable qui maintient l'état actuel de la LED, `true` pour allumée et `false` pour éteinte.
- `onButtonState` et `offButtonState` : Variables qui gardent l'état actuel des boutons-poussoirs.

- ``lastOnButtonState`` et ``lastOffButtonState``: Variables pour stocker l'état précédent des boutons-poussoirs afin de détecter les changements d'état.

- ``lastDebounceTime``: Le dernier moment où l'état des boutons a été vérifié.

- ``debounceDelay``: Temps de détection des rebonds pour éviter les faux déclenchements.

- ``buttonPressDelay``: Temps minimum pour reconnaître la pression du bouton comme valide.

2. Setup :

- Initialise les pins en mode entrée ou sortie.

- Configure le bouton-poussoir avec des résistances de tirage internes pour éviter les rebonds.

3. Loop:

- Lit l'état actuel des boutons.

- Vérifie si l'état des boutons-poussoirs a changé en utilisant ``millis()`` pour mesurer le temps écoulé depuis le dernier changement.

- Si l'état a changé, réinitialise le décompte du temps de rebond.

- Si le temps écoulé depuis le changement d'état est supérieur à ``debounceDelay``, vérifie si le bouton est réellement pressé en attendant que le bouton soit pressé suffisamment longtemps.

- Si la pression du bouton est valide, met à jour ``ledState`` et contrôle l'état de la LED.

- Enregistre les états actuels comme derniers états pour la prochaine itération de la boucle.

Ce programme permet de gérer correctement les changements d'état des boutons-poussoirs tout en minimisant les faux déclenchements, Ensuite, il gère l'état de la LED en fonction des actions des boutons-poussoirs, en activant ou désactivant le convoyeur après les durées spécifiées par les variables `runTime` et `stopTime`.

II.9 Description du dispositif du chargement

Le dispositif de chargement est constitué d'un convoyeur à bande en aluminium, relié à la terre, d'une longueur de 520 mm et d'une largeur de 70 mm. Ce convoyeur est entraîné par un moteur électrique de 18 W, contrôlé par un Arduino pour gérer les temps d'arrêt et de marche, avec une régulation de vitesse assurée par un variateur. Pour les mécanismes physiques de chargement des particules isolantes, différentes électrodes sont utilisées : fil, lame, et lame en dents de scie. Celles-ci sont placées à une distance de 6 cm du convoyeur et sont connectées à une source de haute tension continue (positive ou négative). Sous l'effet d'une décharge couronne, les particules sont chargées et transportées par le convoyeur vers la cage de Faraday pour la mesure de la charge.



Figure II.11 : Convoyeur à bande transportant des produits

a) Source Haute Tension

Pour l'alimentation des électrodes actives des systèmes de décharge couronne, on a

utilisé deux sources haute tension continue l'une positive et l'autre négative, d'où la nécessité de disposer de grandes valeurs de la tension pour créer un champ électrique suffisamment fort généré par les deux générateurs haute tension réglable variant entre 0 et $\pm 50\text{kV}$ et de polarité opposées.



Figure II.12 : Source Haute Tension

a) Électromètre

Un électromètre est un multimètre de marque (Keithley 6514) a été utilisé, ayant les avantages principaux suivants :

- Mesures de charge de 10fC à $20\ \mu\text{C}$;
- 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.13 : Photographie de l'électromètre utilisé.

c) Cage Faraday

Une cage de Faraday est une enceinte utilisée pour protéger des nuisances électriques et électromagnétiques extérieures ou, inversement, empêcher un appareillage de polluer son environnement. Une cage de Faraday est constituée de deux boîtes carrées conductrices concentriques séparées par un isolant. La boîte carrée extérieure est reliée à la terre, ce qui fait écran non seulement pour éviter que les charges extérieures ne soient mesurées mais aussi pour réduire les perturbations électriques extérieures. La seconde boîte carrée est reliée à l'appareil de mesure, notamment un électromètre ou un capteur, pour la mesure des charges électriques d'un produit considéré.



Figure II.14 : Cage faraday

d) Balance

On a mesuré la masse des particules millimétriques durant toutes les expériences à l'aide d'une balance électronique d'une résolution de 0.01g.



Figure II.15 : Balance.

e) Les électrodes utilisées

Les électrodes rondes de connexion, avec un diamètre de 7,7 cm et une largeur de 3 cm, servent de base ou de support pour la connexion d'électrodes à fil ou à lame. Les électrodes à fil, mesurant 5,5 cm de longueur, sont utilisées pour des connexions précises et fines, adaptées aux circuits nécessitant des liaisons délicates. Les électrodes à lame avec dents de scie, de 6,7 cm de longueur, sont conçues pour offrir une meilleure surface de contact grâce aux dents de scie, augmentant l'adhérence et la transmission du courant électrique. Les électrodes à lame sans dents de scie, avec une longueur de 7,1 cm, fournissent une surface de contact plus uniforme, idéales pour des applications nécessitant une connexion stable et continue.

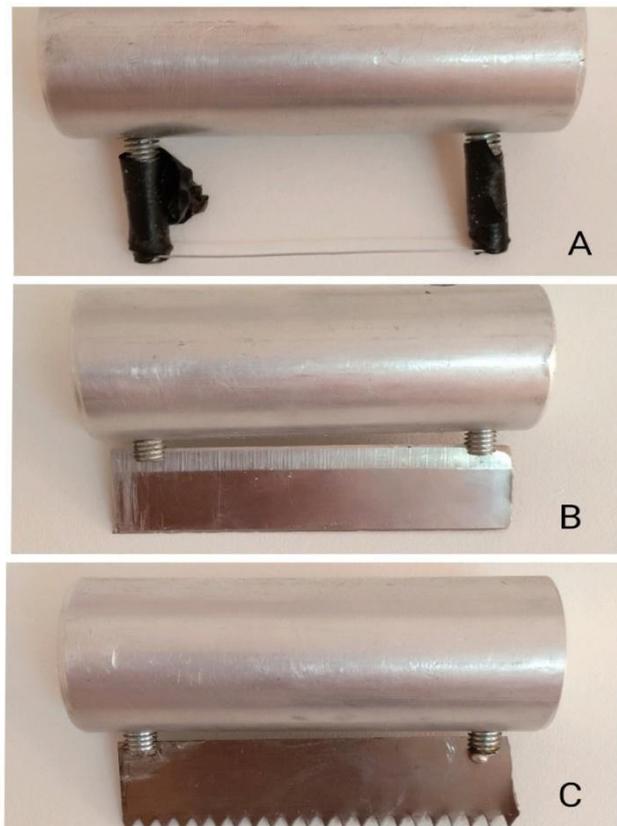


Figure II.16 : Les électrodes utilisées A) électrode à fil, B) électrode à lame, C) électrode à lame avec dents de scie.

f) Générateur AC/DC :

Un équipement qui prend une entrée de 260 volts en courant alternatif (AC) et fournit deux types de sorties : une en courant alternatif (VAC) et une en courant continu (VDC). Cet appareil est capable de fournir une tension de sortie alternative (VAC) pour des appareils nécessitant une alimentation AC et une tension de sortie continue (VDC) pour des appareils nécessitant une alimentation DC. Les deux sorties permettent de faire fonctionner une variété d'équipements électriques et électroniques à partir d'une seule source d'alimentation [58].

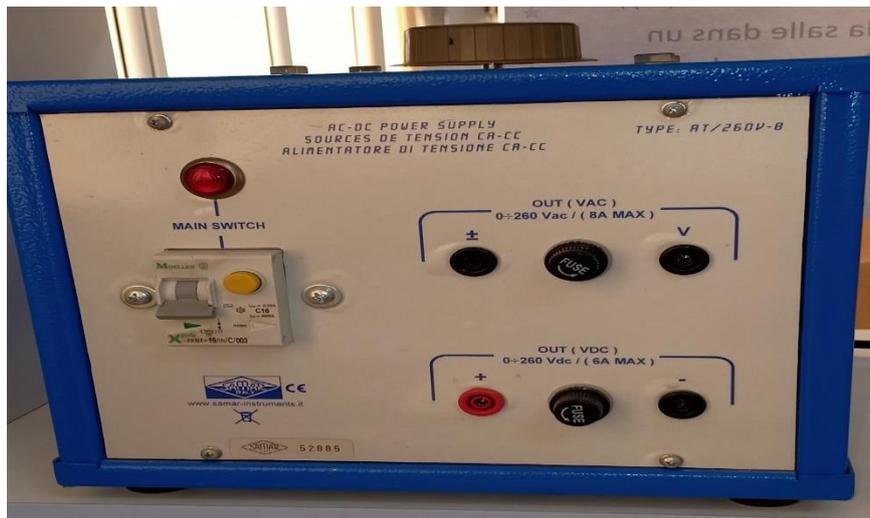


Figure II.17 : Alimentation AC-DC

g) Le moteur AC

Un moteur de ventilateur à courant alternatif conçu pour fonctionner à une tension de 220V et une fréquence de 50Hz. Ce moteur a une puissance nominale de 18 watts et un courant de 0,43 ampère. Il tourne à une vitesse de 1300 révolutions par minute (RPM). Le moteur est utilisé pour des applications de ventilation, fournissant un flux d'air efficace avec une consommation d'énergie relativement faible.



Figure II.18 : moteur AC

CONCLUSION

Dans cette section de notre étude, nous avons exploré la carte Arduino de manière générale, en mettant particulièrement l'accent sur l'Arduino Due pour le contrôle de la vitesse. Nous avons commencé par discuter de la création et de la définition de cette carte, en expliquant son fonctionnement et en soulignant ses caractéristiques. Ensuite, nous avons détaillé les éléments essentiels de l'Arduino Due, notamment ses composants matériels et sa programmation. Enfin, nous avons décrit les équipements utilisés dans le dispositif de chargement. Dans la section suivante, nous présenterons les résultats obtenus.

CHAPITRE III

Performance du chargement par effet couronne
pour la séparation électrostatique

Le résultat de tout processus de séparation électrostatique est fortement dépendant de l'efficacité de la charge des particules.

Le chargement par effet couronne, également connu sous le nom de décharge partielle, est un phénomène électrique qui se produit dans les aires vides d'un isolant électrique lorsqu'il est soumis à des tensions élevées. Cela peut entraîner la formation d'étincelles et endommager progressivement l'isolant, ce qui peut conduire à une défaillance du système électrique. Il est important de surveiller et de prévenir le chargement par effet couronne pour assurer le bon fonctionnement des équipements électriques.

Nous allons présenter dans ce chapitre les résultats de chargement par effet de couronne en utilisant différents électrodes : lame, fil, et dents de scie. Enfin, nous testerons l'efficacité du chargement en séparant un mélange binaire.

III.1. Déroulement de l'expérience

Nous avons pris un échantillon de granules de plastique (3 g pour chaque produit) et l'avons versé dans le convoyeur. Les particules de plastique se chargent via une électrode à fil, à lame ou à dents de scie. Après avoir chargé ces particules par effet couronne, elles sont transportées par le tapis roulant dans une cage de Faraday pour estimer le taux de charge acquise.

Les essais ont été réalisés sur les cinq types d'isolants précédemment cités : PC, Polystyrène blanc, Polypropylène _{bleu}, PS _{noir}, et Polypropylène _{noir et blanc}. La charge acquise des particules pour chaque type d'électrode a été mesurée en μC , ainsi que la masse du produit granulaire en grammes.

Le taux d'humidité relative (HR) pendant l'étude expérimentale était de l'ordre de 30% à 35% et la température ambiante était comprise entre 19°C et 24°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 est exprimée en nC.

Les résultats de chargement obtenus par effet couronne avec les différentes électrodes sont représentés dans des tableaux et les histogrammes, allant de $t=1\text{s}$ jusqu'à $t=15\text{s}$.

III.2. Matériaux utilisés

Plusieurs types de granules isolantes ont été utilisés dans les expériences. Les matériaux qui font l'objet de notre étude sont couramment utilisés dans la plasturgie des équipements électriques et électroniques en général .il s'agit des particules en :

- Polycarbonate (PC)
- Polystyrène blanc (PS)
- Acrylonitrile butadiene styrene bleu (ABS)
- Polystyrène noir (PS)
- Acrylonitrile butadiene styrene Blanc et noir (ABS)

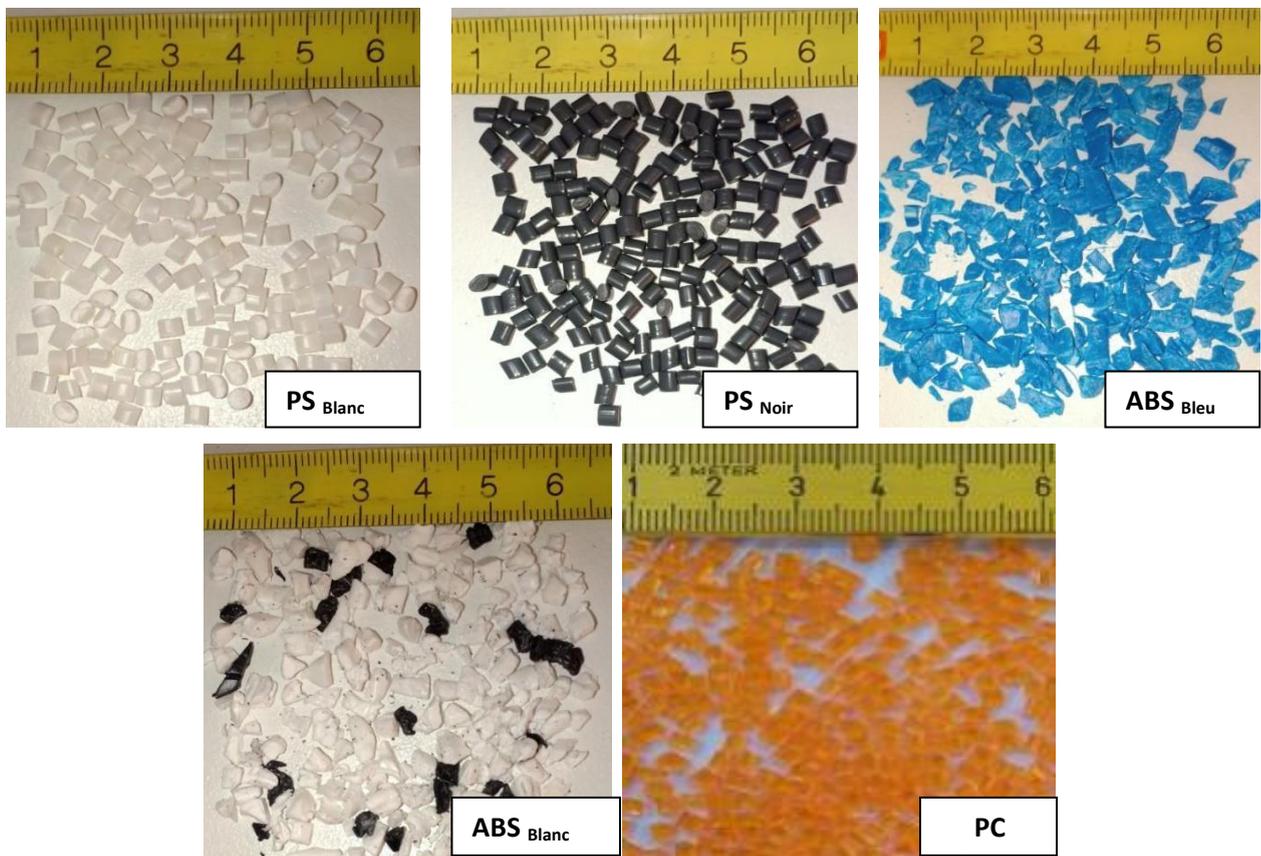


Figure III.1: échantillon utilisée.

III.3. Résultats et Discussion du dispositif de chargement

III.3.1. Electrode à fil

III.3.2.1 Influence de la haute tension positive

On commence par l'électrode à fil, que l'on alimente avec différentes valeurs de haute tension positive. Les particules sont exposées sous l'électrode pendant seulement 1 seconde. Pour éviter que les particules ne restent plus longtemps sous l'électrode, nous augmentons la vitesse du convoyeur, ce qui permet aux particules de ne pas rester exposées aux décharges électriques.

➤ $t=1s$

Tableau III.1 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules	ABS Bleu	ABS blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	4,563E-03	1,13E-02	7,82E-03	4,43E-03	8,46E-03
28	1,784E-02	1,33E-02	1,69E-02	7,88E-03	1,16E-02
32	3,76E-02	1,17E-02	1,92E-02	1,11E-02	1,20E-02
36	1,19E-02	1,84E-02	2,15E-02	1,15E-02	2,22E-02

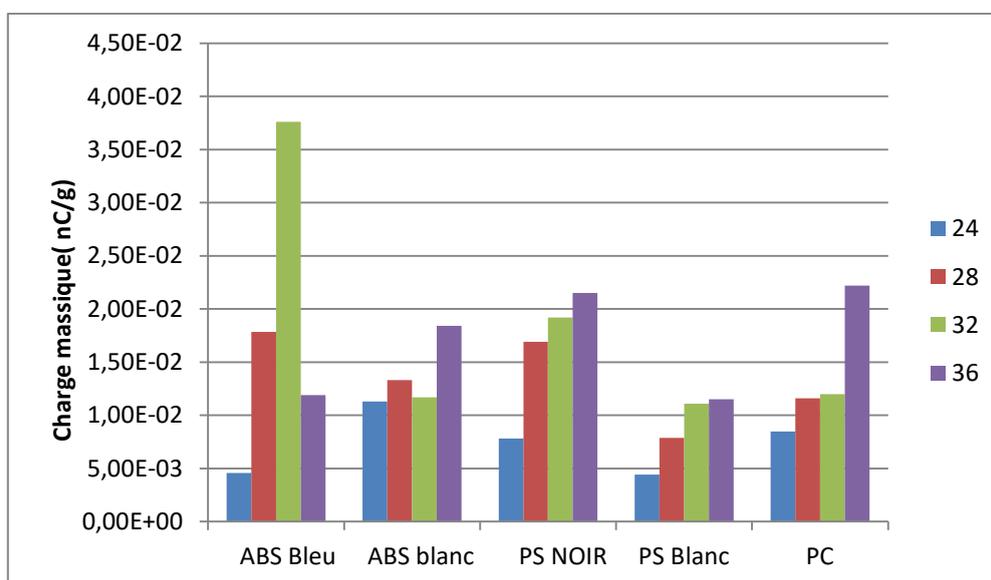


Figure III.2 : Influence de la haute tension sur la charge acquise par les 05 particules dans $t=1s$.

➤ Pour $t=5s$

Tableau III.2 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules	ABS bleu	ABS blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	1,46E-02	3,78E-03	1,92E-02	4,46E-03	6,67E-03
28	2,48E-02	1,44E-02	1,49E-02	7,19E-03	1,16E-02
32	3,74E-02	1,94E-02	1,90E-02	9,80E-03	2,14E-02
36	2,16E-02	2,04E-02	2,05E-02	1,24E-02	1,19E-02

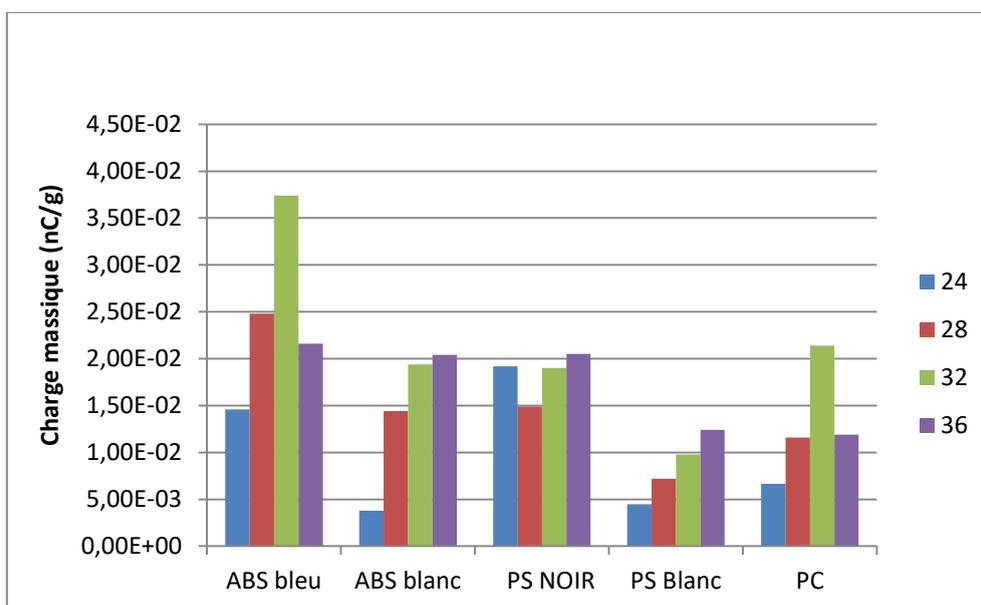


Figure III.3: Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=5s.

➤ t=10s

Tableau III.3 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules	ABS Bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	1,44E-02	7,75E-03	5,93E-03	5,12E-03	9,53E-03
28	3,23E-02	1,53E-02	1,46E-02	9,91E-03	1,54E-02
32	4,03E-02	5,00E-03	7,74E-03	1,07E-02	2,08E-02
36	2,31E-02	1,86E-02	1,63E-02	1,49E-02	2,37E-02

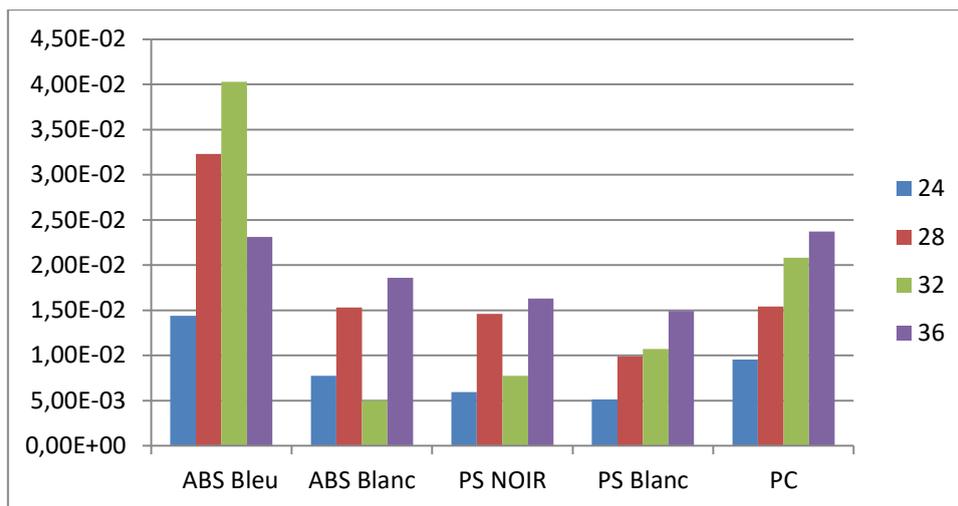


Figure III.4 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=10s.

➤ t=15s

Tableau III.4 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules	ABS Bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	1,85E-02	6,66E-03	6,84E-03	6,32E-03	1,08E-02
28	3,49E-02	1,37E-02	1,54E-02	8,71E-03	1,60E-02
32	4,11E-02	1,53E-02	1,70E-02	1,40E-02	2,11E-02
36	2,32E-02	2,12E-02	2,04E-02	1,70E-02	2,37E-02

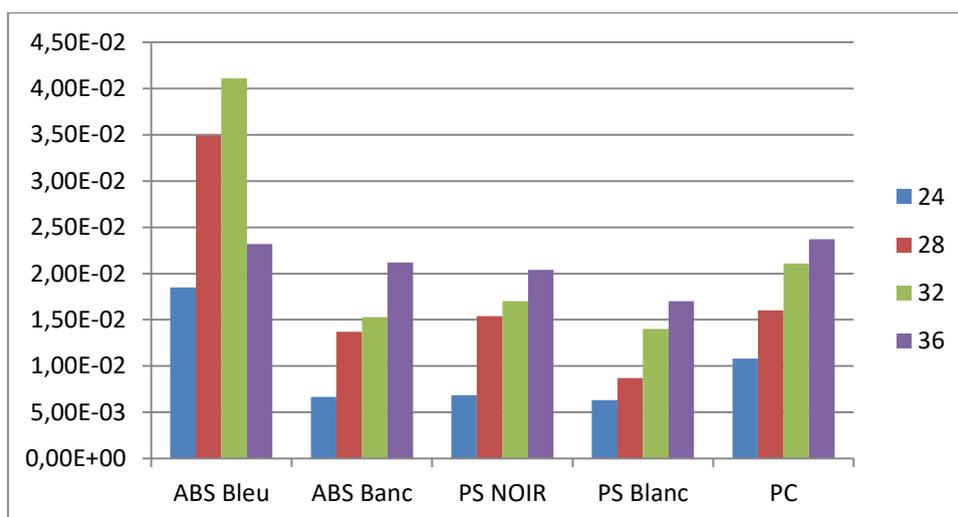


Figure III.5 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=15s.

III.3.2.2 Influence de la haute tension négative

Nous examinons à présent l'utilisation de la haute tension négative. Grâce à la régulation de ces tensions, nous pouvons observer les conséquences du phénomène de corona sur la charge des particules. Nous modifions la durée d'exposition sous l'électrode à fil afin de saisir l'impact de cela sur le processus de charge. Les résultats obtenus donnent lieu à une évaluation de l'efficacité de cette méthode et de son influence sur la charge des particules isolants.

➤ pour $t=1s$

Tableau III.5 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules	ABS bleu	ABS blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	-1,22E-03	-5,14E-03	-7,52E-03	-3,63E-03	-3,72E-03
28	-1,74E-02	-6,67E-03	-1,32E-02	-8,89E-03	-1,45E-02
32	-2,1E-02	-1,92E-02	-1,63E-02	-1,68E-02	-1,88E-02
36	-2,37E-02	-2,11E-02	-1,73E-02	-2,03E-2	-2,26E-02

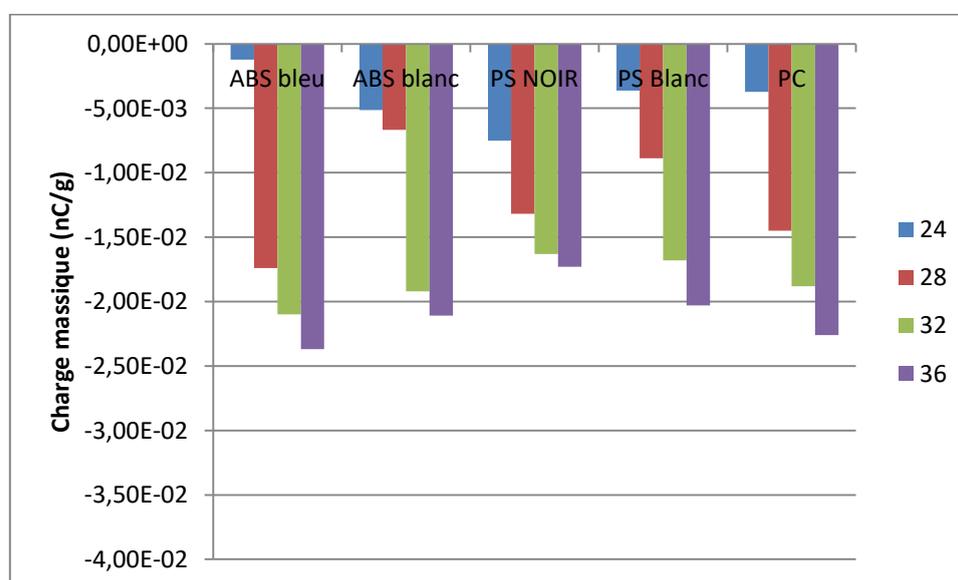


Figure III.6: Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans $t=1s$.

➤ t=5s

Tableau III.6 la charge massique (nC /g) des particules

Particules	ABS bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	-2,62E-03	-5,07E-03	-6,47E-03	-4,36E-03	-7,82E-03
28	-1,92E-02	-1,47E-02	-1,43E-02	-9,32E-03	-1,82E-02
32	-2,51E-02	-1,96E-02	-1,63E-02	-1,81E-02	-2,28E-02
36	-2,58E-02	-2,26E-02	-1,73E-02	-2,29E-02	-2,35E-02

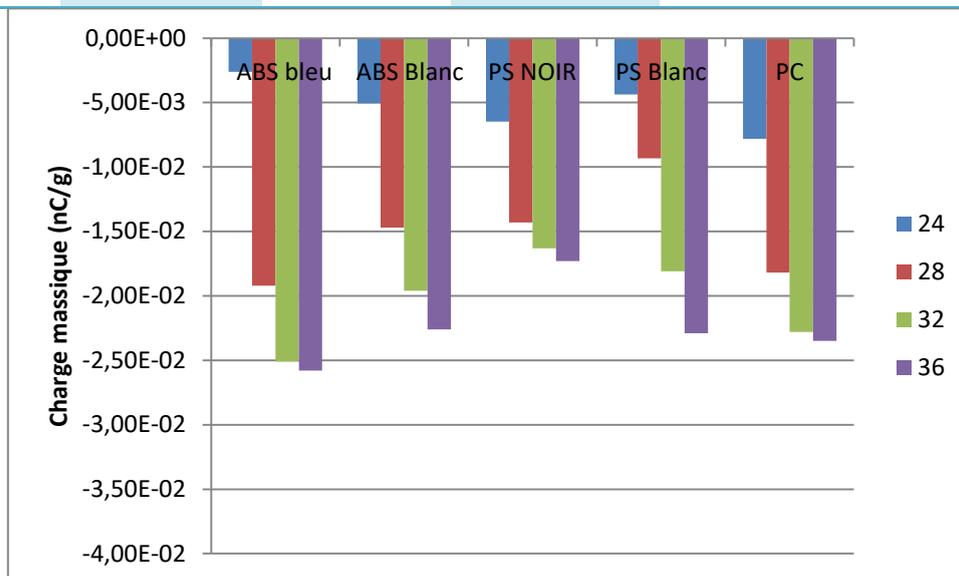


Figure III.7: Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=5s.

➤ t=10s

Tableau III.7 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules	ABS Bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	-1,69E-02	-1,41E-02	-1,04E-02	-7,1E-03	-1,08E-02
28	-2,25E-02	-1,80E-02	-1,60E-02	-1,06E-02	-2,01E-02
32	-2,53E-02	-2,32E-02	-1,70E-02	-1,12E-02	-2,53E-02
36	-2,66E-02	-2,25E-02	-1,77E-02	-1,48E-02	-2,66E-02

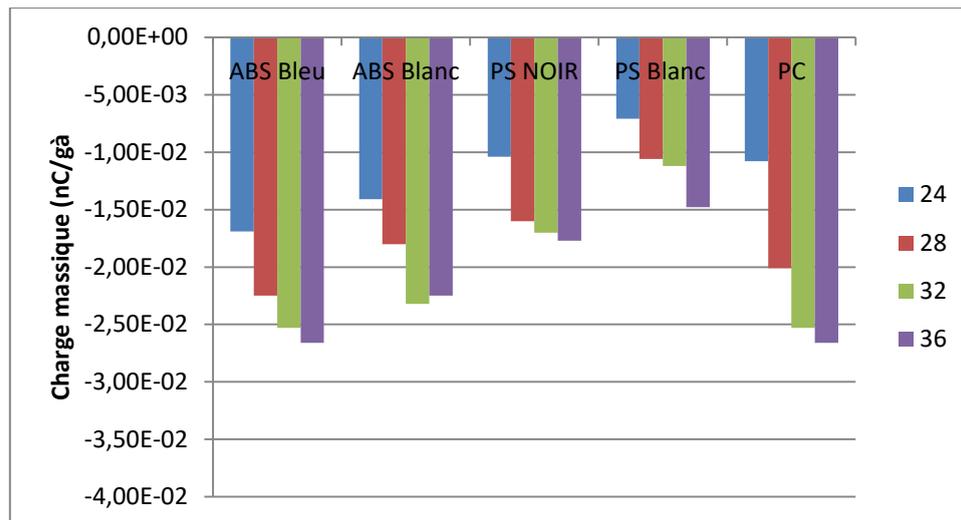


Figure III.8: Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=10.

➤ t=15s

Tableau III.8 la charge massique (nC/g) des particules isolantes

Particules	ABS Bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	-1,72E-02	-1,56E-02	-1,33E-02	-7,76E-03	-1,50E-02
28	-1,95E-02	-1,85E-02	-1,45E-02	-1,08E-02	-2,61E-02
32	-1,99E-02	-2,47E-02	-1,71E-02	-1,38E-02	-2,74E-02
36	-2,15E-02	-2,26E-02	-1,73E-02	-1,74E-02	-3,32E-02

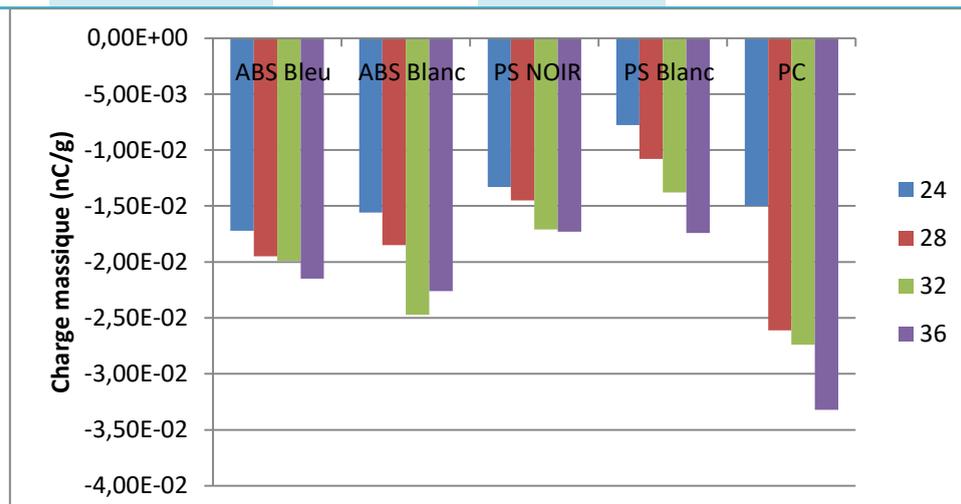


Figure III.9 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=15s.

III.3.2.3 Interprétation des résultats d'électrode à fil

- ✓ L'augmentation de la charge de l'ABS Bleu de 24 kV à 32 kV peut être attribuée à la capacité croissante des particules à accumuler des charges électrostatiques avec l'augmentation de la haute tension positive.
- ✓ La diminution de la charge de l'ABS Bleu à 36 kV peut indiquer une saturation des particules, où elles atteignent leur limite de capacité de charge, ou une décharge partielle due à l'effet corona inverse.
- ✓ L'augmentation de la charge de l'ABS Bleu négative de $-1.22E-03$ à $-2.37E-02$ C entre 24 kV et 36 kV montre une meilleure capacité de l'ABS bleu à accumuler des charges négatives à des tensions plus élevées. Cependant, cette augmentation s'accompagne d'une sensibilité accrue à la décharge, comme en témoigne la valeur négative élevée à 36 kV.
- ✓ La charge positive du PC continue d'augmenter avec la tension, atteignant des valeurs élevées à 36 kV. Cela suggère une capacité supérieure du PC à accumuler et à retenir des charges positives sans saturation, contrairement à l'ABS bleu.
- ✓ La charge massique augmente avec le temps sous la haute tension négative. Cette tendance met en évidence la capacité stable et élevée du PC à accumuler des charges négatives avec une exposition prolongée à la tension.
- ✓ La stabilité de la charge massique autour de $-1.63E-02$ et $-1.73E-02$ nC pour des hautes tensions négatives de 32 kV et 36 kV, avec des temps de chargement de 1 s et 5 s, démontre un comportement électrostatique remarquablement stable du PS Noir.

III.3.2 Electrode à lame dents de scie

III.3.2.1 Influence de la haute tension positive

On passe à la deuxième électrode avec une lame dents de scie avec les mêmes caractéristiques et conditions. Allant de :

➤ $t=1s$

Tableau III.9 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules U(KV)	ABS Bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
24	1,73E-02	1,08E-02	1,24E-02	7,26E-03	1,37E-02
28	2,23E-02	1,65E-02	1,47E-02	1,08E-02	1,46E-02
32	2,40E-02	1,70E-02	1,47E-02	1,35E-02	1,63E-02
36	2,55E-02	1,74E-02	1,47E-02	1,56E-02	1,95E-02

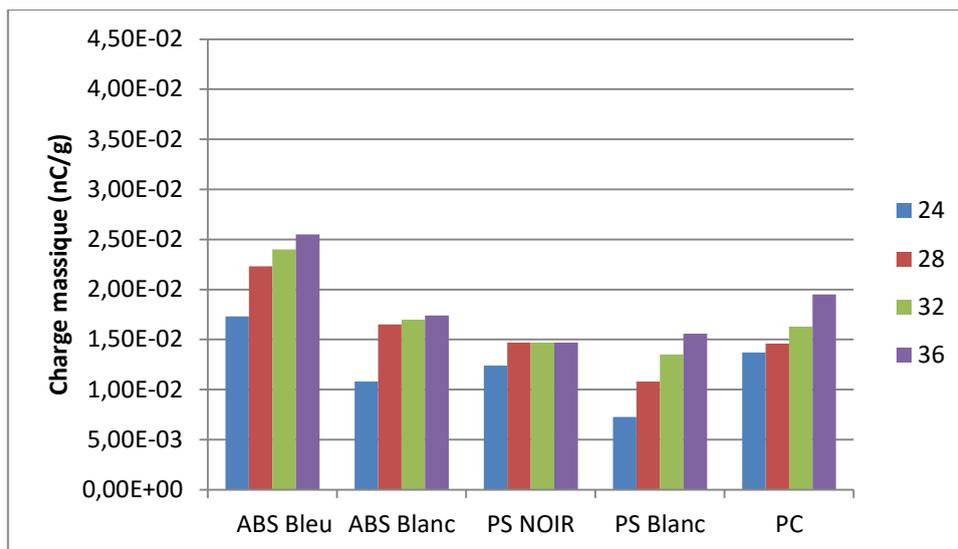


Figure III.10 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=1s.

➤ t=5s

Tableau III.10 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules	ABS Bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	1,78E-02	1,39E-02	1,53E-02	7,49E-03	1,08E-02
28	2E-02	1,59E-02	1,61E-02	1,15E-02	1,53E-02
32	2,16E-02	1,71E-02	1,52E-02	1,33E-02	1,68E-02
36	2,40E-02	1,36E-02	1,40E-02	1,61E-02	1,73E-02

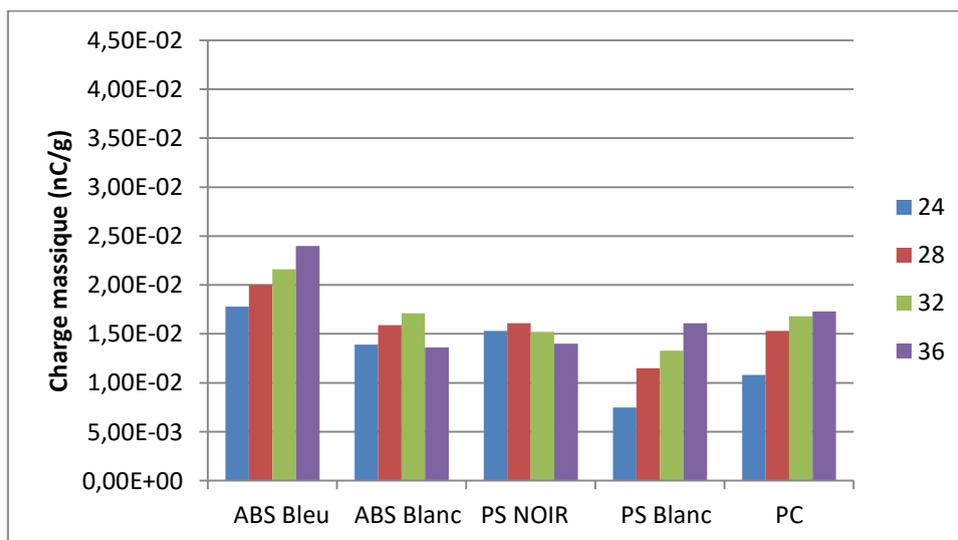


Figure III.11: Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=5s.

➤ t=10s

Tableau III.11 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules	ABS Bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	1,91E-02	1,50E-02	1,31E-02	8,11E-03	1,27E-02
28	2,21E-02	1,68E-02	1,61E-02	1,20E-02	1,34E-02
32	2,01E-02	1,66E-02	1,48E-02	1,14E-02	1,43E-02
36	1,77E-02	1,89E-02	8,88E-03	1,73E-02	1,55E-02

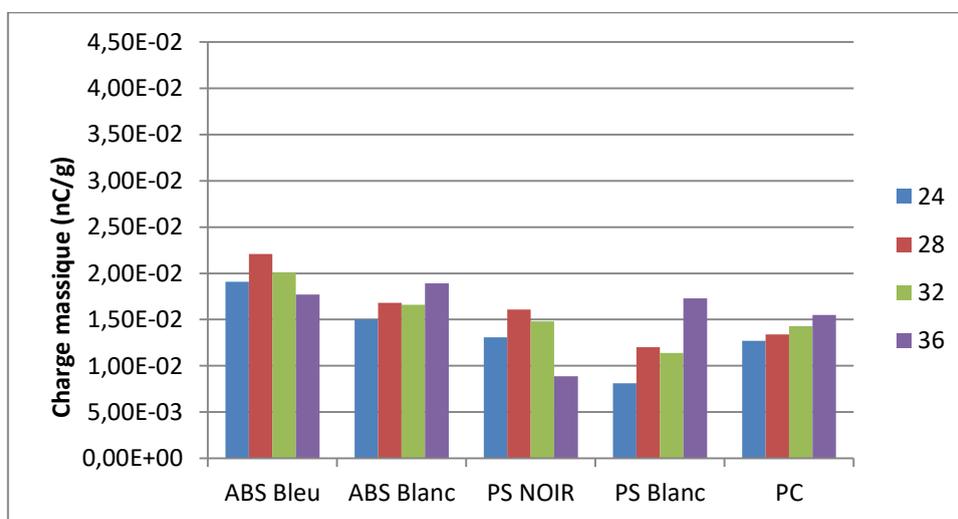


Figure III.12 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=10s.

➤ t=15s

Tableau III.12 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules	ABS Bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	2,04E-02	1,31E-02	0,01501	8,87E-03	1,10E-02
28	1,48E-02	1,19E-02	0,01466	6,18E-03	1,46E-02
32	1,54E-02	1,26E-02	0,01478	1,50E-02	1,76E-02
36	1,53E-02	1,34E-02	0,01578	1,24E-02	1,92E-02

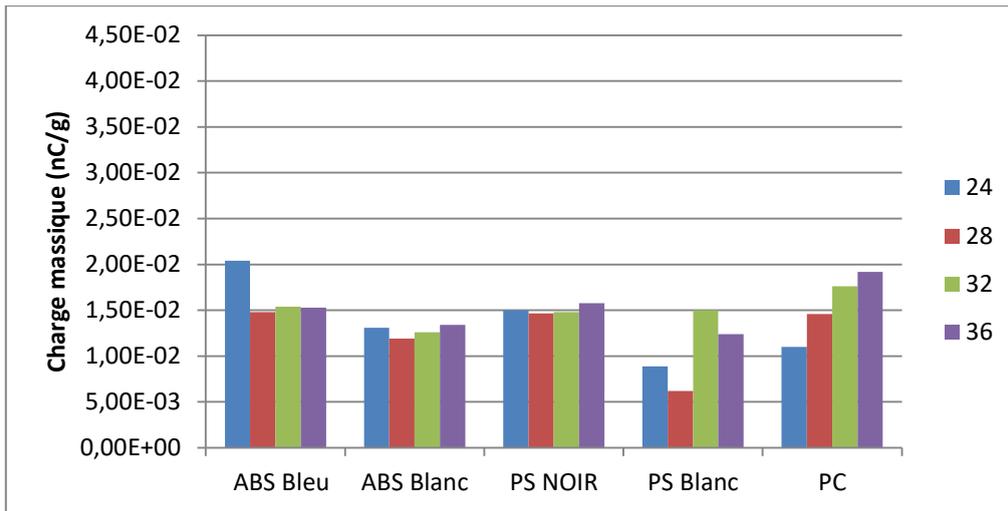


Figure III.13: Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=15s.

III.3.2.2 Influence de la haute tension négative

➤ t=1s

Tableau III.13 la charge massique (nC /g) des particules isolante

Particules	ABS Bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	-4,18E-03	-1,33E-02	-1,09E-02	-8,09E-03	-1,42E-02
28	-7,26E-03	-1,34E-02	-1,66E-02	-1,06E-02	-1,52E-02
32	-1,01E-02	-2,06E-02	-1,63E-02	-1,16E-02	-1,56E-02
36	-1,41E-02	-2,18E-02	-1,46E-02	-1,38E-02	-1,74E-02

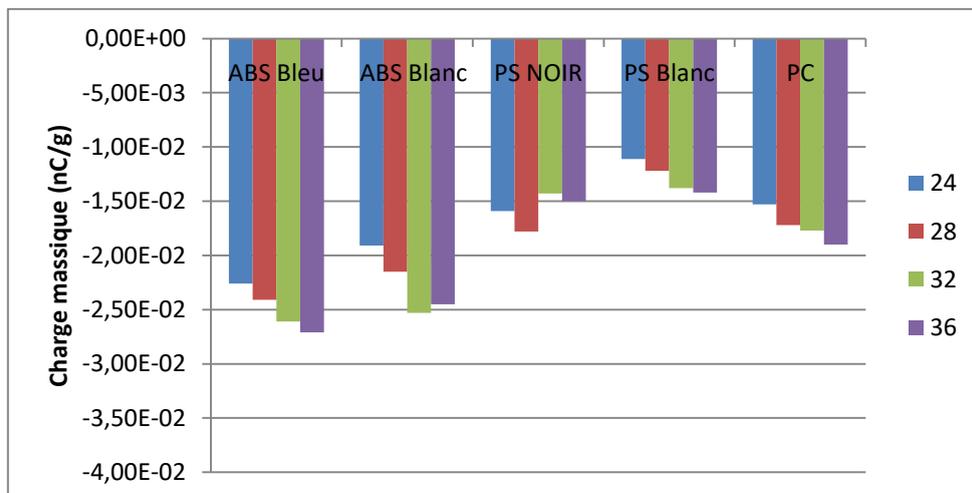


Figure III.14 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=1s.

➤ t=5s

Tableau III.14 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules	ABS Bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	-2,26E-02	-1,91E-02	-1,59E-02	-1,11E-02	-1,53E-02
28	-2,41E-02	-2,15E-02	-1,78E-02	-1,22E-02	-1,72E-02
32	-2,61E-02	-2,53E-02	-1,43E-02	-1,38E-02	-1,77E-02
36	-2,71E-02	-2,45E-02	-1,50E-02	-1,42E-02	-1,90E-02

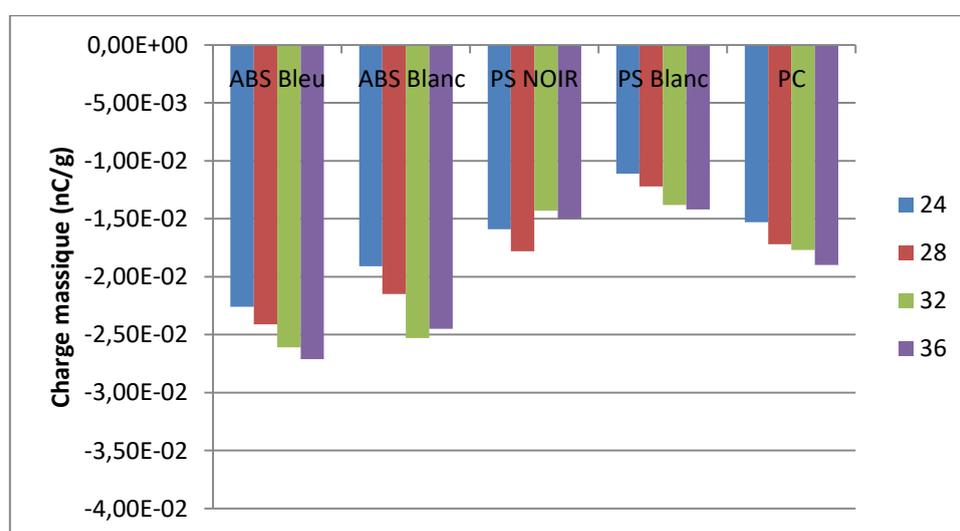


Figure III.15 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=5s.

➤ t=10s

Tableau III.15 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules	ABS Bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	-2,12E-02	-2,01E-02	-1,64E-02	-1,13E-02	-1,67E-02
28	-2,37E-02	-2,17E-02	-1,41E-02	-1,39E-02	-1,92E-02
32	-2,54E-02	-2,19E-02	-1,32E-02	-1,65E-02	-2,07E-02
36	-2,74E-02	-2,29E-02	-1,32E-02	-1,82E-02	-2,17E-02

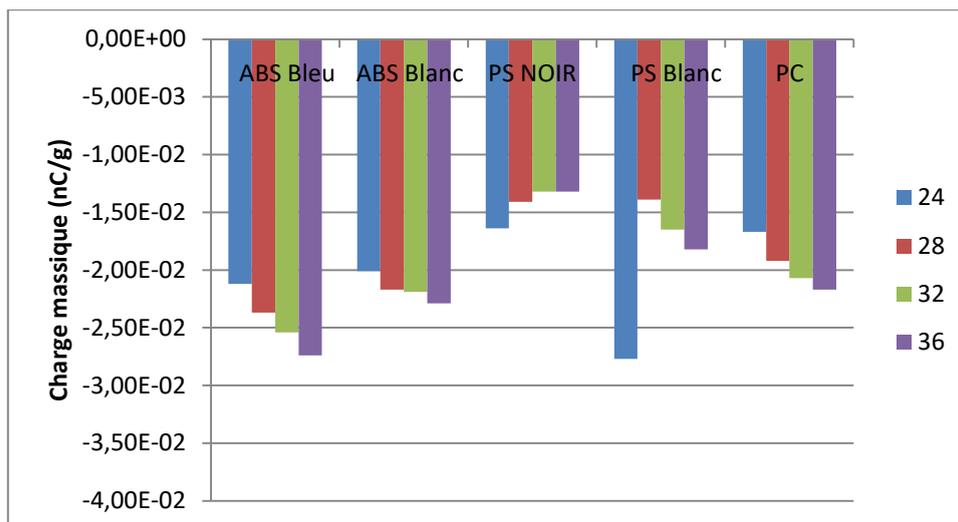


Figure III.16 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=10s.

➤ t=15s

Tableau III.16 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules	ABS Bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	-2,39E-02	-1,69E-02	-1,55E-02	-1,08E-02	-1,89E-02
28	-1,70E-02	-2,24E-02	-1,42E-02	-1,31E-02	-2,10E-02
32	-2,05E-02	-2,22E-02	-1,27E-02	-1,37E-02	-2,23E-02
36	-2,37E-02	-2,22E-02	-1,28E-02	-1,57E-02	-2,63E-02

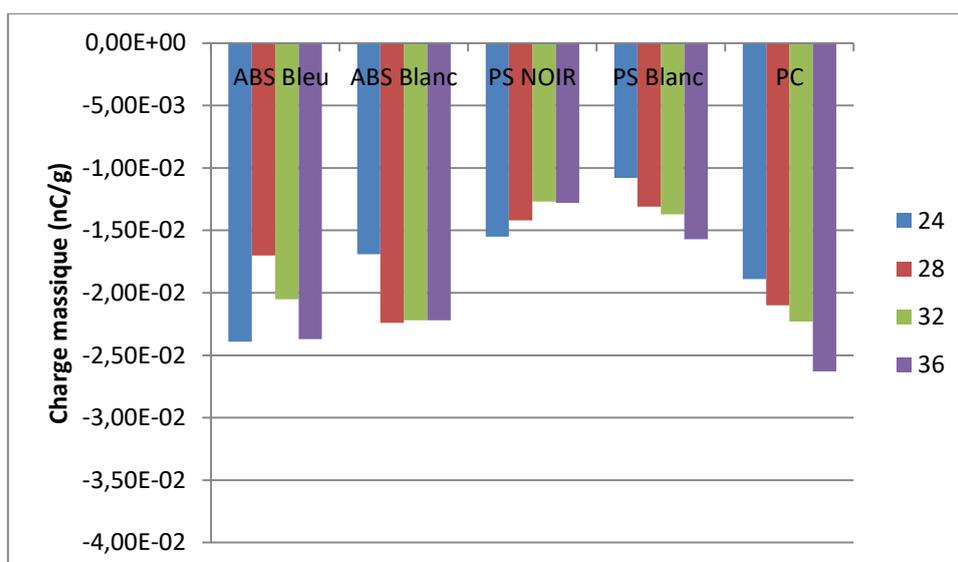


Figure III.17: Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=15s.

III.3.2.3 Interprétation des résultats d'électrode à lame dents de scie

- ✓ Les graphiques montrent que la charge acquise par quelques particules augmente avec l'augmentation de la tension appliquée. Par exemple, l'échantillon **ABS Blanc** la charge acquise passe de $1,08E-02$ nC à $1,74E-02$ nC lorsque la tension augmente de 24 kV à 36 kV à $t=0s$. la charge commence à diminuer à $t=5s$ et $t=10s$ et $t=15s$ par rapport $t=0s$ mais ça augmente avec l'augmentation de tension.
- ✓ Ce cas est similaire pour les matériaux testés (**ABS Bleu**, **PC**, **PS Blanc**), indiquant que l'augmentation de la tension de chargement conduit à une augmentation de la charge acquise par les particules. lorsque la tension passe de 24 kV à 36 kV. dans $t=0s$.
- ✓ La charge acquise par les particules augmente lorsque l'augmentation de tension mais ça diminue avec le temps.

- ✓ En augmentant le temps et la tension de la charge du **PS Noir** diminue.

- ✓ On compare la charge acquise par différents matériaux pour des tensions et des temps de chargement donnés. À $t = 1$ s, avec une tension de 24 kV, l'**ABS bleu** acquiert une charge de $1,73E-02$ nC, tandis que le **PS blanc** prend une charge massique de $7,26E-02$ nC et le **PC** une charge de $1,37E-02$ nC. Cela prouve que chaque échantillon prend une charge différente de l'autre à $t = 1$ s.
- ✓ Les résultats montrent aussi l'effet de la polarité de la tension. lorsque la tension est positive, la charge acquise est positif, et lorsque qu'elle est négative, la charge est négative.

- ✓ Lorsque la tension négative augmente, la charge du **ABS Bleu** devient plus négative, passant de $-4,18E-03$ nC à $-1,41E-02$ nC à $t=1s$, lorsque la tension augmente de 24 kV à 36 kV. Ce même phénomène est observé pour le **PS Blanc**, le **ABS Blanc** et le **PC**, où l'augmentation de la charge est proportionnelle à l'augmentation de la tension et du temps.

- ✓ La charge du **PS Noir** augmente jusqu'à 28 kV, puis diminue à partir de 32 kV jusqu'à 36 kV pour tous les temps ($t=1s$, $t=5s$, $t=10s$, $t=15s$)."

III.3.3. Electrode à lame

III.3.3.1 Influence de la haute tension positive

En tenant compte des conditions et caractéristiques antérieures.

- **t=1s**

Tableau III.17 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules	ABS Bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	3,53E-03	3,26E-03	8,46E-04	3,47E-03	5,17E-03
28	9,02E-03	5,06E-03	1,87E-03	3,77E-03	7,62E-03
32	1,16E-02	7,63E-03	2,52E-03	6,56E-03	1,05E-02
36	1,27E-02	1,07E-02	4,04E-03	6,67E-03	1,46E-02

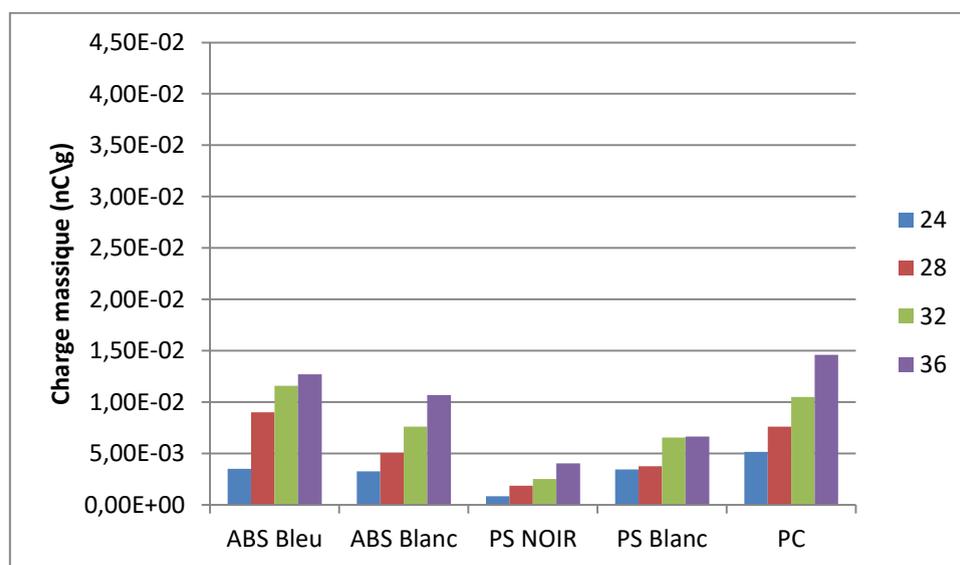


Figure III.18 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=1s.

➤ t=5s

Tableau III.18 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules	ABS Bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	5,43E-03	3,43E-03	1,66E-03	4,48E-03	6,53E-03
28	9,58E-03	6,44E-03	2,59E-03	5,89E-03	8,17E-03
32	1,26E-02	7,96E-03	3,58E-03	7,52E-03	1,11E-02
36	1,32E-02	1,14E-02	5,59E-03	8,18E-03	1,84E-02

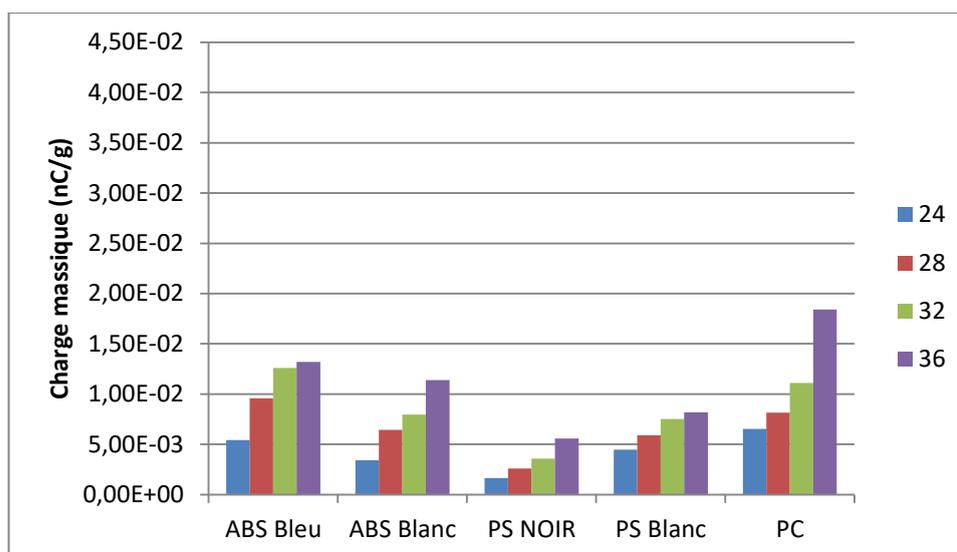


Figure III.19 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=5s.

➤ t=10s

Tableau III.19 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules	ABS Bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	8,36E-03	4,65E-03	2,66E-03	5,59E-03	7,52E-03
28	9,82E-03	6,84E-03	3,48E-03	6,51E-03	8,36E-03
32	1,29E-02	8,58E-03	4,32E-03	8,18E-03	1,34E-02
36	1,37E-02	1,21E-02	6,67E-03	9,41E-03	1,98E-02

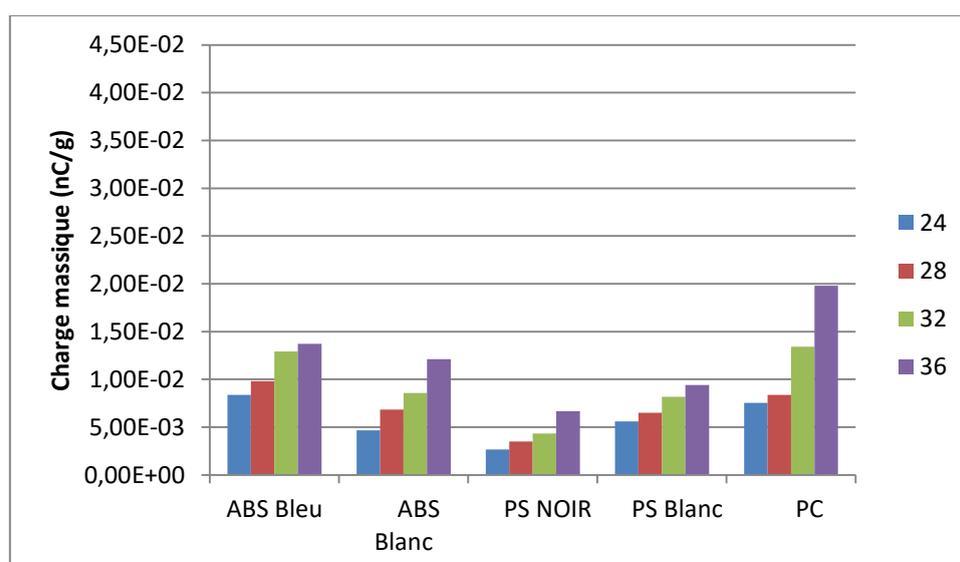


Figure III.20: Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=10s.

➤ t=15s

Tableau III.20 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules	ABS Bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	9,19E-03	6,82E-03	3,66E-03	7,11E-03	7,49E-03
28	1,05E-02	7,40E-03	4,11E-03	8,54E-03	9,23E-03
32	1,32E-02	1,24E-02	5,53E-03	8,75E-03	1,41E-02
36	1,40E-02	1,53E-03	8,17E-03	1,12E-02	1,99E-02

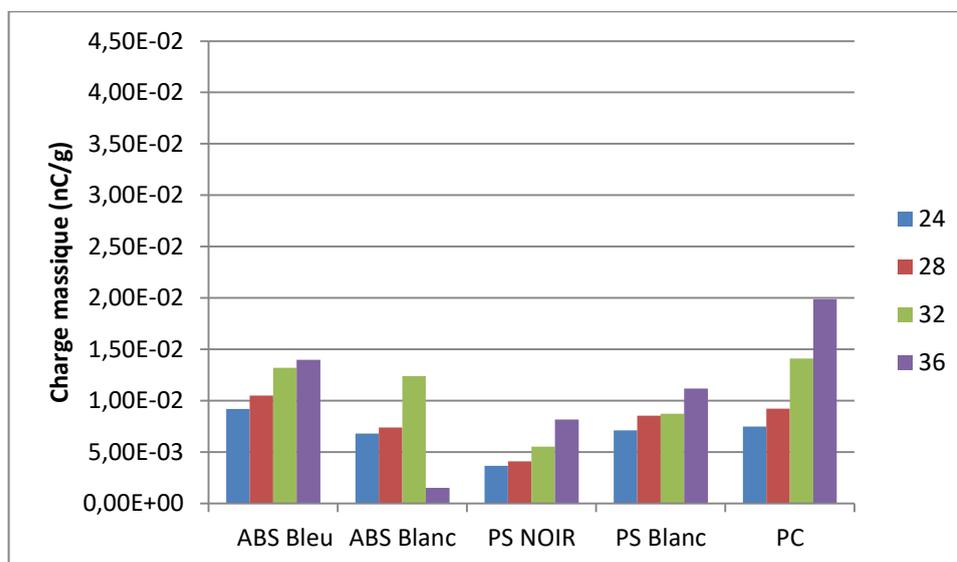


Figure III.21 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t= 15s.

III.3.3.2 Influence de la haute tension négative

➤ t=1s

Tableau III.21 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules	ABS Bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	-1,07E-02	-5,20E-03	-4,90E-03	-9,53E-03	-8,45E-03
28	-1,20E-02	-8,62E-03	-5,75E-03	-1,00E-02	-1,08E-02
32	-1,34E-02	-1,05E-02	-6,76E-03	-1,20E-02	-1,25E-02
36	-1,54E-02	-1,21E-02	-7,58E-03	-1,47E-02	-1,60E-02

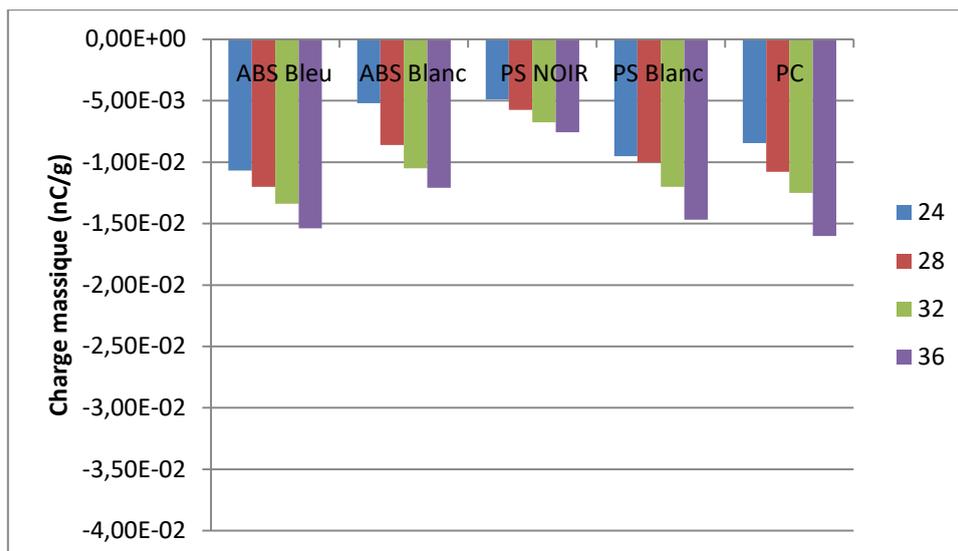


Figure III.22: Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=1s.

➤ t=5s

Tableau III.22 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules	ABS Bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	-1,22E-02	-6,52E-03	-3,28E-03	-1,01E-02	-1,01E-02
28	-1,34E-02	-9,72E-03	-5,11E-03	-1,16E-02	-1,13E-02
32	-1,58E-02	-1,12E-02	-5,96E-03	-1,30E-02	-1,42E-02
36	-1,92E-02	-1,35E-02	-6,74E-03	-1,52E-02	-1,82E-02

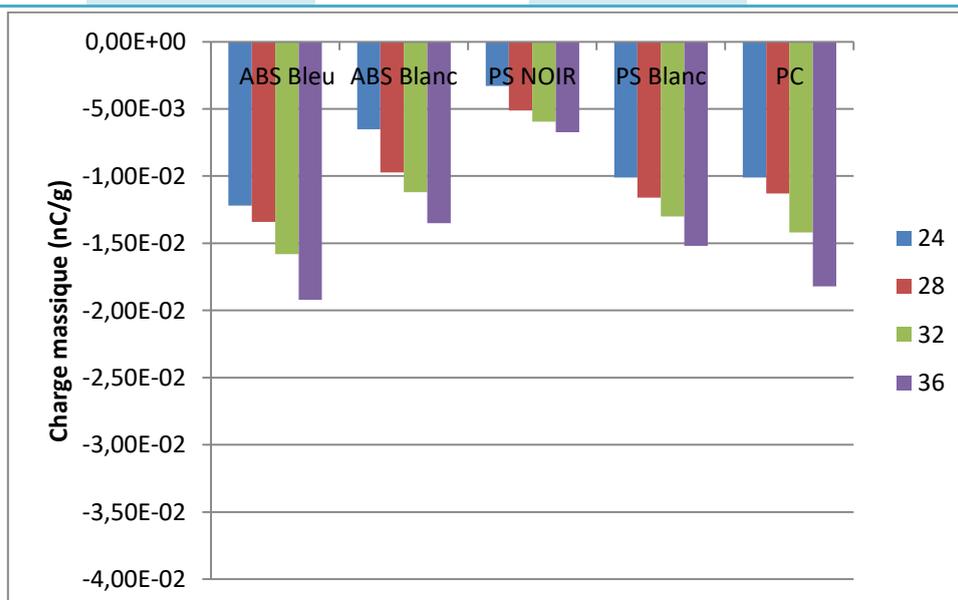


Figure III.23 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=5s.

➤ t=10s

Tableau III.23 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules	ABS Bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	-1,26E-02	-1E-02	-3,33E-03	-1,11E-02	-1,13E-02
28	-1,42E-02	-1,07E-02	-4,85E-03	-1,22E-02	-1,31E-02
32	-1,66E-02	-1,14E-02	-5,21E-03	-1,35E-02	-1,53E-02
36	-2,02E-02	-1,42E-02	-6,48E-03	-1,63E-02	-1,92E-02

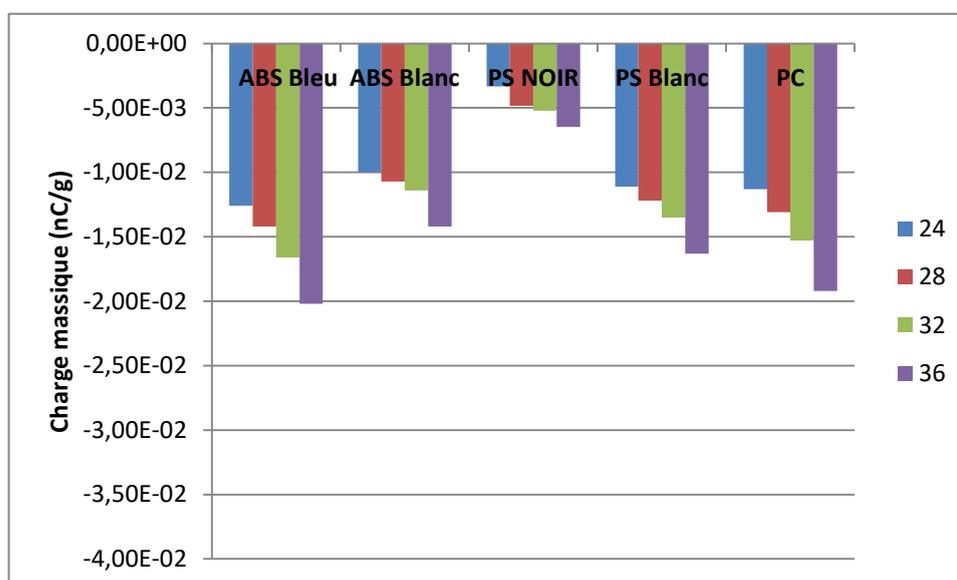


Figure III.24 : Influence de haute tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t= 10s.

➤ t=15s

Tableau III.24 la charge massique (nC /g) des particules isolantes

Particules	ABS Bleu	ABS Blanc	PS NOIR	PS Blanc	PC
U(KV)					
24	-1,33E-02	-1,38E-02	-3,44E-03	-1,22E-02	-1,26E-02
28	-1,47E-02	-1,46E-02	-4,23E-03	-1,33E-02	-1,45E-02
32	-1,70E-02	-1,51E-02	-4,68E-03	-1,41E-02	-1,61E-02
36	-2,36E-02	-1,57E-02	-5,40E-03	-1,84E-02	-2,05E-02

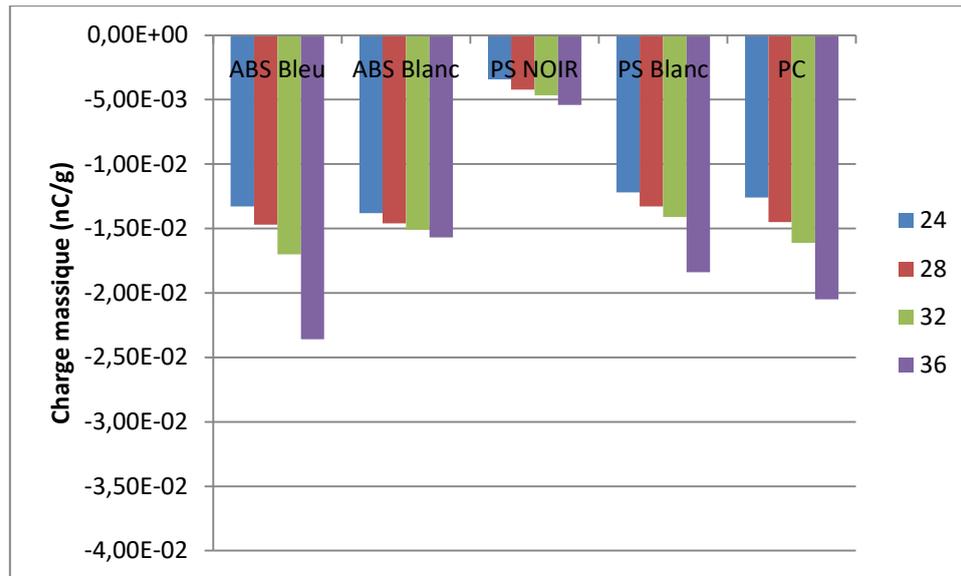


Figure III.25 : Influence du tension de chargement sur la charge acquise par les 05 particules dans t=15s.

III.3.3.3 Interprétation des résultats d'électrode à lame

- ✓ Les résultats des expériences montrent que la charge acquise par les particules augmente avec l'augmentation de la tension et du temps de chargement.
- ✓ La charge acquise par les granules d'ABS Bleu, PS Blanc, ABS Blanc et PC s'accroît à mesure que la tension augmente à travers les différents temps (t=1s, t=5s, t=10s, t=15s).
- ✓ Avec l'accroissement de la tension et du temps, la charge de PS Noir augmente légèrement. Par exemple, à t=1s avec une tension de 24 KV, la charge est de 8,46E-04 nC et à 36 KV, elle diminue à 4,04E-04 nC.
- ✓ La charge des granules d'ABS Bleu, ABS Blanc, PS Blanc et PC s'accroît négativement avec une tension négative. L'ABS Bleu passe de -1,07E-02 nC à -1,54E-02 nC lorsque la tension passe de 24 KV à 36 KV à t=1s.
- ✓ La charge de PS Noir augmente à t=1s puis diminue comparée aux temps précédents, mais elle augmente avec l'accroissement de la tension.
- ✓ Selon les résultats, il est apparent que la tension négative est plus efficace et suppressive que la tension positive avec l'électrode à lame."

III.4. Applications de la séparation électrostatique

III.4.1. Séparateur a tapis roulant

Ce type de séparateur est conçu pour les études de faisabilité de la séparation électrostatique des matériaux granulaires. Des mélanges de particules de taille millimétrique sont déposés en monocouche sur la surface d'un convoyeur à bande conductrice. Ces particules sont ensuite chargées à l'aide d'électrodes, qui peuvent être de type fil, lame ou dents de scie. Diverses possibilités sont offertes à ce séparateur pour charger les particules, et le choix du dispositif de charge dépend principalement des propriétés électriques des matériaux à séparer. La distinction entre ces matériaux est basée sur leur conductivité, qui détermine leur capacité à conserver la charge acquise par effet triboélectrique, décharge corona ou induction électrostatique.

Dans notre étude, les électrodes utilisées pour charger les particules granulaires sont alimentées par une haute tension négative. Pour la séparation, l'électrode statique en plaque, de 520 mm de longueur et 70 mm largeur.

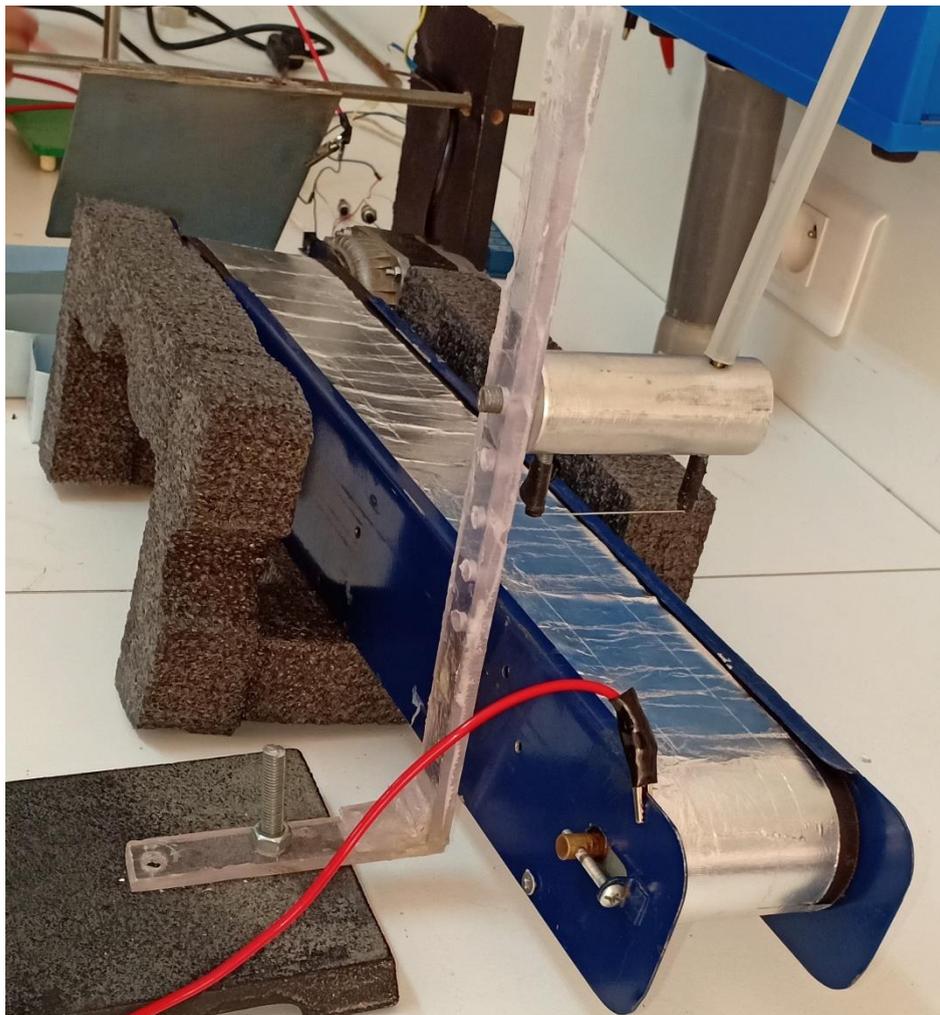


Figure III.26: Photos du séparateur électrostatique.

(Figure III.27) représente Les essais qui ont été réalisés avec deux types de particules PS Blanc, ABS Bleu. La masse du mélange granulaire est 4g comprenant 2g de chaque échantillon.



Figure III.27: Échantillon des granules utilisés.

Une première séparation électrostatique (avec une polarité négative de la haute tension) on utilise les électrodes (à fil, à lame dents de scie, à lame) est alors effectuée et une partie des granules séparés sont récupérés dans les bacs du collecteur. Les résultats obtenus sont représentés par des histogrammes aux figures suivantes.

III.4.2. Résultats et discussion de la séparation électrostatique

Pour évaluer l'efficacité de notre étude de chargement, nous avons choisi une haute tension de chargement de 24 kV et un temps de chargement d'une seconde. Pour toutes les électrodes, qu'elles soient à fil, à lame ou à dents de scie, nous avons appliqué les mêmes conditions afin de comparer les résultats de séparation de chacune.

Les essais ont été réalisés avec différentes configurations d'électrodes : électrode à fil, électrode à lame avec dents de scie, et électrode à lame utilisant deux types d'isolants (ABS_{bleu} et PS_{blanc}). Les conditions pour toutes les expériences étaient les suivantes :

- Masse du mélange granulaire 4 g comprenant 2 g de chaque type de plastique.
- Tension = 28KV
- Vitesse du tapis roulant : $v = 20$ m/s.

a) Electrode à fil

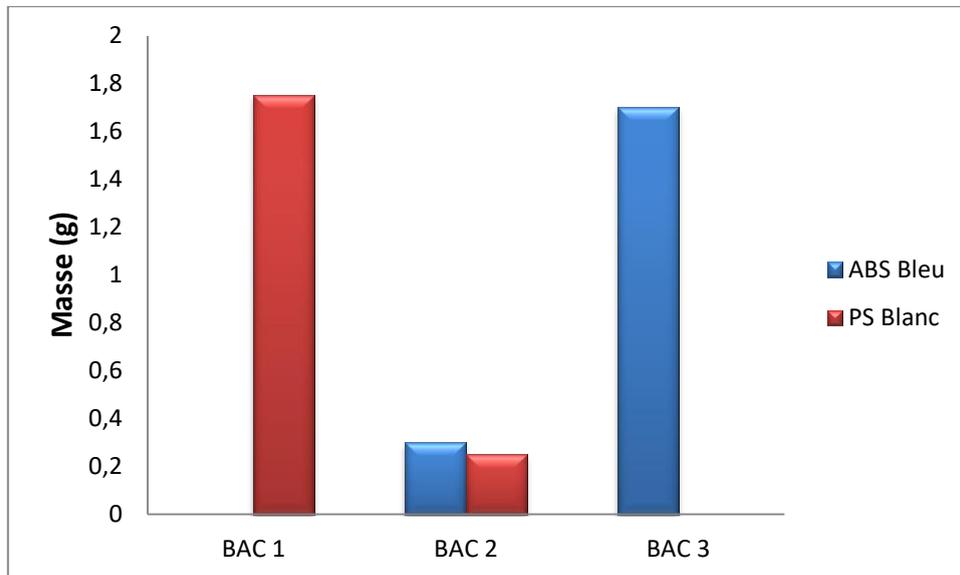


Figure III.28: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec produit binaire (ABS et PS) avec électrode à fil .

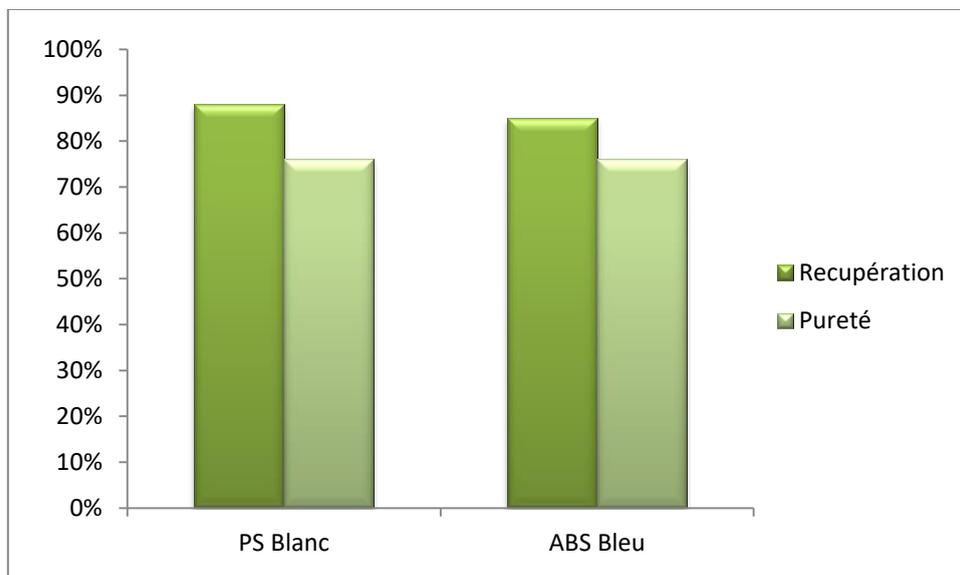


Figure III.29: Récupération et Pureté de chaque isolant obtenue (PS et ABS)avec électrode à fil.

b) Electrode à lame dents de scie

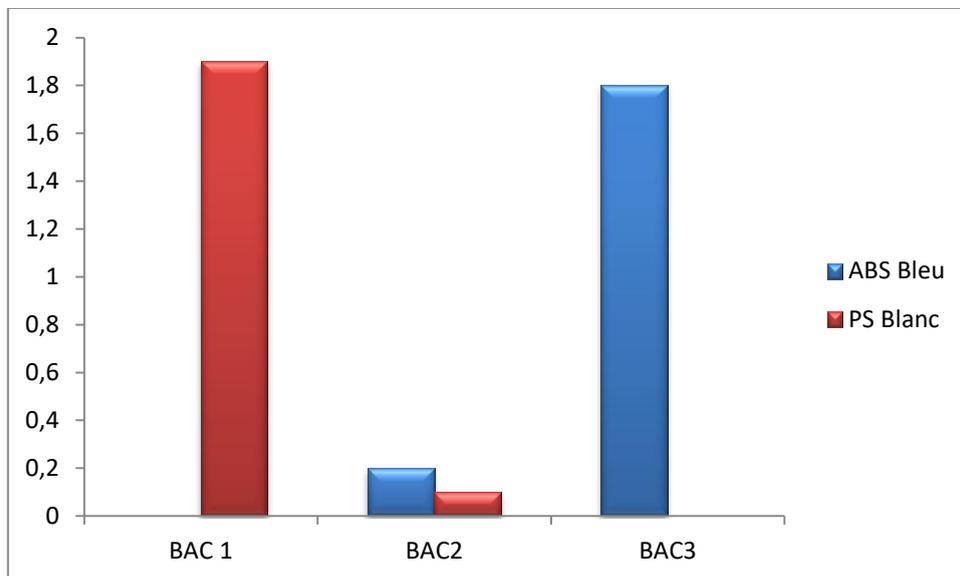


Figure III.30: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec produit binaire (ABS et PS) avec électrode à lame dents de scie.

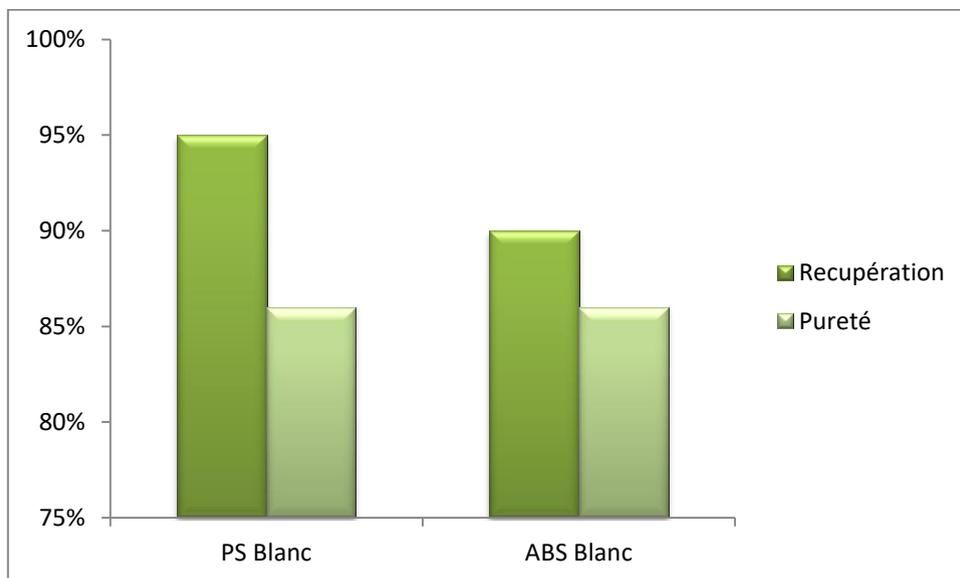


Figure III.31: Récupération et Pureté de chaque isolant obtenue (PS et ABS) avec à lame dents de scie.

c) Electrode à lame

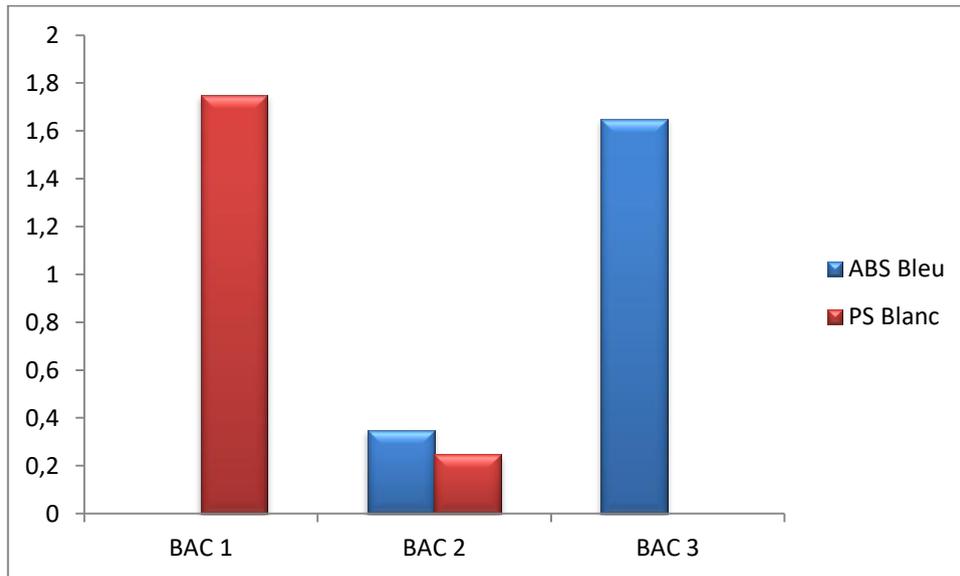


Figure III.32: Masse des particules dans chaque compartiment obtenue avec produit binaire (ABS et PS) avec électrode à lame.

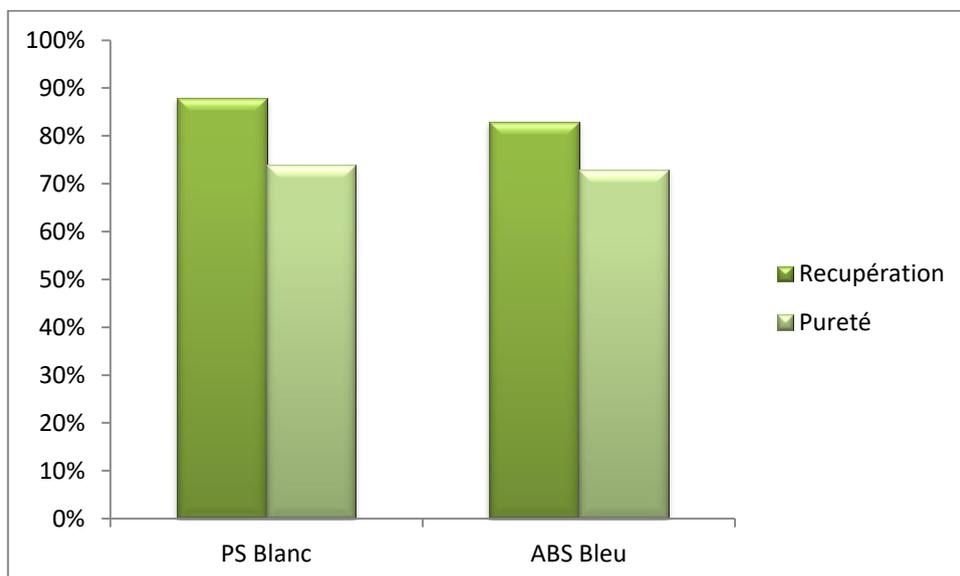


Figure III.33: Récupération et Pureté de chaque isolant obtenue (PS et ABS) avec à lame.

D'après les résultats de figures précédents on remarque que :

La séparation des granulés PS et ABS peut être réalisée avec un séparateur électrostatique à tapis roulant. Les particules préalablement chargées négativement sont attirées par une électrode positive, permettant la séparation dans des bacs distincts selon leur charge. Les résultats montrent que l'électrode à lame avec dents de scie offre une efficacité et une pureté maximales pour la séparation électrostatique.

1. Électrode à Fil

✓ *Avantages*

- Génère un champ électrique intense à proximité du fil.
- Fabrication et installation relativement simples.

✓ *Inconvénients*

- Distribution du champ électrique fortement localisée, pouvant entraîner une non-uniformité du traitement.
- Risque de points chauds et d'arcs électriques à haute tension.

✓ *Performance*

- Récupération : 88% de PS, 85% d'ABS.
- Pureté : 76% pour le PS et l'ABS.

2. Électrode à Lame

✓ *Avantages*

- Offre une distribution plus uniforme du champ électrique le long de la lame.
- Moins de risque de points chauds comparé à l'électrode à fil.

✓ *Inconvénients*

- Champ électrique moins intense, nécessitant des tensions plus élevées pour un effet équivalent.
- Fabrication plus complexe et coûteuse.

✓ *Performance*

- On a récupéré 88% de PS et 83% de ABS.
- Pureté : 74% pour le PS, 73% pour l'ABS.

3. Électrode à Lame avec Dents de Scie

✓ *Avantages*

- Combine les avantages des électrodes à fil et à lame.
- Les pointes des dents de scie concentrent le champ électrique, augmentant l'intensité locale tout en maintenant une distribution plus uniforme.
- Compromis optimal entre uniformité et intensité du champ.

✓ *Inconvénients*

- Fabrication plus complexe.
- Nécessite un ajustement précis de la tension pour éviter les arcs électriques.

✓ *Performance*

- On a récupéré 95 % de PS et 90 % d'ABS, et en termes de pureté, le PS atteint 95 % et l'ABS atteint 90 %.

Conclusion

La performance des installations de séparation électrostatique repose en grande partie sur l'efficacité du processus de charge. En chargeant les particules avec une décharge couronne à l'aide d'électrodes à fil, à lame ou à dents de scie, on peut obtenir une solution efficace pour charger et contrôler les matériaux plastiques granulaires afin d'améliorer le rendement de la séparation électrostatique. Parmi ces options, l'électrode à lame avec dents de scie se démarque comme étant la plus efficace pour charger les granulés plastiques millimétriques. Elle permet un équilibre optimal entre intensité et uniformité du champ électrique, facilitant ainsi un traitement efficace des granulés.

Ce type d'électrode offre une récupération et une pureté des produits supérieures par rapport aux autres types d'électrodes. Cependant, le choix de l'électrode doit également tenir compte des spécificités de l'application, ainsi que des contraintes pratiques comme les coûts de fabrication et d'installation.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La séparation électrostatique trie et purifie les matériaux en exploitant leurs propriétés électriques. Elle repose sur l'application d'un champ électrostatique qui attire ou repousse les particules chargées différemment, facilitant ainsi la séparation efficace des substances. Cette méthode est largement employée dans le recyclage des déchets, la purification des minéraux et d'autres industries, améliorant l'efficacité des processus de tri. En matière de protection de l'environnement, la séparation électrostatique offre des avantages significatifs. Elle permet de réduire la quantité de déchets envoyés aux décharges, de minimiser la consommation de ressources naturelles en favorisant le recyclage et de diminuer l'empreinte carbone des industries en réduisant la nécessité d'extraction de nouvelles matières premières. De plus, cette technique est souvent plus propre et moins polluante que d'autres méthodes de séparation, contribuant ainsi à une industrie plus durable et respectueuse de l'environnement.

Notre étude explore le chargement par décharge corona, une méthode particulièrement adaptée pour le tri et la séparation de matériaux de composition similaire mais de charges différentes. Lors de ce processus, des ions sont émis par les particules isolantes chargées en présence d'un champ électrique intense, ce qui permet un chargement rapide et efficace. Cela facilite une séparation précise selon les propriétés électriques des particules. Cette approche est particulièrement prometteuse pour le recyclage des matériaux complexes et la récupération de fractions pures. L'étude a visé à optimiser le processus de séparation électrostatique par décharge corona pour les granulats en plastique, en se concentrant sur l'efficacité des différentes configurations d'électrodes.

L'étude souligne également l'importance du contrôle du convoyeur par la technologie Arduino, en particulier l'Arduino Due, pour optimiser le processus de chargement.

Les particules granulaires de polymères comme l'ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène), le polystyrène (PS) et le polycarbonate (PC) peuvent accumuler des charges électrostatiques lorsqu'elles sont exposées à une haute tension. Lorsqu'une tension est appliquée, les particules peuvent accumuler une charge électrique sur leur surface, influençant ainsi leur comportement.

Les particules d'ABS, utilisées dans divers objets en plastique, peuvent accumuler des charges électrostatiques. La polarité de la charge peut varier selon que la tension appliquée soit positive ou négative. Par exemple, une tension plus élevée permet aux particules d'ABS d'accumuler plus de charge, ce qui peut être attribué à une mobilité accrue des charges sur les particules. Cependant, lorsque la tension atteint un certain seuil, telle que 36 kV, la charge peut diminuer, indiquant que les particules atteignent leur capacité maximale ou subissent une décharge partielle. Cela peut être dû à un effet corona inverse, où les charges électrostatiques s'échappent de la surface des particules lorsque la tension dépasse un certain seuil.

Les particules peuvent rester stables avec l'augmentation du temps d'exposition à la décharge corona ou à une haute tension, positive ou négative. Cela peut être dû à une stabilisation des

Conclusion générale

charges ou à un équilibre de charge sur la surface des particules. En somme, le comportement des particules granulaires en présence de charges électrostatiques est influencé par la polarité et la tension appliquée. Les variations dans la charge indiquent leur capacité d'accumuler ou de libérer l'électricité selon leur saturation ou les effets de décharge.

À la fin de notre étude, pour vérifier l'efficacité de notre méthode de chargement par effet corona, nous avons effectué quelques expériences de séparation électrostatique à l'aide d'un séparateur à tapis roulant et d'une électrode à plaque. Nous avons testé trois configurations d'électrodes : chargement par fil, par lame, et par lame avec dents de scie.

Les résultats obtenus ont montré que chaque type d'électrode présente des avantages et des inconvénients spécifiques. Les électrodes à fil, bien que puissantes, ont une distribution de champ électrique localisée, ce qui peut entraîner des non-uniformités et des risques de points chauds. Les électrodes à lame offrent une meilleure uniformité du champ, mais nécessitent des tensions plus élevées pour atteindre les mêmes niveaux d'efficacité.

L'électrode à lame avec dents de scie s'est révélée la plus performante, combinant les avantages des électrodes à fil et à lame. Elle permet une concentration du champ électrique aux pointes des dents de scie, augmentant ainsi l'intensité locale tout en maintenant une distribution plus uniforme. Cette configuration a permis d'obtenir une récupération de 95 % pour le PS et 90 % pour l'ABS, avec une pureté respective de 95 % et 90 %. Les résultats montrent clairement que l'électrode à lame avec dents de scie est la plus adaptée pour le chargement par décharge corona des granulats millimétriques en plastique. Elle offre un équilibre optimal entre intensité et uniformité du champ électrique, ce qui est crucial pour une séparation efficace et pure.

En conclusion, l'utilisation de l'électrode à lame avec dents de scie représente une avancée significative pour le processus de séparation électrostatique. Cette étude fournit des bases solides pour l'amélioration des systèmes de séparation, permettant une application plus efficace dans les procédés industriels. Les résultats démontrent l'importance de la méthode de chargement pour maximiser la performance et l'efficacité de ce processus de séparation électrostatique.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] S. Atroune, A. Tilmatine, R. Alkama, A. Samuila, and L. Dascalescu, "Comparative experimental study of tribo-electric charging of two size-classes of granular plastics." *Part. Sci. & Technol.*, Vol.33, pp. 652-658, 2015.
- [2] C.H. Park, N. Subasinghe, and H.S. Jeon, "Separation of covering plastics from particulate copper in cable wastes by induction electrostatic separation.", *Materials Trans.* Vol. 56, pp. 1140-1143, 2015.
- [3] H.J. White, "Industrial Electrostatic Precipitation." London,U.K.: Addison-Wesley, 1963.
- [4] J.A. Giacometti, S. Fedosov, and M.M. Costa, "Corona charging of polymers: recent advances on constant current charging." *Brazilian Journal of Physics*, Vol. 29, pp. 269- 279, 1999.
- [5] J.H. Dessauer and H.E. Clark, "Xerography and Related Processes." London, U.K.: Focal Press, 1965.
- [6] L. Dascalescu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila, and V. Neamtu. "Electrostatic separation of insulating and conductive particles from granular mixes." *Part. Sci. & Technol.*, Vol. 16, pp. 25-42, 1998.
- [7] K. Senouci, K. Medles, and L. Dascalescu, "Effective solutions for monitoring the electrostatic separation of metal and plastic granular waste from electric and electronic equipment." *Waste Manag. & Res.*, Vol. 31, pp. 160-168, 2013.
- [8] Sara Messal, " Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie agro-alimentaire" *Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées*, pp. 17-156, 2016.
- [9] L. Dascalescu, A. Iuga, R. Morar, V. Neamtu, I. Saurasan, A. Samuila and D. Rafiroiu, "Corona and electrostatic electrodes for high-tension separators," *J. Electrostat.*, vol. 29, no. 3, pp. 221-225, 1993.
- [10] L. Dascalescu, A. Iuga, R. Morar, V. Neamtu, I. Saurasan, A. Samuila and D. Rafiroiu, "Corona and electrostatic electrodes for high-tension separators," *J. Electrostat.*, vol. 29, no. 3, pp. 221-225, 1993.
- [11] A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, M. Rahli, M. Huzau, and L. Dascalescu, "Characterization of dual corona electrodes for electrostatic processes applications." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 44, pp. 692-698, 2008.
- [12] A. Bouteffaha, A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, M. Plopeanu and L. Dascalescu, "Experimental and numerical characterization of corona discharge generated by a triode electrode system." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 51, pp. 2513-2519, 2015.

Références bibliographiques

- [13] G. S. P. Castle, "Industrial applications of electrostatics: the past, present and future", *J. Electrostat.*, Vol. 51-52, pp. 1-7, 2001.
- [14] J. Bohm, "Electrostatic Precipitators", Amsterdam, Elsevier, 1982.
- [15] L. Dascalescu, A. Iuga, R. Morar, V. Neamtu, I. Suarasan, A. Samuila, and D. Rafiroiu, "Corona and electrostatic electrodes for high-tension separators," *J. Electrostat.*, Vol. 29, pp. 211-225, 1993.
- [16] L. Dascalescu, T. Zeghloul and A. Iuga, "Electrostatic separation of metals and plastics from WEEE." In *WEEE Recycling. Reserch, Development, and Policies*, (A. Chagnes, G. Cote, E. Ekberg, M. Nilsson, T. Retegan, Eds), Amsterdam: Elsevier, pp. 53-74, 2016.
- [17] B. Dramane, "Précipitation électrostatique de particules submicroniques par décharge a barrière diélectrique - étude électrique, granulométrique et aérodynamique", Thèse de doctorat, Université de Poitiers, Décembre 2009.
- [18] J. Chen and J. H. Davidson, "Ozone production in the positive DC corona discharge: Model and comparison to experiments", *Plasma Chem. and Plasma Process.*, Vol. 22, N° 04, pp. 495-522, 2002.
- [19] G. Dinelli, L. Civitano and M. Rea, "Industrial experiments on pulse corona simultaneous removal of NO_x and SO₂ from flue gas", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 26, N° 03, pp. 535-541, 1990.
- [20] Z. Mokhtari, S. Hole and J. Lewiner, "Smoke triggered corona discharge sensor", *J. Electrostat.*, Vol. 71, N° 04, pp. 769-772, 2013.
- [21] F. Deng, L. Ye and K. Song "Respiratory Monitoring by a Field Ionization Sensor Based on Trichel Pulses", *Sensors (Basel)*, Vol. 14, N° 06, pp. 10381-10394, 2014.
- [22] R. E. J. Sladek, E. Stoffels, R. Walraven, P. J. A. Tielbeek and R. A. Koolhoven, "Plasma treatment of dental cavities : a feasibility study", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 32, N° 04, pp. 1540-1543, 2004.
- [23] Z. Kovalova, M. Zahoran, A. Zahoranova and Z. Machala, "Streptococci biofilm decontamination on teeth by low-temperature air plasma of DC corona discharges", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 47, N°22, (224014), 2014.
- [24] T. Oda and J. Ochiai, "Charging characteristics of a non-woven sheet air filter," in *Proc. 6th International Symposium on Electrets*, pp. 515–519, 1-3 September 1988.
- [25] A. Jaworek, A. Sobczyk, T. Czech and A. Krupa, "Corona discharge in electrospraying", *J. Electrostat.*, Vol. 72, N° 02, pp. 166-178, 2014.
- [26] R. Thyen, A. Weber and C. P. Klages, "Plasma-enhanced chemical-vapour deposition of thin films by corona discharge at atmospheric pressure *Surface and Coatings*", *Tech.*, Vol. 97, pp. 426-434, 1997.

Références bibliographiques

- [27] E. Moreau, "Airflow control by non-thermal plasma actuators", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 40, pp. 605–636, January 2007.
- [28] H. Wang, J. Li and X. Quan, "Decoloration of azo dye by a multi-needle-to-plate high-voltage pulsed corona discharge system in water", *J. Electrostat.*, Vol. 64, N° 06, pp. 416-421, 2006.
- [29] M. A. Malik, A. Ghaffar and S. A. Malik, "Water purification by electrical discharges", *Plasma Sources Sci. Tech.*, Vol. 10, pp. 82-91, 2001.
- [30] S. Djedjiga, "Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques", Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Décembre 2011.
- [31] B. Pinte, "Power Grid Operation", University of Illinois Board of Trustees, September 2013. https://tcipg.org/sites/default/files/rgroup/TCIPG-Reading-Group-Fall_2013_09-06.pdf
- [32] Govi, "Quelques expériences sur l'induction électrostatique." *J. Phys. Theor. Appl.*, Vol. 4, pp.264-266, 1875.
- [33] G. Richard, A.R. Salama, K. Medles, C. Lubat, S. Touhami, and L. Dascalescu, "Electrostatic Separation of two Types of Copper Wires from Electric Cable Wastes." *Proc. Electrostatics Joint Conference*, 13-17 June 2016, West Lafayette, USA. (submitted to *IEEE Trans Ind Appl.*).
- [34] S. Messal, « Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie agro-alimentaire ». Thèse Génie électrique. Poitiers : Université de Poitiers, 2016.
- [35] ANAD Abderrahman ,LAMMARI Tayeb, MEREGHNI Zouber."Récupération des déchets plastiques à l'aide de forces électrostatiques", Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, pp.20-61, 2021-2022.
- [36] S. Messal, « Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie agro-alimentaire ». Thèse Génie électrique. Poitiers : Université de Poitiers, 2016.
- [37] Miloudi M, Medles K, Tilmatine A, Brahami M, Dascalescu L, « Modeling and ptimization of a peopeller-type tribocharger for granular materials » *J.Electrostat*, vol 69, pp. 631-637,2011.
- [38] A. Benabboun, A. Tilmatine, Y. Brahami, S. Bendimerad, M. Miloudi and K. Medles, "Experimental investigation of electrostatic separators of plastic particles using different charging devices." *Separation Science and Technology*, Vol. 49:3, pp. 464-468, 2014.
- [39] S. Masuda, M. Toraguchi, T. Takahashi, and K. Haga, "Electostatic beneficiation of coal using a cyclone-tribocharger." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 19, pp. 789-793, 1983.

Références bibliographiques

- [40] Y. Higashiyama and K. Asano, "Recent progresses in electrostatic separation technology." Part. Sci. & Technol, Vol. 16, pp. 77-90, 1998.
- [41] Samuila, A., Dascalescu, L. «Comportare materialelor granulare în câmp electric». Cluj-Napoca, Editura Mediamira, 1999.
- [42] Morar R., Iuga Al., Dascalescu L. and Samuila A., "Factors which influence the insulation-metal electroseparation", J. of electrostatics, 30, (1993), pp. 403-412.
- [43] S. Messal, « Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie agro-alimentaire ». Thèse Génie électrique. Poitiers : Université de Poitiers, 2016.
- [44] Dascalescu L., "Numerical analysis of the electric field of roll type electrostatic separators", J. of electrostatics, 29, (1993), pp.255-267.
- [45] Gontran Richard, " Étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires", DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE POITIERS ,pp.128,2018.
- [46] W.Aksa, K.Medles, M.Rezoug, M.Miloudi et L. Dascalescu, « Procédé de séparation électrostatique à deux étages pour l'amélioration de la pureté des matériaux isolants obtenus des déchets d'équipements électriques et électroniques,» chez Conférence Francophone sur l'Eco-conception en Genie Electrique (ConFrFGE), Montréal,Canada , Mai 2012.
- [47] C. Xiao, L. Allen, M. B. Biddle et M. Fisher, «Electrostatic separation and recovery of mixed plastics,» chez Society of Plastics Engineers (SPE) Annual Recycling Conference (ARC), Dearborn, Michigan (US), 1999.
- [48] S. Das, K. Medles, M. Younes, C. Dragan et L. Dascalescu., «Separation of fine granular mixtures in S-plate-type electrostatic separators,» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, pp. 1137-1143, 2007.
- [49] A. Tilmatine, Z. Azzouz, M. Younes, M. Brahami, L. Dascalescu «Separation électrostatique des particules : une technologie efficace dans l'industrie de recyclage», Sciences & Technologie, B – N°22, pp. 42-46, Décembre (2004).
- [50] S. Messal, A. Mekhalef, K. Medles, T. Zeghloul et L. Dascalescu, «Factors that influence the efficiency of a tribo-aero-electrostatic separator for finely grinded matter,» chez Proc. Electrostatics Joint Conference, West Lafayette, USA, 2016.
- [51] D. Tao et X. Jiang, «Electrostatic particle charger, electrostatic separation system and related methods », Patent Application Publication United States, vol. 10, pp. 1-7, 2006.
- [52] A. Mekhalef, K. Medles, F. Boukhoulda, A. Tilmatine, S. Messal et L. Dascalescu, «Study of a tribo-aero-electrostatic separator for mixtures of micronized insulating materials,» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, pp. 4166-4172, 2015.

Références bibliographiques

- [53] M. F. Boukhoulda, M. Miloudi, K. Medles, M. Rezoug, A. Tilmatine et L. Dascalescu, «Experimental modeling of a new triboelectrostatic separation process for mixed granular polymers,» IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 49, pp. 2375-2381, 2013.
- [54] Patrick Chantereau et Erik Bartmann , éd. Eyrolles ,Le grand livre d'Arduino,2014
- [55] [http://zoetrop.io/teck-blog/esp8266-bootloader-modes-and-gpuio-state-startupligne\];le/05/2017](http://zoetrop.io/teck-blog/esp8266-bootloader-modes-and-gpuio-state-startupligne).
- [56] Yahoumi Sonia ;StoutahRoza ; « Réalisation d'un système de contrôle et de commande à distance d'un véhicule » ; UNIVERSITE MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU ; 53 pages ;2018.
- [57] AOUINE ABDELKRIM ; « Conception et Réalisation d'un tracker solaire intelligent à Bas d une Carte Arduino-Uno » ; UNIVERSITE MOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU ;2017.
- [58] https://www.mornsun-power.com/html/news_detail/blogposts/404.html#:~:text=AC%20FDC%20converters%20are%20electrical,obtain%20an%20unregulated%20DC%20voltage
- [59] 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 triboélectrostatique des déchets électriques,» Revista constructia, 2003.
- [60] C. DRAGAN, Modélisation du processus de charge et séparation tribo-aéroélectrostatique de matériaux plastiques granulaires, 2010.
- [61] C. DRAGAN, Modélisation du processus de charge et séparation tribo-aéroélectrostatique de matériaux plastiques granulaires, 2010

Résumé :

Les déchets plastiques représentent une source significative de pollution dans les océans, nécessitant l'adoption de méthodes efficaces pour leur récupération et leur réutilisation. Cette étude a analysé une technique de chargement électrostatique par décharge couronne, intégrée à un dispositif de chargement avec tapis roulant électrostatique contrôlé par Arduino.

Au cours de l'étude, différentes électrodes (à fil, à lame et à lame avec dents de scie) ont été testées pour séparer des mélanges binaires de granulés plastiques usagés (ABS Bleu, PS Blanc). Les résultats ont montré que l'électrode à lame avec dents de scie était la plus efficace pour charger les granulés plastiques millimétriques, offrant une récupération et une pureté supérieures par rapport aux autres types d'électrodes.

En combinant la décharge couronne avec l'utilisation d'électrodes adaptées, le processus de séparation électrostatique a été optimisé, garantissant ainsi une pureté accrue des granulés plastiques recyclés.

Mots clés : Séparation électrostatique – décharge corona – recyclage du plastique – durabilité environnementale.

Abstract

Plastic waste poses a significant environmental threat, particularly in marine ecosystems, necessitating the development of efficient recovery and recycling methods. This study investigated electrostatic charging using corona discharge integrated into an Arduino-controlled electrostatic conveyor belt charging device. Different electrode configurations (wire, blade, and sawtooth blade) were evaluated for separating binary mixtures of used plastic granules (Blue ABS, White PS). The results demonstrated that the sawtooth blade electrode exhibited superior performance in charging millimeter-sized plastic granules, achieving higher recovery and purity compared to the other electrode types.

By combining corona discharge with appropriate electrode selection, the electrostatic separation process was optimized, ensuring enhanced purity of recycled plastic granules.

Keywords: Electrostatic separation – corona discharge – plastic recycling – environmental sustainability

ملخص

تمثل النفايات البلاستيكية مصدرًا مهمًا للتلوث في المحيطات، مما يتطلب اعتماد طرق فعالة لاستعادتها وإعادة استخدامها. حللت هذه الدراسة تقنية الشحن الكهربائي عن طريق تفريغ التاج، مدمجة في جهاز شحن مع جهاز المشي الكهروستاتيكي Arduino الذي يتحكم فيه.

أثناء الدراسة، تم اختبار أقطاب كهربائية مختلفة (أسلاك وشفرة وشفرة مع منشار) لفصل المخاليط الثنائية من الحبيبات أظهرت النتائج أن قطب شفرة المنشار كان الأكثر كفاءة لتحميل (ABS Blue، PS White) البلاستيكية المستعملة الكريات البلاستيكية المليمترية، مما يوفر استعادة ونقاوة فائقة مقارنة بأنواع الأقطاب الكهربائية الأخرى.

من خلال الجمع بين تفريغ التاج واستخدام أقطاب كهربائية مناسبة، تم تحسين عملية الفصل الكهروستاتيكي، وبالتالي ضمان زيادة نقاء الحبيبات البلاستيكية المعاد تدويرها.

الكلمات الرئيسية: الفصل الكهربائي - تفريغ كورونا - إعادة تدوير البلاستيك - الاستدامة البيئية