

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ EL-CHAHID HAMMA LAKHDAR

Faculté des Sciences
Appliqué



جامعة الشهيد حمّـة لخضر - الوادي
Université Echahid Hamma Lakhdar - El-Oued



جامعة الشهيد حمّـة لخضر - الوادي
Université Echahid Hamma Lakhdar - El-Oued

Département de Génie
Mécanique

MÉMOIRE

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Spécialité : Électromécanique

Thème

**Séparation électrostatique Deux niveaux
(métalique_isolant)**

Présenté par :

- ❖ Mohammed Allag
- ❖ Salah Ben Haoua
- ❖ Amine Kaddour
- ❖ Ridha FouRou

Dirigé par:

Dr. Zenina Med. Laid

Année Universitaire : 2023 / 2024

REMERCIEMENTS

A la fin de la réalisation de cette étude, je remercie Dieu tout puissant qui m'a donné la force, la volonté et la patience durant toutes ces années d'études.

Je tiens à remercier mon promoteur Dr.Zenina Med. Laid , à l'université de EL-CHAHID HAMMA LAKHDAR pour avoir dirigé ce travail avec compétence, pour tous les conseils précieux, pour l'intérêt qu'il a porté à cette étude et pour les fortes impulsions qu'il a su si bien donner .

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance au monsieur Dr.Ladjal Segni, maitre de conférences à l' Université de EL-CHAHID HAMMA LAKHDAR pour avoir accepté de présider le jury de ce travail.

Je remercie vivement le Dr. Mahmoudi et le Dr. Aroudj pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger mon travail .

J'adresse, également mes très forts remerciements société de plastique de aichouche. pour m'avoir donné les échantillons pour la réalisation des expériences ..

Mes remerciements vont à tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce travail .

الإهداء (Dédicace)

الحمد لله والصلاة والسلام على الرسول الكريم صلى الله عليه وسلم
بعد هذه المدة الدراسية الحافلة بالعمل والجد نتقدم بالإهداءات التالية لمن يمثلون أقرب الناس إلى قلوبنا.
>> إلى الذين حملوا أقدس رسالة في الحياة...إلي الشموع التي تحترق لتتير الطريق للآخرين
إلى منارات المعرفة ... ومناهل العلم <<

أساتذتنا الأفاضل

>> إلى من جمعنا بهم الأقدار...إلي من رافقونا طيلة السنين وشاركونا الحب والحنين إلى من رسموا معنا
صورة المستقبل <<

أصدقائنا

إلى الذين أحسنوا تربيتهنا وعملوا على سعادتنا ووضعونا على الطريق الصحيح
.اوليانا الكرام حفظهم الله ورحمهم وأطال أعمارهم في طاعته.
إلى العائلات والزملاء الطلبة وكل من ساهم من قريب أو بعيد في تحقيق أهدافنا.
حفظكم الله ورعاكم وجزاكم عنا خيرا. والسلام عليكم ورحمة الله وبركاته.

Résumé:

La séparation électrostatique s'est avérée très efficace dans les processus de séparation, comme nous le voyons aujourd'hui, avec le développement de la technologie moderne, qu'il est nécessaire de développer et d'étudier des machines de séparation électrostatique, qui contribuent grandement à l'exploitation de matériaux nocifs pour l'environnement et à leur conversion en matières premières utilisables.[01]

La séparation est considérée comme très réussie en raison du taux de séparation élevé et offre un bien meilleur rendement que les méthodes de séparation utilisées précédemment.[02]

Cet article fournit une explication détaillée de la façon de créer des machines de séparation électrostatique en utilisant un système électrique qui nous donne une tension négative élevée qui sépare les matériaux en fonction des différences de charges électriques.

Mots clés: *séparation, électrostatique, décharge couronne, haute tension, tribo-électrique*

Abstract:

Electrostatic separation has proven to be highly effective in separation processes, as we see today with the development of modern technology that it is necessary to develop and study electrostatic separation machines, which contribute greatly to exploiting harmful materials to the environment and converting them into usable raw materials.

The separation is considered very successful due to the large separation rate and provides a much better yield than previously used separation methods.

This article provides a detailed explanation of how to create electrostatic separation machines using an electric system that gives us a high negative voltage that separates materials according to differences in electrical charges.

Key words: *separation, electrostatic, crown discharge, high voltage, tribo-electric*

الملخص:

اثبت الفصل الكهروستاتيكي فعاليته إلى حد كبير في عمليات الفصل حيث نرى اليوم مع تطور التكنولوجيا الحديثة انه لا بد من تطوير ودراسة آلات الفصل الكهروستاتيكي والتي تساهم بشكل كبير في استغلال المواد الضارة للبيئة وتحويلها إلى مواد أولية قابلة للاستعمال.

يعتبر الفصل ناجح إلى حد كبير نظرا لنسبة الفصل الكبيرة ويقدم مردود أفضل بكثير من طرق الفصل المستعملة سابقا. توضح هذه المقالة شرحا تفصيلي لكيفية إنشاء آلات الفصل الكهروستاتيكي باستخدام نضام كهربائي الذي يعطينا جهد عالي سالب يقوم بفصل المواد حسب فروق الشحنات الكهربائية.

الكلمات المفتاحية: فصل, الكهروستاتك, الشرارة الكهربائية, الجهد المرتفع, شحن العينات

Sommaire

	Page
Liste de figures	vi
Liste des Symboles	xi
Introduction general.....	1
CHAPITRE I : l'état de l'air	
I-1- Introduction	2
I-2-Dechet granule.....	2
I-3- recyclage de matières plastiques.....	3
I-4-Matériaux Thermoplastique.....	3
I-4-1- Classification structurelle.....	3
I-4-2- Les principales caractéristiques du plastique	3
I-4-3- Engineerie spéciale et navires plastiques	4
I-5- Caractéristiques des matériaux isolants	4
I-5-1- Définition.....	4
I-5-2- Caractéristiques diélectriques des isolants.....	4
I-5-2-1- Permittivité relative.....	4
I-6- Type de recyclage.....	4
I-7- Dispositifs de charge	5
I-8- Induction électrostatique.....	5
I-9- L'effet couronne	6
I-10- Propriétés triple-charges des déchets plastiques.....	7
I-11- tribo-électrique.....	7
-conclusion.....	8
CHAPITRE II : Séparation électrostatique « Isolant-métallique »	
II-1- Séparation électrostatique.....	9
II-2-1-chargeement surface cylindrique(lois de Gosse).....	9
II-2-2-.Le force exerce d'une Séparation cylindrique rotative	9
-Force de Centrifuge	11
- Force de gravite.....	11
- Force du champ électrostatique.....	12
- Force d'image électrique.....	12
II-2-3- Le force exercé d'une Séparation par gravite.....	
- Force de gravite.....	
- Force d'image électrique.....	
- Force du champ électrostatique.....	13

II-3- une charge ponctuelle d'une un chaque électrostatique	13
II-3-1- Séparation électrostatique par cylindre rotative	13
II-3-1-1- vecteur de charge de matériaux isolent métallique.....	14
II-3-1-2- vecteur de champ électrostatique E^{\rightarrow}	14
II-3-1-3- Projectile de charge d une champ électrostatique.....	14
II-3-2- Séparation électrostatique par gravité.....	15
II-3-3- Séparation électrostatique par tambour relative.....	15
CHAPITRE III : Etudes des éléments energtiques	
III-1- Introduction.....	16
III-2-- <i>La Conception du FLYBACK</i>	16
III-2-1- <i>Générateur AC/DC</i>	16
III-2-2- <i>Générateur du pulse</i>	22
III-2-3- Convertisseur de flashback(<i>Flayback Converter</i>).....	25
III-2-4- Générateurs haute tension	25
CHAPITRE VI : Etudes résultats et discussions	
VI-1- Introduction.....	27
VI-2- Travail Expérimental.....	27
VI-2- matériaux Expérimental.....	27
VI-2-1- Les matériaux variés des déchets.....	27
VI-2-2- Les dispositifs utilises.....	28
VI-2-2-1- Air Triboélectrique	29
VI-2-2-2-Triboélectrique.....	29
VI-2-2-3- Le chargement par vibration.....	29
VI-2-2-4-Le générateur de tension continue à haute tension.....	30
VI-3- . Résultats expérimentaux.....	32
VI-3-1- Les résultats expérimentaux du séparateur électrostatique de Tambour rotative.....	32
VI-3-2- Les résultats expérimentaux du séparateur électrostatique à glissement gravitationnel.....	35
Conclusion générale et perspective	39
References bibliographiques	40

Liste de figures

Figure	Page
Fig(I-1)- Electrodes utilisées pour l'induction électrostatique	6
Fig(I-2)- Type de effet couronne	7
Fig (II-1)_ Carolus Fridericus Gauss(1977-1855)	10
Fig(II-2)- agissant Vectuer du surface de gauss	10
Fig(II-3)- agissant champer de gosse	11
Fig(II-4)- Les forces agissant sur le séparateur cylindrique	12
Fig(II-5)- Les forces agissant sur le séparateur par gravite	13
Fig(II-6)- Séparation électrostatique par cylindre rotative	13
Fig(II-7)- Séparation électrostatique par gravité	15
Fig(III-1)- Signal de AC 220V	17
Fig (III-2)- Branchement de Vs avec Transformer	18
Fig (III-3)- signal AC 48V	18
Fig (III-4)- Branchement Vs,T1 avec Pont diod	19
Fig(III-5)- Signal de redressement	20
Fig (III-6)- Branchement avec C1	20
Fig.(III.7) Signal de filtrage	21
Fig.(III.8) AC-DC CONVERTRE	21
Fig(III.9) Signal DC 12	21
Fig(III-10) – Timer NE555	22
Fig(III-11)- circuit Timer NE555	22
Fig(III-12)- circuit de Multiplication de tension	23
Fig(III-13) – Gate Drive	24
Fig(III-14)- Low Side	24
Fig(III-15)- Circuit de Flayback Converter	24
Fig(III-16) - Image de Le générateur de tension continue à haute tension (1 kV à 20kV)	25
Fig(III-16) - Image de Le générateur de tension continue à haute tension (1 kV à 10kV)	26
Fig(VI-1)- Échantillons de fer	27

Fig(VI-2)- Échantillons d'aluminium	27
Fig(VI-3)- représentation des longueurs et des échantillons métalliques	28
Fig(VI-4)- échantillons de plastique blanc(LDPE)	28
Fig(VI-5)- échantillons de plastique noir (HDPE)	28
Fig(VI-6)- représentation des longueurs et des échantillons plastiques	28
Fig(VI-7)- Image réelle de Air Triboélectrique	29
Fig(VI-8)- image dessinée de Air Triboélectrique	29
Fig(VI-9)- Image réelle de Le chargement par vibration	29
Fig(VI-10)- Image dessinée de Le chargemet par vibration	29
Fig(VI-11)- Image réelle de Le générateur de tension continue à haute tension	30
Fig(VI-12)- Image dessinée de séparateur électrostatique à cylindre rotatif	30
Fig(VI-13)- électrode cylindrique	31
Fig(VI-14)- électrode ovale	31
Fig(VI-15)- électrode file	31
Fig(VI-16)- Image réelle de séparateur électrostatique à glissement	31
Fig(VI-17)- Image dessinée de séparateur électrostatique à glissement	32
Fig(VI-18)- photo du résultat de la séparation d'alim et de PET blanc(LDPE)	32
Fig(VI-19)-Photo d'échantillons de séparation d'alim et de PET blanc(LDPE)	33
Fig(VI-20)- Colonnes graphiques montrant les pourcentages de séparation entre Alim et le PET à différents voltage	33
Fig(VI-21)- photo du résultat de la séparation du métal et de PET blanc(LDPE)	34
Fig(VI-22)-Photo d'échantillons de séparation du métal et de PET blanc(LDPE)	34

Fig(VI-23)- Colonnes graphiques montrant les pourcentages de séparation entre du Met et le PET à différents voltage	35
Fig(VI-24)- image du résultat de la classe utilisant électrode cylindrique	35
Fig(VI-25)- Colonnes graphiques montrant les pourcentages de séparation entre du Met et le Acire , entre deAlim et PET à différents voltage	36
Fig(VI-26)- image représentant le changement d'angle de l'électrode	37
Fig(VI-27)- Colonnes graphiques montrant les pourcentages de séparation entre du Met et le PET , entre deAlim et PET à différents voltage.	37
Fig(VI-28)- Colonnes graphiques montrant les pourcentages de séparation entre du PET et le Acire, entre de Alim et PET à different voltage	38

Liste de Symboles:

m	masse
ϵ	permittivité
ϵ_0	la permittivité du vide
ϵ_r	permittivité relative
\emptyset	Le flux
E	Champ électrique
SG	surface de gauss
qint	c'est la somme de charge à l'intérieur de surface de gauss
S	surface cylindrique
V	volume cylindrique
r	rayon
L	longer
Fc	Force de Centrifuge
Fg	Force de gravité
m	masse de particule
R	rayon du cylindre
g	gravitation
w	vitesse angulaire du cylindre
Fe	Force du champ électrostatique
Fi	Force d'image électrique
q	Quantité de charge
d	distance séparant
qind	charge de granule
Q	charge électrique ponctuelle
k	Constante
F	deuxième loi de Newton
a	Accélération
Vk	Tension de perte de diode.
VT	La tension qui sortit Transformateur T .
V+	Tension qui sortit à pont diode .
V1	La tension sur le premier bobine
V2	La tension sur le deuxième bobine
I1	Le courant sur le premier bobine
I2	Le courant sur le deuxième bobine
D	Duty cycle
Ton	C'est le temps pendant lequel le courant passe
TOff	C'est le temps pendant lequel aucun courant ne passe.
H	Flux magnétique.

N1	Nombre des tours de la première bobine
	-xi-
N2	Nombre des tours de la deuxième bobine
V0	tension de sortie
Vs	tension de source
f	Fréquence
R	Ristance
L	L'inductance.

INTRODUCTION

Introduction générale :

Les déchets sont une source majeure de pollution environnementale, nécessitant une réflexion sérieuse pour atténuer les effets secondaires des déchets domestiques et industriels. Toutes les organisations internationales travaillent activement à sensibiliser et à réduire l'impact négatif des déchets et des gaz qu'ils émettent [03].

Des études ont démontré que les déchets plastiques ne se dégradent pas rapidement dans le sol, mais prennent des millions d'années pour se décomposer, émettant des gaz qui ont un impact sur le climat.

Notre étude repose sur une méthode efficace de séparation des matériaux plastiques et métalliques, utilisant la séparation électrocinétique basée sur la charge du matériau par frottement [04].

Nous avons mené des études expérimentales simulant la trajectoire d'une particule chargée électriquement dans un champ électrique, tout en étudiant le changement de forme de l'électrode.

L'étude a également inclus différents matériaux séparés par différentes méthodes de séparation double, telles que PET-Acire et PET-Aluminium.

- Dans la première section, nous avons examiné l'étude théorique de la séparation et des méthodes de charge adoptées [05].
- Dans la deuxième section, nous avons examiné différentes méthodes de séparation.
- Notre étude dans la troisième section s'est appuyée sur la simulation du circuit électrique haute tension [06].
- Dans la quatrième section, notre étude s'est appuyée sur l'examen des différents processus de séparation en utilisant des électrodes de formes différentes, où divers phénomènes électrostatiques ont été étudiés dans ces formes.

CHAPITRE I:

L'etat de l'air

I-1-Introduction:

Dans ce chapitre, nous abordons le processus de séparation électronique: ses préparations, ses mécanismes de composition, les outils de ses descriptions et leurs applications. Le matériau d'expédition est une substance qui a un champ électrique microscopique permanent à sa surface. Ce champ peut provenir de la direction pure des groupes polaires dans le matériau, ou d'une cargaison électrostatique purement microscopique sur le matériau. Les particules polarisées sont une substance qui a une charge électrostatique pure en raison de la différence du nombre d'ions catinaux et Anawa dans le matériau. Toute substance contient des ions sur sa surface extérieure, ou peut être atteinte dans sa profondeur, a la capacité de devenir une particule chargée. Lorsque cette substance entre en contact avec une autre substance, les ions peuvent être transmis entre eux. Si l'ionique et les catégories ont des tendances différentes de transmission, le transport inégal de ces ions peut entraîner un transfert net de l'envoi entre les deux articles[7] Les déchets plastiques sont une matière recyclable soumise à des problématiques mondiales de gestion environnementale. Cependant, il est important de prendre en compte d'autres types de plastiques tels que les textiles, le papier et les métaux ferreux dans les efforts visant à améliorer la gestion des déchets plastiques et de recyclage. L'énorme quantité de plastique utilisée dans la vie quotidienne a le potentiel d'augmenter la pollution et de nuire à l'environnement. Pour réduire l'impact du plastique[8].

I-2-Déchets granulés:

Les granulés plastiques sont des matériaux utilisés dans de nombreux secteurs industriels, tels que l'emballage, l'automobile, l'électronique, l'agriculture et bien d'autres encore. Ces granulés sont fabriqués à partir de matières premières plastiques recyclées ou vierges et sont transformés en produits finis tels que des bouteilles, des sacs, etc. Les déchets plastiques solides présentent un risque pour l'environnement et l'être humain par sa durabilité, car sa décomposition dans le sol prend des millions d'années, de sorte que les gaz délivrés par elle constituent un risque pour les eaux souterraines et les couches d'ozone Chaque année, le monde consomme environ 400 millions de tonnes de matières plastiques et un tiers de cette quantité n'est utilisé qu'une seule fois, et ces statistiques sont causées par le message du secrétaire général des Nations Unies à l'occasion de la Journée internationale de l'environnement.

La gravité de ces matériaux a également confirmé que chaque jour il est reçu dans nos océans, nos rivières et nos lacs, suffisamment pour les deux mille camions de déchets remplis de déchets plastiques, et cela aura des conséquences catastrophiques[9].

Les déchets plastiques, au lieu d'être brûlés – ce qui génère une production importante de dioxyde de carbone – peuvent désormais être convertis et réutilisés sous forme de matériaux utilisables. De plus, le recyclage réduit l'extraction de matières premières

I-3- recyclage de matières plastiques:

Procédés de recyclage de matières plastiques utilisant diverses méthodes telles que l'ordinateur, l'impression, la copie et l'impression [13]. Le processus de tri des déchets est considéré comme aussi important que le recyclage optimal, et de nombreuses méthodes de tri nouvelles et autres ont été essayées dans le cadre de la recherche [14]. Les méthodes de reclassification des déchets plastiques en primaires, secondaires, tertiaires et tertiaires sont élaborées en raison de leurs propres avantages et défis techniques [15]. Raisons innovantes dans le recyclage des enjeux tiers dans le secteur industriel et manufacturier [16]. De plus, le recyclage des déchets résultant d'une grave pollution provenant des déchets médicaux et électroniques et de nombreuses nouvelles formes sont encore prêts à être traités [17]. L'autre méthode consiste à utiliser un solvant pour la matière plastique et à la déposer à l'aide d'un non-solvant en présence d'un agent de séparation de phases. En général, l'attention portée aux produits chimiques revient sur divers articles en plastique qui sont utilisés et éliminés de manière incontrôlée[18].

I-4-Matériaux Thermoplastique:

Le thermoplastique ou thermoplastique est un type de plastique qui se ramollit avec la chaleur et durcit à nouveau lorsqu'il est refroidi. Les matériaux thermoplastiques peuvent subir plusieurs cycles de fusion et de congélation sans modification chimique, ce qui les rend adaptés au recyclage. Cela rend ces matériaux faciles à fabriquer de plusieurs manières, notamment par moulage par injection et par soudage. La plupart des matériaux thermoplastiques sont des polymères constitués de chaînes linéaires liées par des liaisons covalentes. Ces liaisons covalentes ne s'étendent pas pour relier les chaînes de manière répulsive, mais les chaînes sont souvent reliées par de faibles forces de dispersion, rarement par attraction dipôle-dipôle, et parfois par des liaisons hydrogène. De plus, les polymères thermoplastiques sont souvent à l'opposé des polymères thermodurcissables, car ces derniers n'ont pas de cycles de fusion et de solidification.[10]

I-4-1 Classification structurelle:

Les plastiques thermiques sont divisés en matériaux plastiques à des fins générales, en génie en plastique et en matériaux spéciaux, selon leur fonction, et comme vous êtes dans de nombreuses utilisations technologiques du stéréotype.[11]

I-4-2 Les principales caractéristiques du plastique:

Application large, traitement simple et excellentes performances telles que: polyéthylène (PE), chlorure de polyvinyle (PVC), polypropylène (PP).[11]

I-4-3 Engineering spéciale et navires plastiques:

Ce sont certaines caractéristiques structurelles de polymères de haute qualité qui se caractérisent par leur propre forme, la technologie du traitement est quelque peu compliquée et est souvent utilisée dans des applications d'ingénierie spéciales: nylon, polycarbonate (PC) polytétrafluoroéthylène (Téflon , PTFE), polyéthylène téréphtalate (PET) [11].

I-5- Caractéristiques des matériaux isolants :

I-5-1 Définition:

Matériaux plastique et dit Les isolants ou diélectriques sont des matériaux ayant une résistivité très élevée 10^8 à $10^{16} \Omega.m$, car ils contiennent très peu d'électrons libres.

I-5-2 Caractéristiques diélectriques des isolants :

I-5-2-1 Permittivité relative :

Soit un condensateur plan à vide (ou à air) [12]: $C_0 = \epsilon_0 (S/e)$ (I-1)

$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ est la permittivité absolue du vide (ou de l'air). Si le même condensateur est rempli par un isolant, sa capacité devient [12] : $C = \epsilon_r C_0 = \epsilon_r \epsilon_0 (S/e)$ (I-2)

En élevant la tension à laquelle l'isolant est exposé jusqu'à une certaine valeur appelée tension de claquage, un arc électrique apparaît dans l'isolant : un courant intense traverse l'isolant en suivant un trajet formé par l'arc lui-même. Diélectrique perforé : Il y a claquage diélectrique ou destruction du diélectrique, irréversible pour les diélectriques solides (carburation), et réversible pour les diélectriques gazeux et liquides [12].

Par rapport à la relativité de la direction du champ électrique et des surfaces principales du diélectrique, la rigidité diélectrique peut être transversale ou longitudinale [12].

Dépend de la rigidité de l'isolation sur :

- la fréquence, la forme et la durée de l'application de la tension ;
- température, pression et humidité de l'atmosphère ;
- La présence d'impuretés dans l'isolant (bulles d'air, humidité) [12] .

I-6-Type de recyclage:

Il existe trois principaux types de techniques de recyclage: chimique et mécanique et organique [19].

- ✓ Recyclage «chimique»: en utilisant une réaction chimique au traitement des déchets, Ceci est dans le but de séparer certains composants.
- ✓ Recyclage «mécanique»: les déchets se transformeront-ils en utilisant Machine, par exemple le broyage.

✓ Recyclage «organique»: forme, après fécondation ou fermentation en Production d'engrais ou carburant comme le gaz biologique.

I-7-Dispositifs de charge:

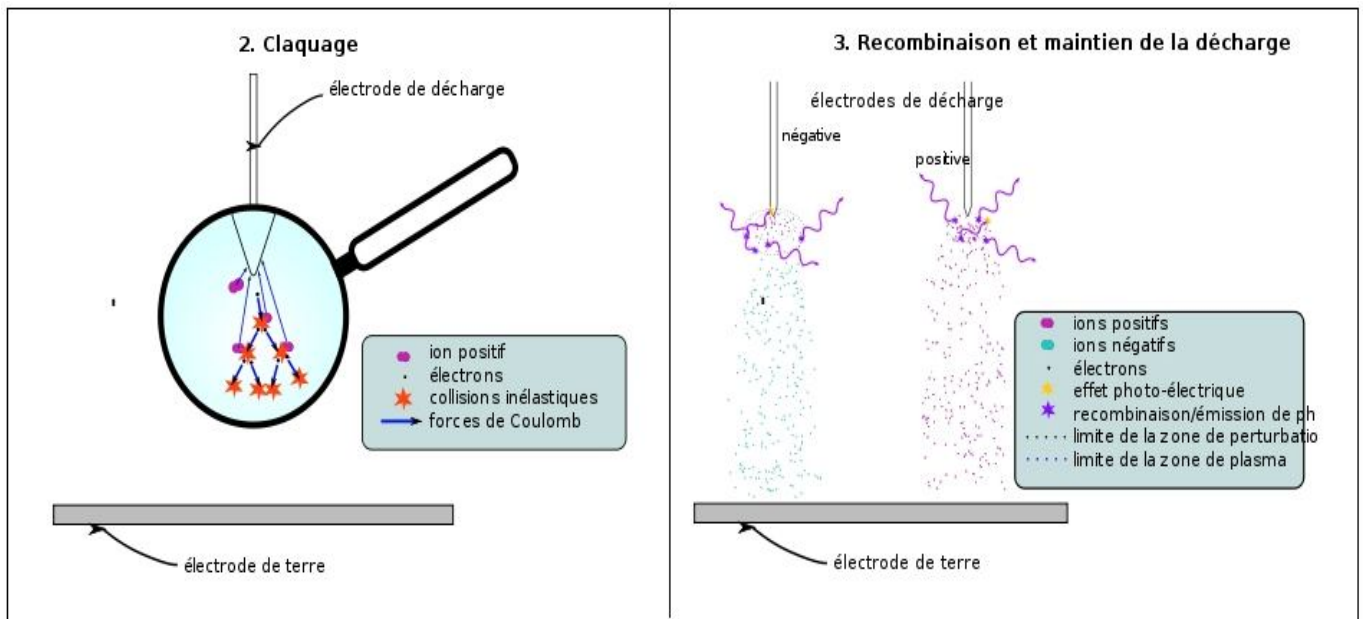
le processus de séparation électrostatique d'un mélange de matériaux, sous leur forme Granulaire ou pulvérulent, il est nécessaire que les composants du mélange acquièrent des charges Différentes en intensité et en polarité. De nombreux mécanismes physiques peuvent générer ces Charges électriques [21]. Les trois principales technologies sont : l'induction électrostatique, Décharge corona et triboélectricité.

I-8-Induction électrostatique:

L'induction électrostatique est un phénomène qui crée un mouvement de charges L'électricité dans un corps était initialement électriquement neutre, via un deuxième corps Chargés électriquement, sans contact direct entre eux. L'objet chargé crée un champ Électricité qui provoque la polarisation du corps neutre. Ainsi, les charges positives et Les négatifs du corps neutre se sépareront et s'organiseront en deux pôles situés à Les deux extrémités de l'objet. S'il est conducteur et relié à la terre, les charges sont Les personnes proches du point de contact sont évacuées vers le sol. Ainsi, lorsque l'objet est séparé du sol, il porte une charge non nulle. Dans le cas d'un isolant, le corps isolant ne transmet pas de charges électriques. Il n'est donc pas chargé par induction électrostatique [21].

Électrodes utilisées pour générer un champ électrique nécessaire à l'induction

L'électricité statique est souvent de forme cylindrique ou elliptique. On utilise un fil fin avec un faible rayon de courbure en induction électrostatique. Il y a des bords dessus L'utilisation d'électrodes est déconseillée pour éviter toute décharge et réduire les risques d'arc électrique. La forme ovale est largement utilisée dans les séparateurs électrostatiques Élargir et unifier le domaine. La figure 2.3 montre deux configurations d'électrodes[22].



Fig(I-2)- Type de effet couronne

I-10-Propriétés triple-charges des déchets plastiques:

De nombreuses études ont été menées pour étudier les propriétés des déchets plastiques grâce à un chargement triple vibration et un chargement cyclonique (vortex). La série triboélectrique obtenue par vibration était

PE-PS-PC-PVC-ABS-PP-(+) :

tandis que la série triboélectrique était la série obtenue par cyclone

-PE - PS - PC - PVC - ABS - PP- (+).

De plus, le chargement des échantillons par cyclone est plus efficace et plus stable que le chargement par vibration. Les expériences ont montré de nombreux facteurs d'influence, tels que la taille des matériaux, où la capacité de charge effective dans le processus de séparation est plus efficace dans les objets plus petits, ainsi que la nature du milieu dans lequel les échantillons sont présents, comme l'humidité, température, etc[24].

I-11-tribo-électrique:

Les tribo-électrique propriétés des granulés de déchets plastiques sont importantes dans la séparation tribo-électrostatique. Renouveler la recherche sur les matériaux qui améliorent la capacité de divers plastiques à générer une belle puissance de turbine. Il se caractérise par la teneur en substances microbiennes qui varie considérablement au cours du processus de charge naturel, ce qui affecte le rapport charge/masse des granulés tels que le PA, le PVC et le PET [24]. De plus, un équilibre de liberté est nécessaire pour la séparation électrostatique, La température et l'humidité de l'air dans le dispositif à lit fluidisé affectent grandement

le processus de charge [24]. Malgré les défis liés à la charge hétérogène et à la sensibilité environnementale, des progrès ont été réalisés dans les séparateurs électrostatiques pour améliorer l'efficacité du recyclage des plastiques issus des déchets électroniques.

Bien que la cascade turboélectrique ne soit pas un facteur limitant dans cette étude, elle reste un concept fondamental en turboélectrique et peut jouer un rôle important dans d'autres applications de l'électrophorèse où différents matériaux sont utilisés. La compréhension des séries turboélectriques reste généralement importante pour prédire le comportement de charge des matériaux lorsqu'ils entrent en contact les uns avec les autres, même si cela n'affecte pas directement les résultats de cette étude spécifique. Et pour déterminer Valeurs optimales pour divers facteurs de contrôle du processus de tribo-charge électrique. Le processus de charge électrique dépend de l'angle d'inclinaison et de rotation La vitesse du cylindre, ainsi que la durée pendant laquelle les particules restent à l'intérieur du triple chargeur. En une minute, les granulés de matériau placés à l'intérieur peuvent obtenir le taux de charge maximal.[25]

I-12-conclusion:

Le séparateur électrostatique sépare avec succès les particules métalliques et isolantes des déchets électriques et électroniques fins

Le séparateur fonctionne en chargeant les particules métalliques par induction électrostatique à l'aide d'une électrode avec une ceinture métallique mise à la terre, ou en chargeant par friction électrostatique, de sorte que les matières plastiques non chargées soient collectées séparément [25] [23].

La masse des particules conductrices récupérées augmente avec une haute tension appliquée plus élevée et diminue avec un réglage d'angle plus faible de l'axe de l'électrode haute tension. [21].

CHAPITRE II:

séparation électrostatique

Isolant métallique

II.1 Introduction:

Dans ce chapitre, des méthodes de séparation électrostatique (Séparation par gravite, séparation cylindrique rotative) ont été étudiées pour évaluer le rendement de séparation [26].

Pour obtenir un bon résultat dans le processus de séparation, nous avons mené quelques études pour chacune des méthodes de séparation. Nous avons étudié les méthodes de séparation sous plusieurs aspects, par exemple : le mouvement des charges, les forces appliquées à chaque processus de séparation, l'extrusion des échantillons. ...etc.[26].

II.2 Séparation électrostatique

Les séparateurs électrostatiques t les matériaux granulaires en exploitant les forces exercées sur les particules chargées ou polarisées lorsqu'elles sont soumises à un champ électrique intense. En raison de leurs propriétés physiques distinctes, les particules acquièrent des charges différentes, ce qui entraîne des trajectoires distinctes. Cette différence permet alors la séparation des matériaux.[27]

Les charges électriques interviennent dans de nombreux phénomènes. Le premier phénomène est la force d'attraction ou de répulsion F qui existe entre deux corps de charges Q_1 et Q_2 , situés à une distance d l'un de l'autre . Il existe de nombreuses autres forces, telles que : la force centrifuge, la force gravitationnelle, la force électrique, etc. [27]

Lorsque les charges ont la même polarité, elles génèrent une force répulsive positive. En revanche, si les charges sont de polarité opposée ($Q_1 = Q_a < 0$ et $Q_2 = Q_b > 0$), la force d'attraction est négative. Pour illustrer, deux charges du même type se repoussent, tandis que deux charges opposées s'attirent[27].

II-2-1-chargement surface cylindrique:

Le chargement de surface cylindrique consiste à appliquer une charge électrique sur la surface d'un cylindre. Cela implique que la charge électrique est distribuée de manière spécifique sur la surface du cylindre. Ce processus est utilisé dans diverses applications techniques telles que les moteurs électriques et les générateurs, où des cylindres chargés peuvent être employés pour générer des champs électriques ou magnétiques afin de réguler le déplacement des particules ou d'autres objets.[28]

Nous surveillons soigneusement le mouvement des expéditions à travers la surface cylindrique en fonction des principes de base de l'électricité statique. Grâce à l'analyse précise des réactions électriques en fonction des principes de l'électricité statique et magnétique, nous pouvons comprendre plus de détails sur la façon dont les expéditions traversent la surface cylindrique en s'appuyant sur les lois du Gosse. [28]

Loi de Gauss:



Fig(II-1)-Carolus Fridericus Gauss(1777-1855)

La théorie de Gauss peut être utilisée pour suivre le champ électrique des charges à travers une surface, car elle prend en compte le champ électrique en chaque point[29], selon les lois suivantes:

Équations de Gauss:

$$\phi = \oiint \vec{E} \cdot (d\vec{S}_G) \quad (II-1)$$

$$\phi = (\sum q_{int})/\epsilon \quad (II-2)$$

Le flux $\phi =$

$E =$ Champ électrique

$S_G =$ surface de gauss

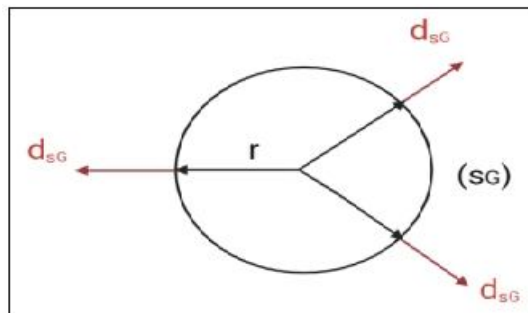
$\sum q_{int} =$ c'est la somme de charge à l'intérieur de surface de gauss

Équations auxiliaires:

Équation du Multiplication radial:

$$\vec{E} \cdot (d\vec{S}_G) = \vec{E} \cdot d\vec{S}_G \cdot \cos(\vec{E} \cdot d\vec{S}_G) \quad (II-3)$$

$d\vec{S}_G$: Vecteur du surface de gauss. Il est toujours perpendiculaire à la chambre gauss en tous points.[29]



Fig(II-2)- agissant Vecteur du surface de gauss.

Surface cylindrique:

$$S=2\pi r l \quad (II-4)$$

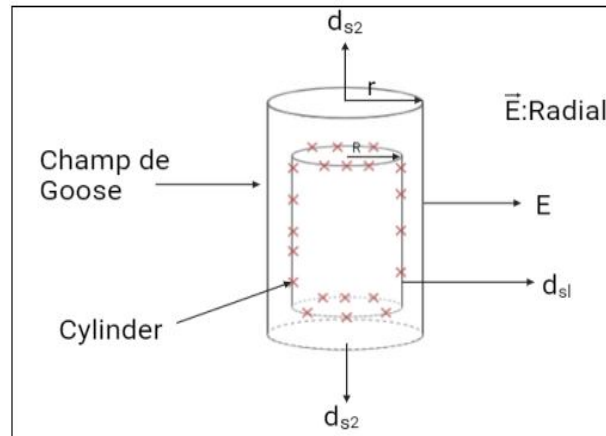
Volume cylindrique:

$$V=\pi r^2 L \quad (II-5)$$

Pour calculer le champ électrique appliqué à la surface du cylindre, on suit deux étapes [30]:

1^{er} étape: Représentation du salon de goss

Avant de commencer à appliquer la relation de goss nous représentons la chambre de goss qui a la forme d'un cylindre fermé et dont le rayon est r, comme illustré dans la figure:



Fig(II-3)- agissant champer de gosse

2^{ème} étape : Calculer le champ électrique \vec{E} :

Pour calculer le champ électrique E, nous calculons la valeur de l'écoulement dans les deux loi. En les égalisant, on peut extraire la valeur du champ E:

Équations de Gauss:

$$\phi = \oiint \vec{E} \cdot (d\vec{S}) \quad (II-6)$$

$$\phi = (\sum q_{int})/\epsilon \quad (II-7)$$

Après simplification on trouve que:

$$\phi = E \cdot S l = 2\pi r l \quad (II-8)$$

$$\phi = (\sum q_{int})/\epsilon = \delta S/\epsilon = \delta 2\pi R l/\epsilon \quad (II-9)$$

En égalisant 1 et 2, nous trouvons que:

$$E = \delta R/\epsilon r \quad (II-10)$$

II-2-2- Le force exerce d'une Séparation cylindrique rotative:

Les particules sont soumises à deux types de force (Fig.2) [31] :

II -2-2-1 Forces mécaniques:

Force de Centrifuge: est la force fictive qui amène un corps à s'éloigner du centre de rotation d'un mouvement circulaire.

$$F_c = m R \omega^2 \quad (II-11)$$

Force de gravite: $F_g = m \cdot g$ (II-12)

m: masse de particule

R : rayon du cylindre

g: gravitation

w: vitesse angulaire du cylindre

II -2-2-2 Forces électriques:

Force du champ électrostatique:

$F_e = q \cdot \text{ind} \cdot E$ (II-13)

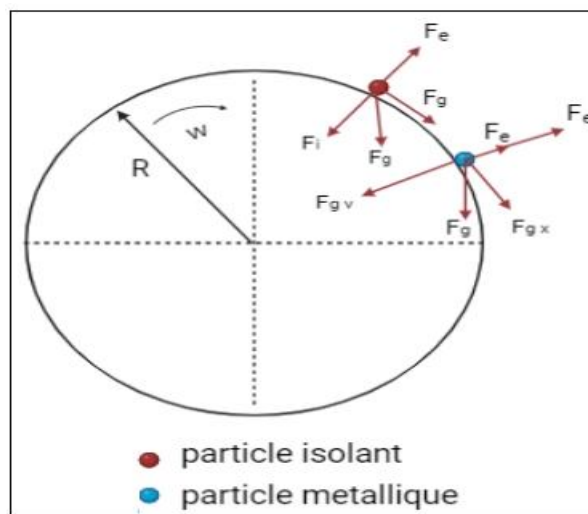
Force d'image électrique:

$F_i = \frac{q^2}{4\pi\epsilon(2d^2)}$ (II-14)

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

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

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



Fig(II-4). Les forces agissant sur le séparateur cylindrique

II-2-3- Le force exercé d'une Séparation par gravite:

Force de gravite: C'est la force d'attraction et est donnée par la relation suivante[31]:

$F_g = m \cdot g$ (II-12)

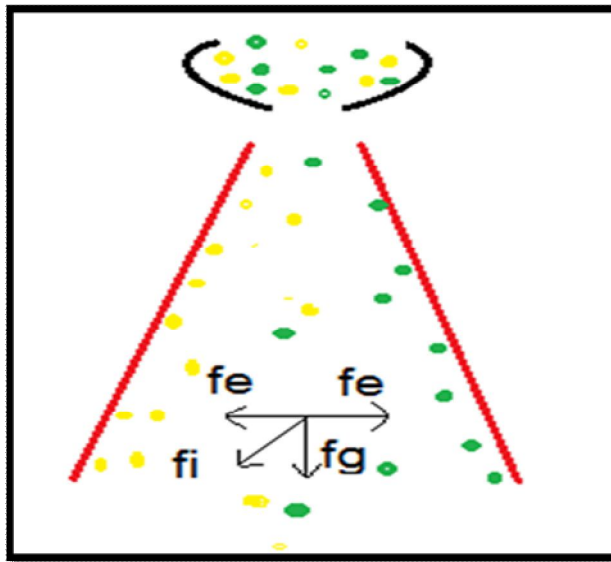
m: masse de particule

R : rayon du cylindre

g: gravitation

Force d'image électrique: $F_i = \frac{q^2}{4\pi\epsilon(2d^2)}$ (II-14)

Force du champ électrostatique: $F_e = q \cdot \text{ind} \cdot E$ (II-13)

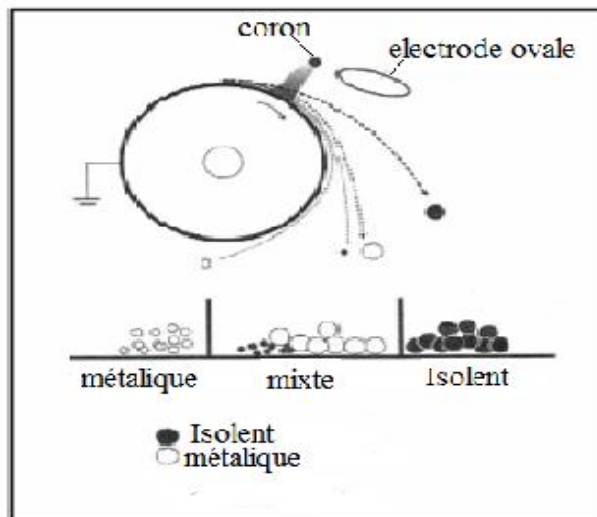


Fig(II-5)- Les forces agissant sur le séparateur par gravite

II-3- une charge ponctuelle d'une un champ électrostatique:

II-3-1- Séparation électrostatique par cylindre rotative:

Le séparateur électrostatique cylindrique charge le cylindre avec une charge positive, et les électrodes chargées sont appliquées et fortement appliquées negative. Cette haute tension est utilisée pour séparer les molécules ionisation , et ces molécules tombent chacune selon la charge acquise.[45]



Fig(II-6)- Séparation électrostatique par cylindre rotative

II-3-1-1 vecteur de charge de matériaux isolent métallique:

Lorsqu'une charge électrique ponctuelle Q existe dans l'espace, elle crée autour d'elle un champ électrique. En un point M donné dans l'espace, l'expression analytique du champ peut

être donnée par la relation suivante $E = (K \cdot Q) / r^2$, où k est la constante de Coulomb, r est la distance entre la charge Q et le point M , et r est un vecteur unitaire partant de la charge Q et allant vers M . [32]

Le champ électrique se mesure en newtons par coulomb ou en volts par mètre. Les lignes de champ électrique émanent des charges positives et se dirigent vers les charges négatives. [28] Lorsqu'une charge q est placée dans le champ électrique E , elle subit une force électrique décrite par la loi de Coulomb, et cette force peut être exprimée par la relation suivante :

$$F = K (q_1 q_2) / r^2 \quad (\text{II-14})$$

II-3-1-2 vecteur de champ électrostatique \vec{E} :

Les lignes de champ électrostatique sont des lignes droites parallèles entre elles, de même direction, donc le vecteur \vec{E} a la même direction (perpendiculaire à l'armature) et la même direction (de l'armature chargée positivement à l'armature chargée négativement) [33].

$$\vec{E} = Q / (4\pi\sigma_0 r^2) \vec{u} \quad (\text{II-15})$$

II-3-1-3 Projectile de charge d une champ électrostatique:

Le fort mouvement d'un projectile dans un champ électrique est un problème de physique lié à l'étude du mouvement d'une charge partielle sous l'action d'un champ électrique. Nous allons donner une explication simplifiée du mouvement du projectile [34].

Le principe de base:

Lorsque vous mettez une particule chargée de l'expédition de Q dans un champ électrique, cette particule est soumise à une puissance électrique donnée par le Colomb[34]: $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$

Cette force provoque une accélération des particules selon la deuxième loi de Newton: $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$
Où la masse de la particule est l'accélération.

Équation de mouvement $\mathbf{ma} = q\mathbf{E}$ (II-16)

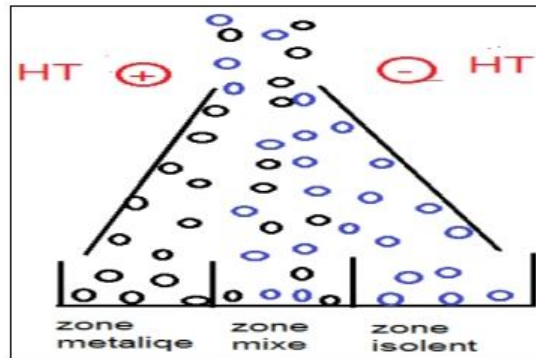
En fusionnant ces deux équations, nous obtenons une équation de mouvement de particules:

$$\mathbf{m} = q\mathbf{E} / \mathbf{a} \quad (\text{II-17})$$

On peut dire que le mouvement de l'accélération du corps lors du lancer est une relation directe avec le champ E .

II-3-2- Séparation électrostatique par gravité:

C'est un processus qui repose sur une haute tension positive et une haute tension négative. Nous jetons les échantillons à séparer et voyons le résultat de la séparation comme indiqué sur la figure :



Fig(II-7)- Séparation électrostatique par gravité

La séparation par un chemin incliné est importante, car le granule séparé est exposé à la résultante d'un groupe de forces, où la force électrique travaille à neutraliser la charge à gauche et à droite au détriment de la nature du signal de charge, et l'angle de projection de la charge dans le champ électrique. Ce facteur est également important dans les processus de chute libre des charges sans parler de l'ensemble d'autres forces qui en résulte Force du champ électrostatique, Force d'image électrique, Force de gravité [45].

II-3-3- Séparation électrostatique par tambour relative:

Des études galactiques montrent que la séparation électrostatique à l'aide d'un tambour rotatif est largement utilisée pour séparer les particules en fonction de leurs propriétés physiques. Divers dispositifs tels que des séparateurs électrostatiques à disque rotatif, des séparateurs à tambour et des trieurs électrostatiques ont été développés pour utiliser les forces électrostatiques pour séparer efficacement les particules. Ces méthodes tirent parti des forces d'adhésion électrique sur les particules métalliques, des forces d'aspiration de l'air sur les particules de plastique et des forces magnétiques pour séparer les objets magnétiques [45].

Panneaux positifs et négatifs pour trier les particules par polarité. De plus, les séparations électrodynamiques offrent l'avantage de la séparation sèche, éliminant le besoin de plusieurs processus énergivores tels que la déshydratation et le séchage supplémentaire, réduisant ainsi les coûts globaux de séparation. De plus, l'efficacité de la séparation électrostatique des granules peut être améliorée [45].

La vitesse de rotation du tambour rotatif est importante car elle nous laisse une marge de changement de vitesse. Cette vitesse est déterminée en tenant compte de la taille des échantillons à séparer, car elle nous donne une force importante représentée par la force centrifuge.

des granules séparés, sans parler de l'ensemble d'autres forces qui en résulte Force du champ électrostatique, Force d'image électrique, Force de gravité.

CHAPITRE III :

Etudes des éléments energtiques

III.1. Introduction:

L'alimentation électrique est souvent négligée dans la conception des circuits électroniques, mais elle joue un rôle crucial en convertissant une tension d'entrée en une tension plus adaptée pendant le processus d'alimentation. Son importance devient évidente lorsqu'on cherche à tirer le meilleur parti d'une source d'énergie de qualité inférieure, ce qui est fréquent avec la plupart des circuits utilisés dans les appareils électroniques tels que les radios, les ordinateurs, les chargeurs, etc. Certains de ces dispositifs nécessitent une tension élevée, tandis que d'autres nécessitent une tension basse. Les sources d'alimentation nous permettent ainsi d'optimiser l'utilisation de l'énergie électrique et ouvrent la voie à un fonctionnement efficace des appareils électroniques et autres équipements. [35]

Parmi les différentes configurations de transformateurs disponibles dans le domaine de l'électronique aujourd'hui, la topologie flyback se distingue comme l'une des structures les plus répandues en raison de sa simplicité et de son coût modéré. Elle offre également de nombreux avantages pour les applications électroniques modernes. Malgré l'apparition de nouvelles configurations, les transformateurs flyback restent un choix populaire et courant. [35]

III.2. La Conception du FLYBACK :

Circuits d'alimentation pulsée(SMPS):

Ce système est capable d'ajuster la tension selon les exigences spécifiques, ce qui en fait le choix privilégié des concepteurs dans le domaine de l'énergie. Dans cette section, nous avons élaboré un circuit électrique capable de fournir une tension pouvant atteindre 15KV/ 40 KV.

III.2.1. Générateur AC/DC:

Les générateurs AC/DC sont des dispositifs électriques qui transforment un courant alternatif (AC) en un courant continu (DC). Ces convertisseurs AC/DC sont souvent désignés sous le nom de "redresseurs". Ils prennent une tension alternative en entrée et la transforment en une tension continue variable, avant de la stabiliser à travers un filtre pour obtenir une tension continue régulée. [36]

Au cours des dernières années, les alimentations AC/DC sont devenues essentielles dans notre vie quotidienne, en raison de l'évolution de la technologie de l'électronique de puissance. Cette discipline de l'électronique gère et régule le flux d'énergie électrique pour fournir un courant et une tension parfaitement adaptés aux besoins des utilisateurs finaux. De nombreuses applications pratiques dépendent de cette transformation. Les convertisseurs AC/DC sont largement utilisés dans les systèmes de contrôle de processus industriels, les appareils grand public, les équipements de mesure, et bien d'autres encore. [36]

Les équipements de fabrication de semi-conducteurs, les dispositifs médicaux et

les applications de défense sont des domaines où l'innovation est cruciale. Dans le cadre d'une maison intelligente, les appareils électriques utilisent des dispositifs de conversion CA/CC efficaces pour minimiser les pertes d'énergie et générer des économies substantielles.

Dans les paragraphes suivants, nous approfondirons nos connaissances sur les adaptateurs AC/DC, en fournissant des détails précis sur leur fonctionnement et leur importance dans divers contextes.[36]

Le processus de conversion comporte quatre étapes distinctes, à savoir:

• **1^{er} étape Abaisseur de la tension :**

Le courant alternatif adopte une forme périodique, caractérisée par une tension de 220V et une fréquence de 50/60Hz, comme illustré par la:

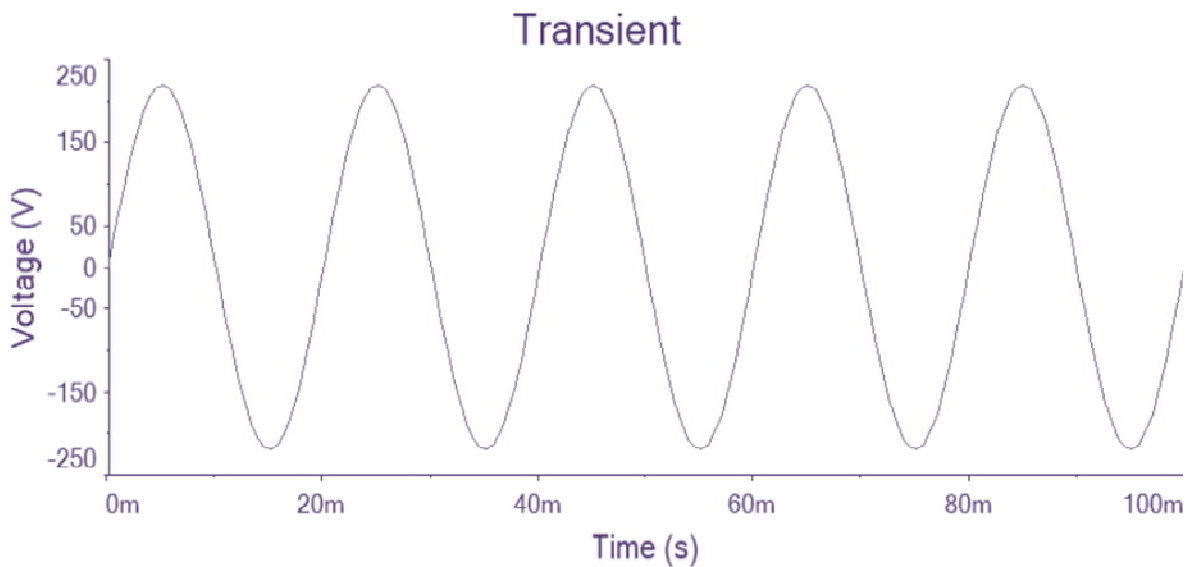


Fig.(III.1) Signal de AC 220V

À l'aide d'un transformateur abaisseur de tension, nous avons réduit la valeur de la tension de 220V à 48V.

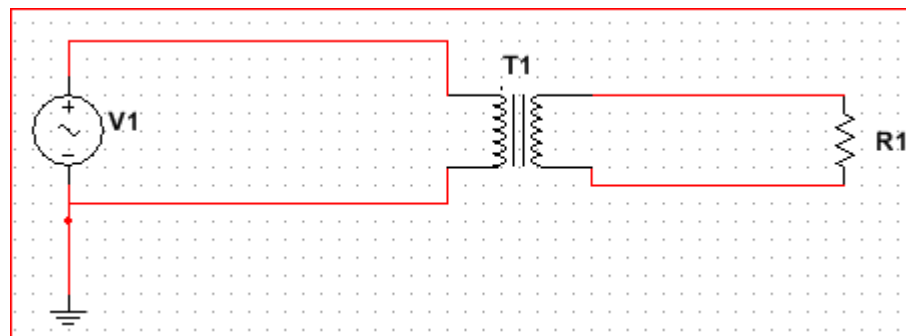


Fig.(III.2) Branchement de Vs avec Transformer

Expliquer le processus de réduction de tension via un transformateur:

Ce processus s'est déroulé de la manière suivante : Le courant alternatif traverse la bobine primaire du transformateur électrique, ce qui engendre la création d'un champ magnétique le long du fil. Ce champ magnétique est transmis à travers le noyau, provoquant ainsi un processus inverse dans la bobine secondaire. Dans cette dernière, le champ magnétique résultant de la bobine primaire traverse le fil, induisant une tension électrique

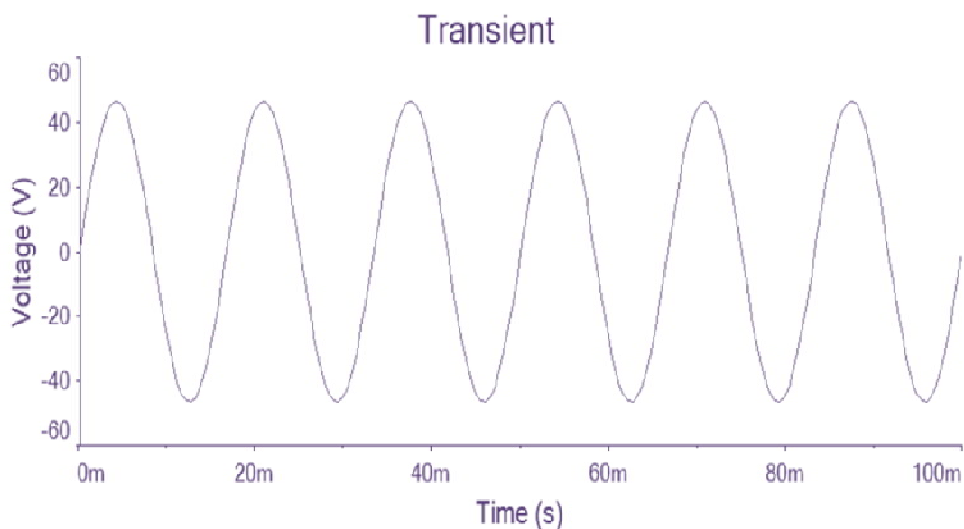


Fig.(III.3) signal AC 48V.

• **2^{ème} étape : C'est redressement pleine onde.**

Diode:

Une diode est un composant électronique qui autorise le passage du courant dans un sens tout en le bloquant dans le sens opposé. Elle se compose de deux bornes : une borne positive (anode) et une borne négative (cathode).

Le type de fusible le plus commun est la diode semi-conductrice. Les diodes semi-conductrices ont un seuil de tension spécifique, appelé chute de tension directe, qui doit être atteint pour permettre le passage du courant dans le sens direct. Lorsque la tension aux bornes de la diode est inférieure à cette chute de tension directe, la diode se trouve dans un état non conducteur et agit comme un circuit ouvert[37]

Les diodes sont utilisées de différentes manières dans les circuits électroniques. Parmi les applications les plus courantes, on trouve:

Rectification :

Les diodes sont fréquemment employées dans les circuits redresseurs pour convertir le courant alternatif (AC) en courant continu (DC) en permettant à celui-ci de circuler dans une seule direction

Les diodes servent à protéger contre les inversions de polarité ou les pics de tension dans les circuits. Par exemple, on peut les utiliser en configuration polarisée inverse pour prévenir les dommages aux composants sensibles causés par la tension inverse.

Régulation de tension :

Les diodes Zener, spécialement conçues avec une tension de claquage spécifique, peuvent servir de régulateurs de tension pour maintenir un niveau stable dans un circuit.

pont de diodes:

Le pont de diodes, également appelé pont en T ou pont de Graetz, est constitué de quatre diodes qui permettent de redresser la tension alternative en sortie, indépendamment de sa polarité d'entrée. Cela signifie qu'il transforme un signal alternatif fluctuant, composé de deux parties négatives et une partie positive, en un signal continu où la polarité est constamment positive. Ce processus est connu sous le nom de redressement [37] .

Après la réduction de tension, nous procédons à un redressement pleine onde en utilisant un pont de diodes. Cette méthode est la plus répandue pour redresser les circuits afin que le courant ne circule que dans un seul sens.

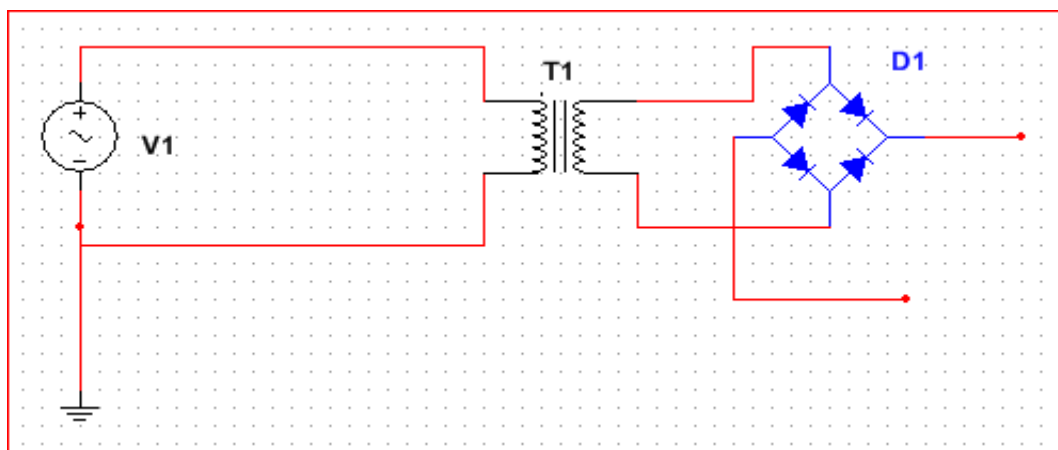


Fig.(III.4) Branchement Vs,T1 avec Pont diod

Dans ce cas, la vanne prend 0.7V de la valeur de Vs, soit:

$$VK = Vs (0.7 * 2) - Vs \tag{III.1}$$

$$VK = 48 * 0.7 * 2 - 48 = 19.2v \tag{III.2}$$

Vk : tension de perte de diode

Vs : tension de source

Autrement dit, la valeur de la tension V+ à la sortie du pont est:

$$V+ = Vs - Vd \tag{III.3}$$

$$V+ = 48 - 19.2 \tag{III.4}$$

$$V+ = 28.8V \tag{III.5}$$

V+ : tension qui sortie a pont diode

Par conséquent, nous avons éliminé les composantes d'ondes négatives, les ramenant à zéro. Suite à cette étape, le courant est désormais unidirectionnel, circulant uniquement dans le sens positif.

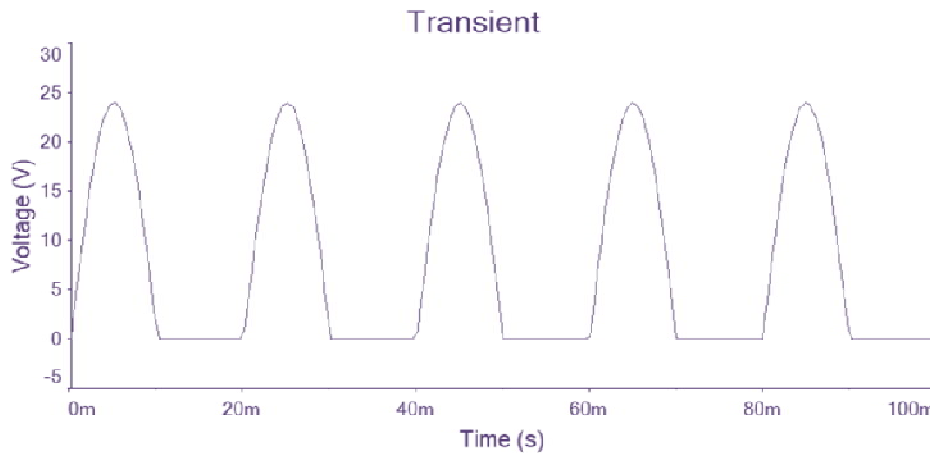


Fig.(III.5). Signal de redressement

•3^{ème} étape : filtrage de la tension rectifiée.

La capacité est un élément constitutif des circuits électriques. Elle représente un dispositif qui emmagasine l'énergie électrique ou la charge électrique sur une période donnée sous forme d'un champ électrique. Elle est généralement composée de deux plaques conductrices, chacune portant une charge électrique d'amplitude égale mais de signe opposé. [38]

Au fil du temps, la charge électrique se dissipe ou s'épuise. Les deux panneaux sont isolés l'un de l'autre par un matériau isolant, tel que l'air. Lorsqu'un condensateur C1 est intégré à un circuit électrique, il peut décharger temporairement la charge qui y est stockée, puis être rechargé. [38]

Lors de la connexion du condensateur $C1 = 1\mu F$ à la sortie du pont comme indiqué sur la figure:

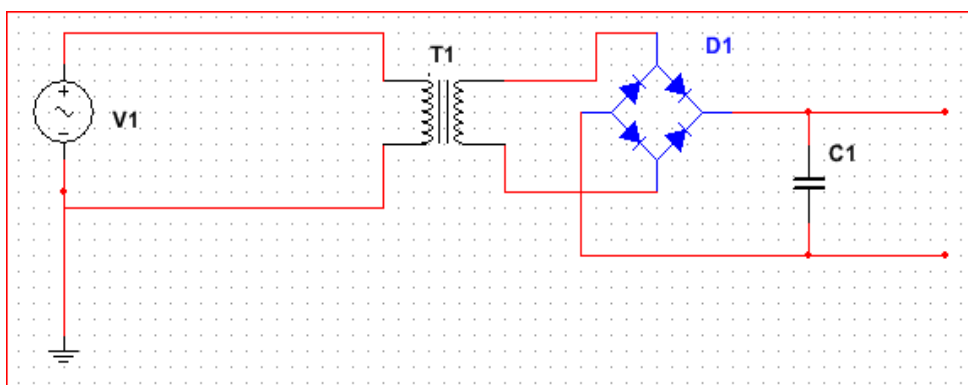


Fig.(III.6) Branchement avec C1

les ondes de courant s'améliorent, car la valeur du courant n'atteint pas zéro comme indiqué dans la forme

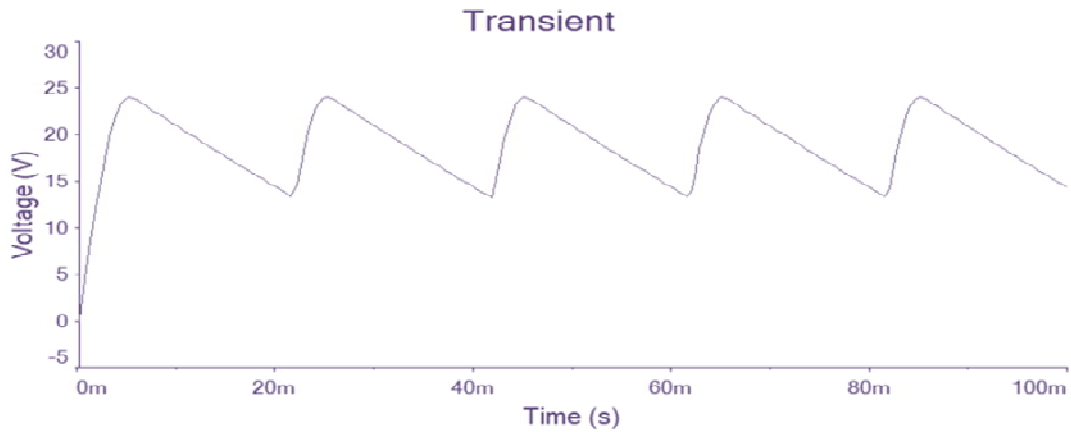


Fig.(III.7) Signal de filtrage

Cependant, le signal de courant reste toujours oscillant. Pour stabiliser le courant, nous connectons le circuit à un régulateur de tension de type LM7812, fournissant un courant constant de 12V. Ainsi, notre circuit convertit efficacement les 220V alternatifs en 12V continus, comme illustré dans la figure suivante

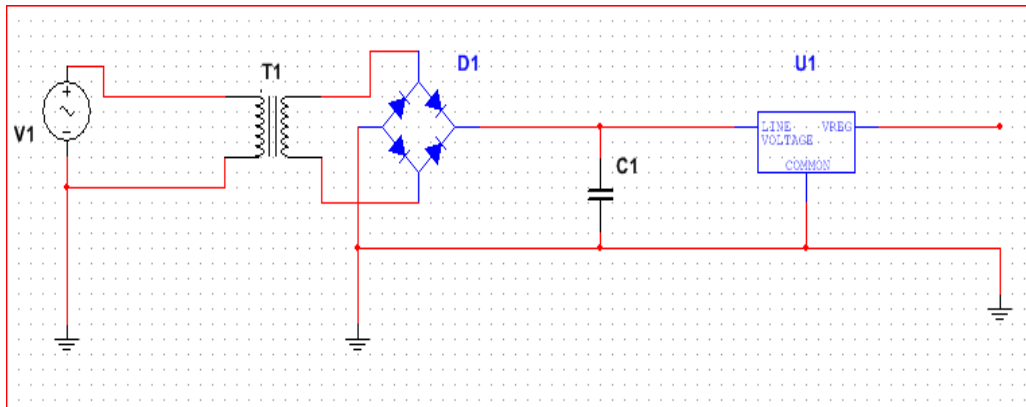
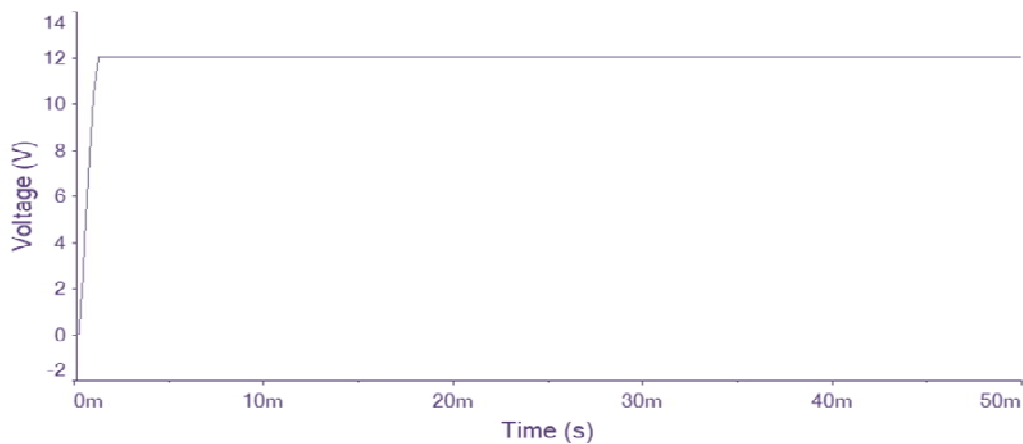


Fig.(III.8) AC-DC CONVERTRE

Après avoir branché le régulateur de tension, on obtient un courant continu de 12V



Fig(III.9) Signal DC 12V

III.2.2.Générateur du pulse :

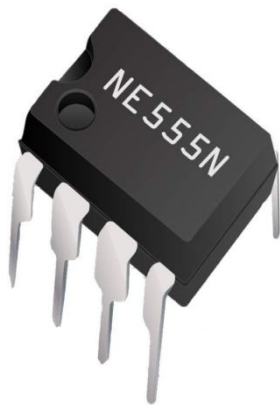
Le générateur d'impulsions, souvent désigné sous le nom de générateur de pulse, est un dispositif électronique employé pour engendrer des impulsions électriques ayant une forme spécifique, comme des impulsions rectangulaires ou des impulsions de durée ajustable. [39]

Oscillateur 555 (timer 555) :

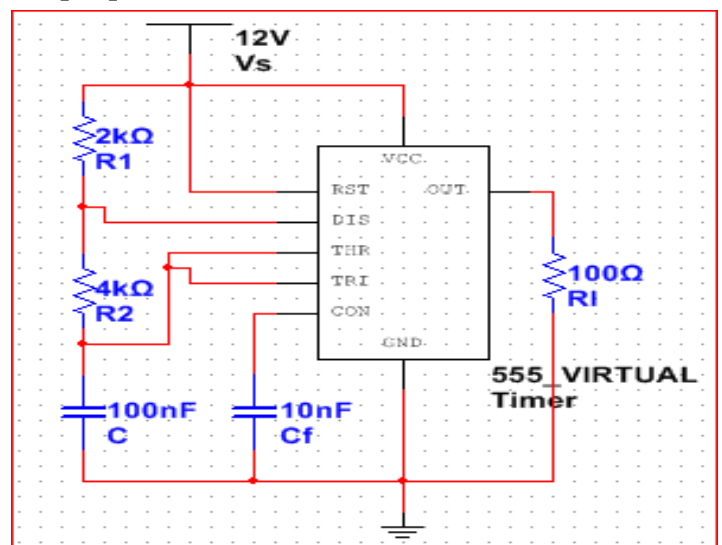
Le circuit de minuterie intégré ou minuterie 555 est connu comme un circuit intégré simple qui peut être utilisé de différentes manières comme élément de commande dans de nombreux circuits électroniques. Il comporte huit bornes qui peuvent être identifiées grâce à la fiche technique du manuel d'utilisation(Datasheet) [40].

Il existe de nombreux types de temporisateurs, dont les plus connus sont le NE555 et le SE555, Ils sont largement utilisés dans les circuits PWM en raison de leurs nombreuses caractéristiques

- La fréquence de fonctionnement maximale atteint jusqu'à 500 kHz
- Max Voltage Input 18V
- Le temps est de plusieurs micro à plusieurs heures
- Il peut être utilisé comme une Monostable, Bistable ou Astable
- La valeur d'un courant allant jusqu'à 200 mA. [41]



Fig(III-10) – Timer NE555



Fig(III-11)- circuit Timer NE555

Nous alimentons les minuteries (Timer 555) avec une tension continue de 12 V avec:

$$R1=2K\Omega ; R2=4K\Omega ; R3=100\Omega ; C2=100nF ; Cf=10nF$$

Ton : C'est le temps pendant lequel le courant passe, et il est contrôlé par R1 et R2 avec la relation suivante :

$$T_{on}=0.693(R1+R2)C2 \quad (III.6)$$

Toff : C'est le temps pendant lequel aucun courant ne passe, et il est contrôlé par R2 avec la relation suivante:

$$T_{off}=0.693.R2.C2 \quad (III.7)$$

Duty cycle : Elle exprime la valeur moyenne de la tension résultant du cisaillement et est donnée par la relation :

$$D=\%T_{on}/ (T_{on}+T_{off}) \quad (III.8)$$

$$D=100 \times (2+4)/(2+2 \times 4) \quad (III.9)$$

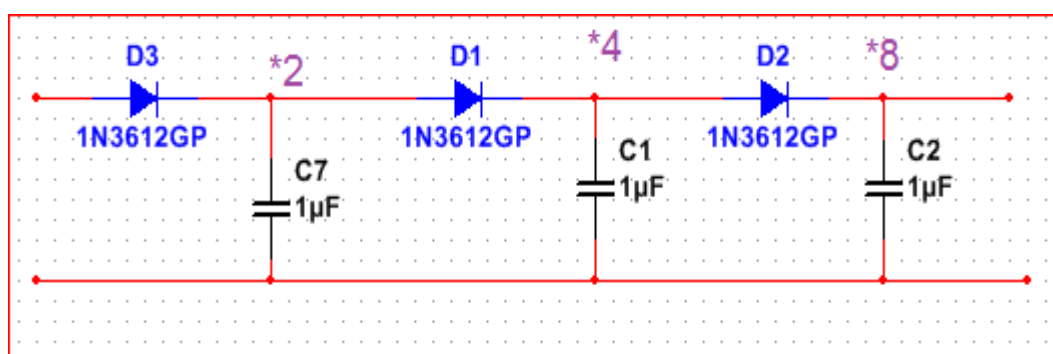
$$D=60\%$$

L'équation de fréquence est donnée par la relation suivante :

$$f=1/T=1.44/(R1+2R2)C1 \quad f=14.4KHz \quad (III.10)$$

Multiplication de tension:

Il s'agit d'un pont composé d'une diode et d'un condensateur qui double la tension de sortie du transformateur. Par exemple, si la tension de sortie est de 2, elle devient 4, comme le montre la figure :



Fig(III-12)- circuit de Multiplication de tension

Pulse Width Modulation(PWM):

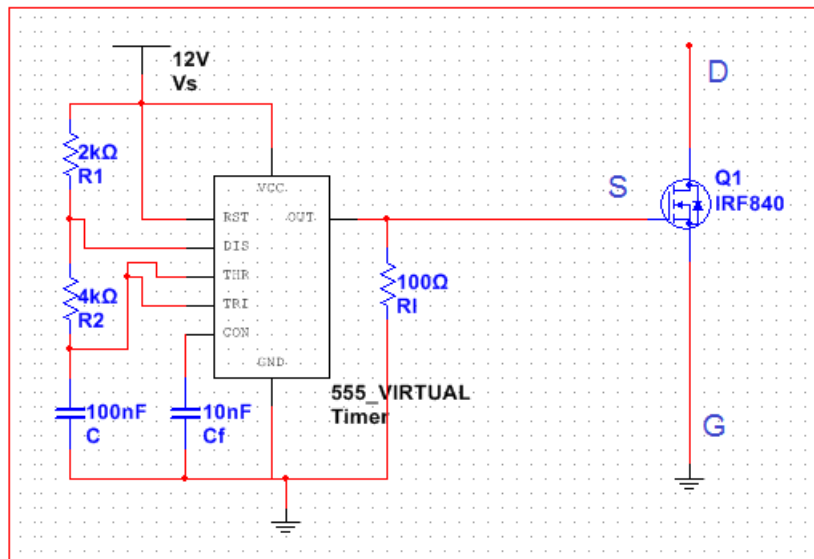
C'est une méthode employée pour réguler la valeur moyenne d'un signal en ajustant la durée de ses impulsions. Cette technique est largement appliquée dans divers domaines, notamment l'électronique de puissance, la commande de moteurs et les systèmes de communication. [42]

Le principe fondamental du PWM réside dans la génération d'un signal en forme d'onde carrée à fréquence fixe, où la largeur ou la durée de la partie haute (ON) de l'onde, appelée rapport cyclique, est ajustée. Le rapport cyclique représente le rapport entre le temps de fonctionnement et la période totale de l'onde. [42]

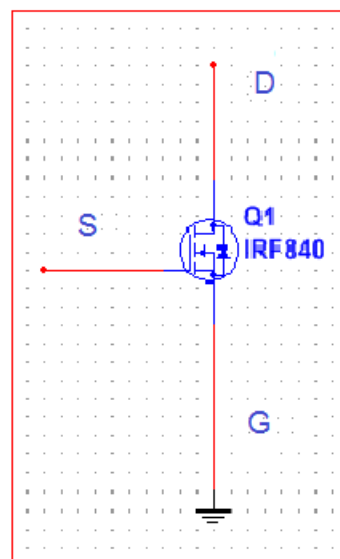
Branchement Command de Porte (Gate Drive) et Coté Base (Low Side):

Command de Porte (Gâte Drive) : Il est destiné a connecter le porte S de MOSFET au générateur d'impulsions afin de contrôler la synchronisation de son travail la figure(III-13)

Coté Base (Low side) : Il destiné a connecter le porte S de MOSFET a la terre la figure(III-14)



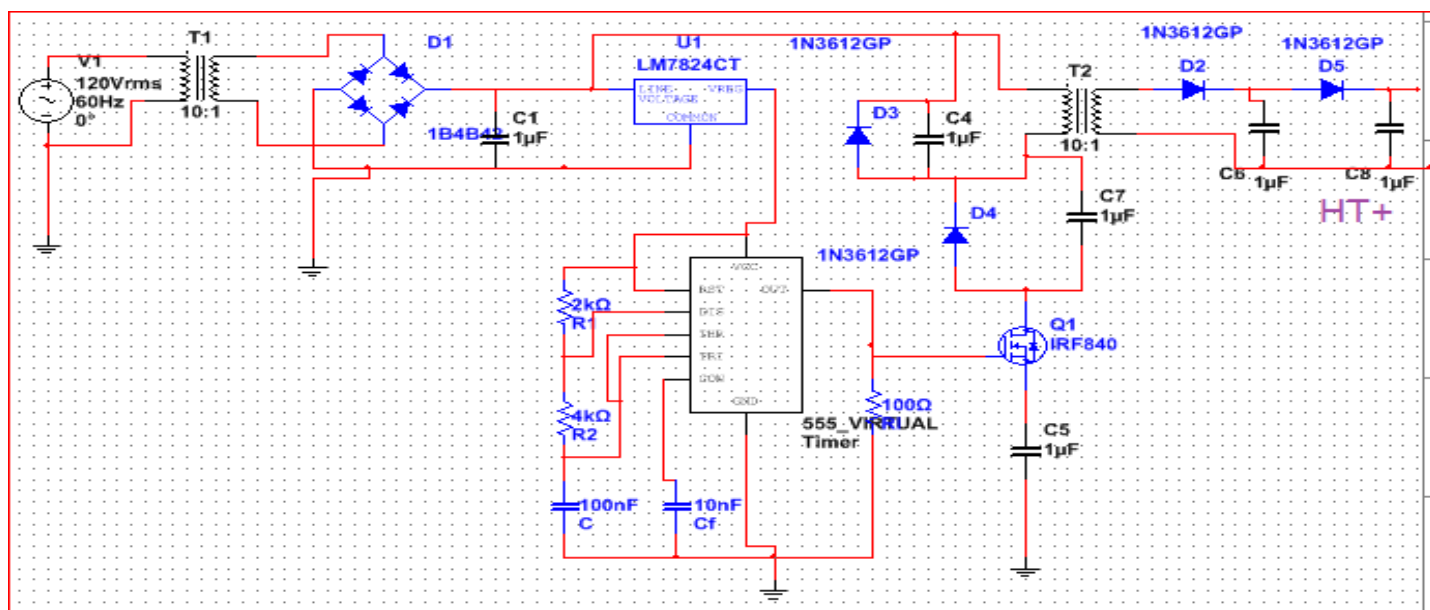
Fig(III-13) – Gate Drive



Fig(III-14)- Low Side

-près avoir préparé les circuits entourant le flyback(Gate Drive- fig(III-13)), AC-DC CONVERTRE-fig(III-14)), on connecte la borne G du MOSFET à la masse et la borne S au générateur d'impulsions variable comme indiqué sur les deux figures.

-Nous connectons la partie supérieure de la bobine primaire du flyback à l'alimentation 28,8 V obtenue du convertisseur AC/DC, et quant à la partie inférieure, nous la connectons à l'extrémité de la perceuse MOSFET comme indiqué ci-dessous:



Fig(III-15) - Circuit Convertisseur de flashback

III.2.3. Convertisseur de flashback(Flayback Converter) :

Le courant I_p interrompu traverse l'enroulement primaire du transformateur, ce qui entraîne un flux magnétique estimé à:

$$H=N.I_p \quad (III.11)$$

H : Flux magnétique.

N : Nombre des tours de la première bobine.

I_p : le courant qui traverse sur la première bobine.

Ce dernier conduit à la génération d'un champ électrique dans la bobine secondaire avec un nombre de spires élevé et le rayon du fil est très petit, ce qui rend la haute tension, ce qui s'exprime par l'équation[43]:

$$N_2/N_1=V_0/V_s.\left(\frac{1-D}{D}\right) \quad (III.12)$$

V_0 = tension de sortie

V_s = tension de source

Nous calculons la valeur du courant qui passe dans l'aimant qui concerne le transformateur en utilisant la loi[43]:

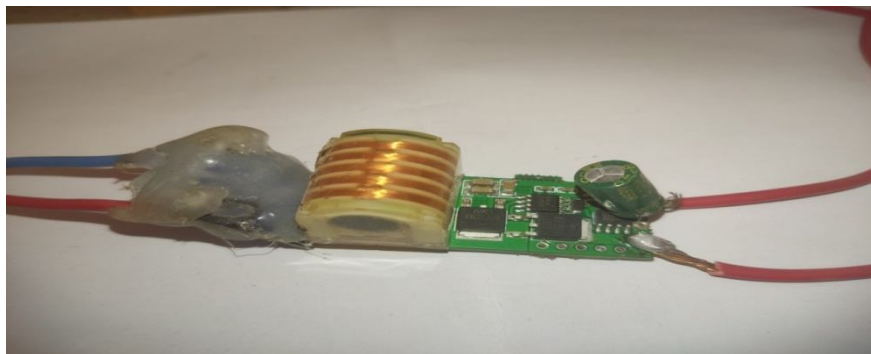
$$I_m= I_0/(1-D) N_2/N_1 \quad (III.13)$$

III.2.4.Générateurs haute tension:

Nous vous mentionnons quelques générateurs de tension qui permettent d'obtenir de la haute tension en sortie:

III.2.4.1.Le générateur de tension continue à haute tension(1 kV à 20 kV):

Le simulateur était basé sur un générateur de tension continue variable à fort courant et à polarisation négative [-HT], qui permet d'ajuster l'intensité électrique(1 kV à 20 kV)[45]



Fig(III-16) - Image de Le générateur de tension continue à haute tension (1 kV à 20kV)

III.2.4.2.Le générateur de tension continue à haute tension(1 kV à 10 kV):

La simulation reposait sur un générateur de tension directement variable avec un flux élevé et un biais négatif [-HT], permettant d'ajuster la densité électrique (10 kV à 1 kV).[45]

Ce générateur est caractérisé par plusieurs propriétés, notamment:

- Tension de entrée:(100V-250V)AC ,(50Hz).
- Tension de sortie:(1kv-10KV)DC.

- Faible courant de sortie:(0mA-5mA).
- maximum d'énergie:50W.



Fig(III-16) - Image de Le générateur de tension continue à haute tension (1 kV à 10kV)

CHAPITRE VI :

***Études résultats
et discussions***

VI-1- Introduction:

Dans ce chapitre, une étude expérimentale a été menée sur des échantillons de déchets constitués d'un ensemble de matériaux métalliques et plastiques de forme sphérique. Plusieurs expériences ont été réalisées pour tester le frottement des matériaux plastiques et métalliques, y compris le frottement par air, le frottement par contact avec l'air et le frottement par vibration [44].

Dans cette section, nous avons étudié le processus de séparation en utilisant un générateur de tension continue à haute intensité variable.

Nous avons également effectué des expériences en lançant des matériaux plastiques et métalliques dans le but d'étudier leur mouvement à l'intérieur du séparateur, chaque matériau étant testé séparément:(Aluminium-Pet),(Pet-Métal),(Métal- PET blanc(LDPE)- PET (HDPE) noir), ,(PET blanc(LDPE)- PET (HDPE) noir),(Aluminium- Métal).[44]

VI-2-Travail Expérimental :

Dans notre travail expérimental, nous avons étudié et testé différents mécanismes de chargement. Nous avons testé le lancement de charges variées provenant de ressources plastiques et métalliques de manière double métal-plastique d'un seul type et une variété de métal-plastique de deux types différents, en utilisant plusieurs mécanismes de chargement.

VI-2- 1-MatrierExpérimental :

VI-2- 1-1- Les matériaux variés des déchets :

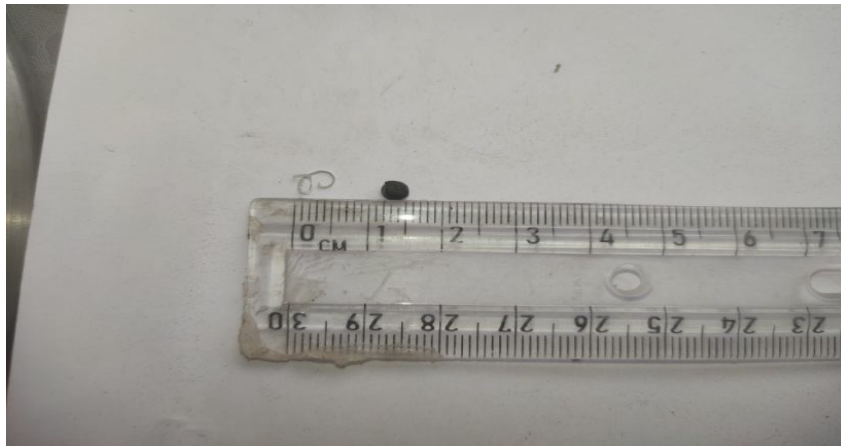
Les matériaux métalliques : Deux échantillons différents de métal, aluminium et fer, ont été prélevés, 50 g de chaque type sous forme semi-sphérique (cylindrique) avec des dimensions de 3 mm de déchets de fabrication et de tailles presque égales.



Fig(VI-1)- Échantillons de fer

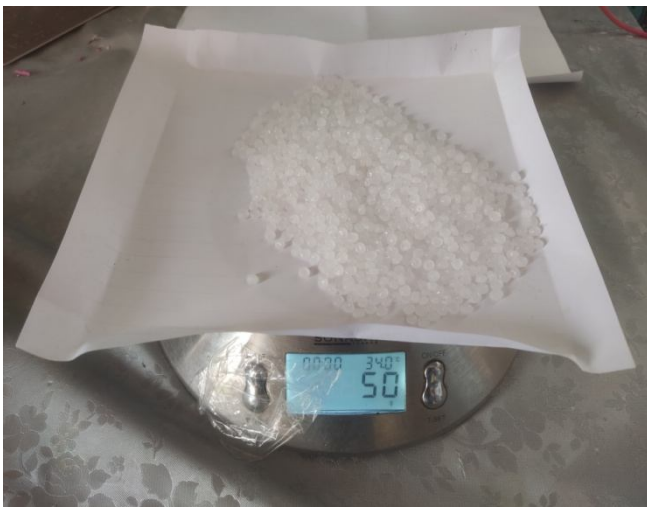


Fig(VI -2)- Échantillons d'aluminium



Fig(VI -3)- représentation des longueurs et des échantillons métalliques

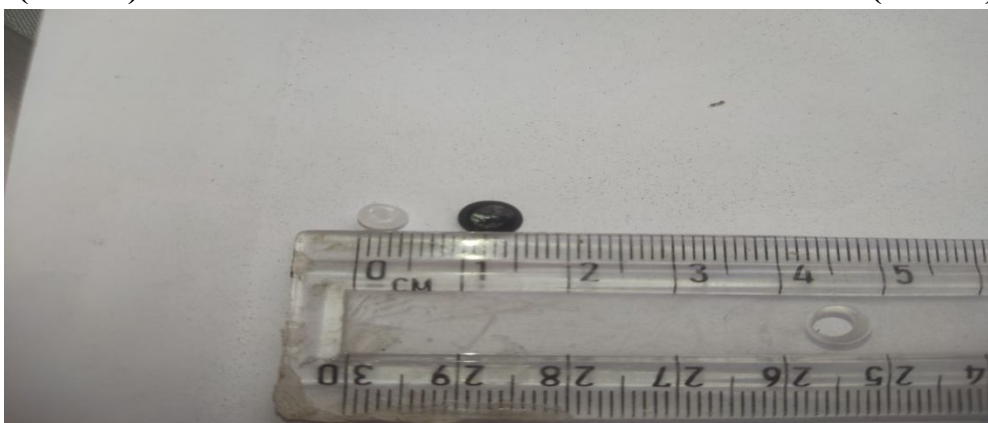
Les matériaux plastiques : Des échantillons de matériaux plastiques PET (HDPE) noir et de matériaux (LDPE) blanc ont été prélevés sous forme sphérique avec des dimensions de 4mm.



Fig(VI -4)- échantillons de plastique blanc(LDPE)



Fig(VI -5)- échantillons de plastique noir (HDPE)

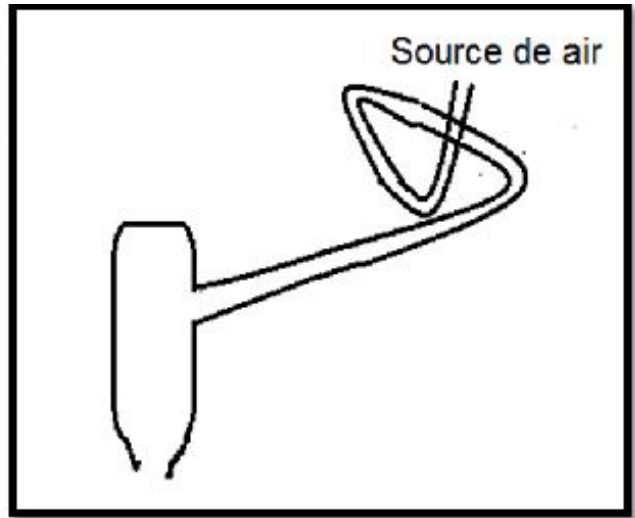


Fig(VI -6)- représentation des longueurs et des échantillons plastiques

VI- 2-2-Les dispositifs utilisés :

Dispositifs de chargement :

1. **Air Triboélectrique** : Ils utilisent le processus de frottement pour les matériaux transportés à travers les tubes, où l'utilisation des échantillons sur la face interne du tube génère une charge de surface sur les échantillons plastiques et métalliques[46].

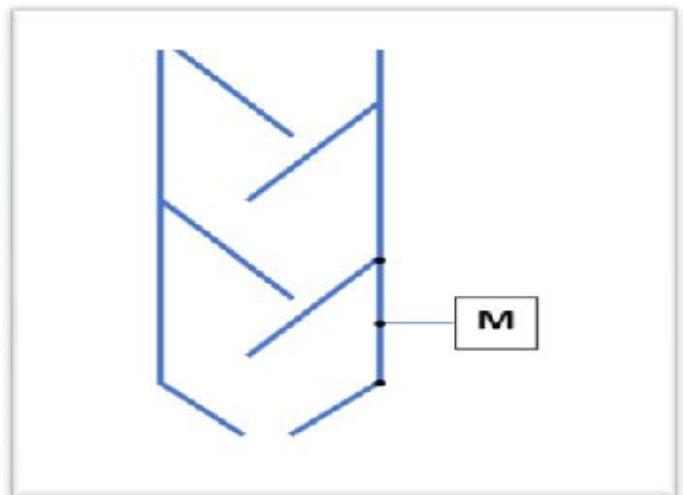


Fig(VI -7)- Image réelle de Air Triboélectrique

Fig(VI -8)- image dessinée de Air Triboélectrique

2. **Triboélectrique** : Il utilise un mélangeur rotatif où les échantillons entrent en collision avec la surface rotative, cette dernière utilisant les échantillons pour générer une charge de surface sur eux[43].

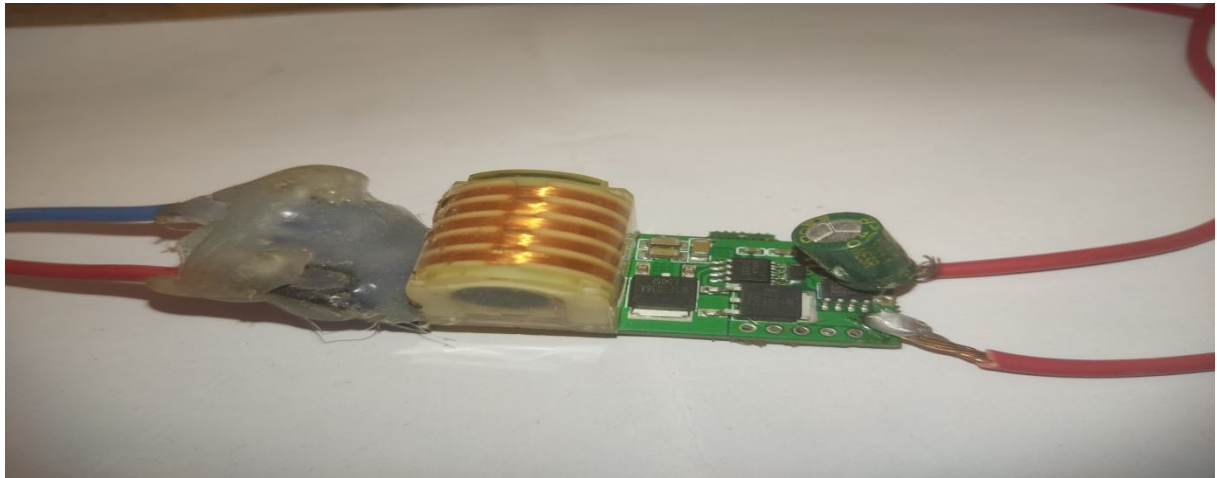
3. **Le chargement par vibration** :Le processus de vibration deséchantillons est considéré comme une source de leur chargement, car le saut des échantillons sur la piste génère une charge de surface.[48]



Fig(VI -9)- Image réelle de Le chargement par vibration

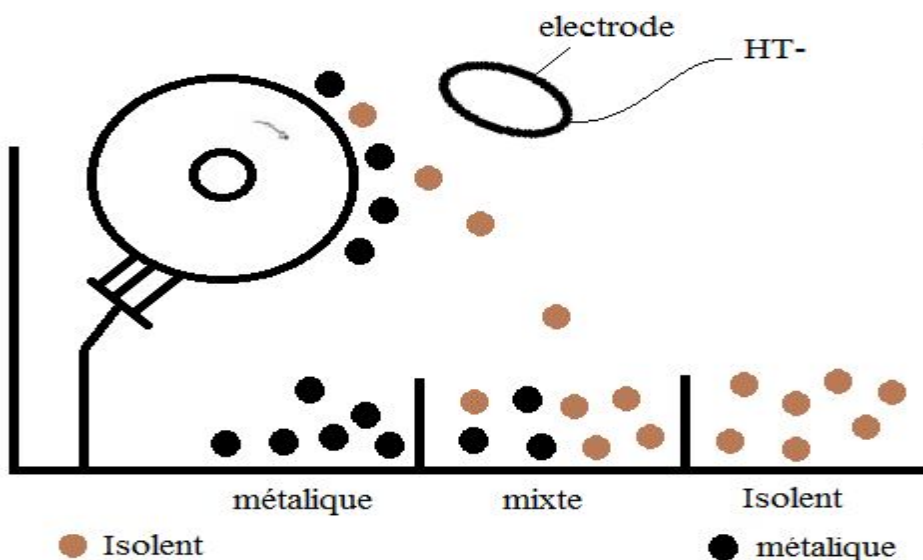
Fig(VI -10)- Image dessinée de Le chargemet Par Vibration

4. **Le générateur de tension continue à haute tension** :L'étude expérimentale s'est appuyée sur un générateur de tension continue à haute intensité variable avec une polarisation négative [-HT], permettant de modifier l'intensité électrique (1 kV à 20 kV).



Fig(VI -11)- Image réelle de Le générateur de tension continue à haute tension

Le séparateur électrique à cylindre rotatif :Notre étude s'est appuyée sur la séparation à l'aide d'un dispositif de séparation à cylindre rotatif à différentes vitesses (60 tr/min, 50 tr/min, 40 tr/min). Des études antérieures ont prouvé l'efficacité de ce processus de séparation utilisant un cylindre rotatif, nous avons donc utilisé un cylindre de diamètre 300 cm avec une surface en aluminium.



Fig(VI -12)- Image dessinée de séparateur électrostatique à cylindre rotatif

Nous avons également utilisé différentes formes d'électrodes, y compris des électrodes cylindriques, elliptiques et filiformes.



Fig(VI -13)- électrode cylindrique



Fig(VI -14)- électrode ovale

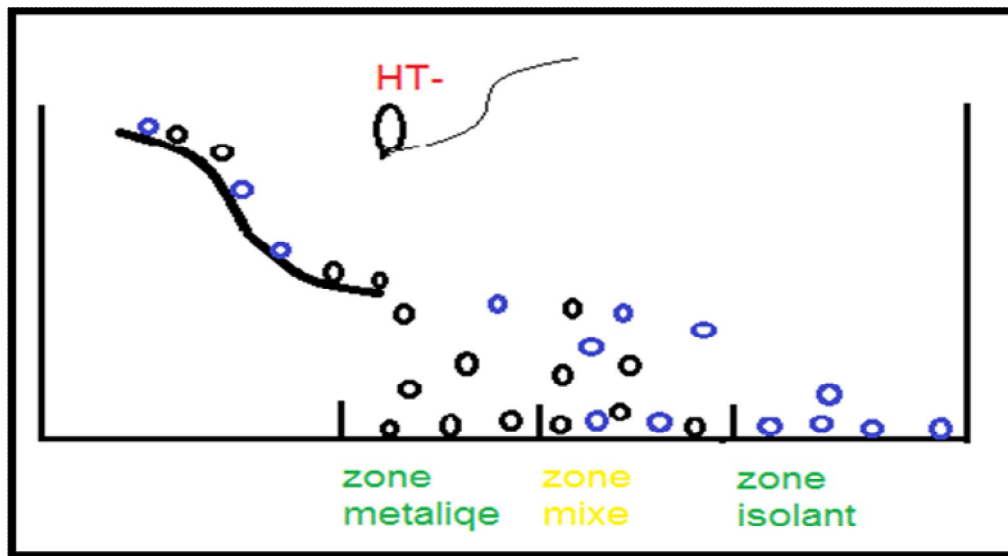


Fig(VI -15)- électrode file

Le séparateur à glissement : Dans notre travail expérimental, nous avons utilisé un séparateur à glissement avec un angle d'inclinaison de 30 degrés. La forme de l'électrode utilisée pour charger le curseur a été modifiée avec des dimensions spatiales (longueur cm* largeur cm).



Fig(VI -16)- Image réelle de séparateur électrostatique à glissement



Fig(VI -17)- Image dessinée de séparateur électrostatique à glissement

VI-3. Résultats expérimentaux :

VI-3.1. Les résultats expérimentaux du séparateur électrostatique de Tambour rotative:

Expérience 1: séparation d'Alim et PET

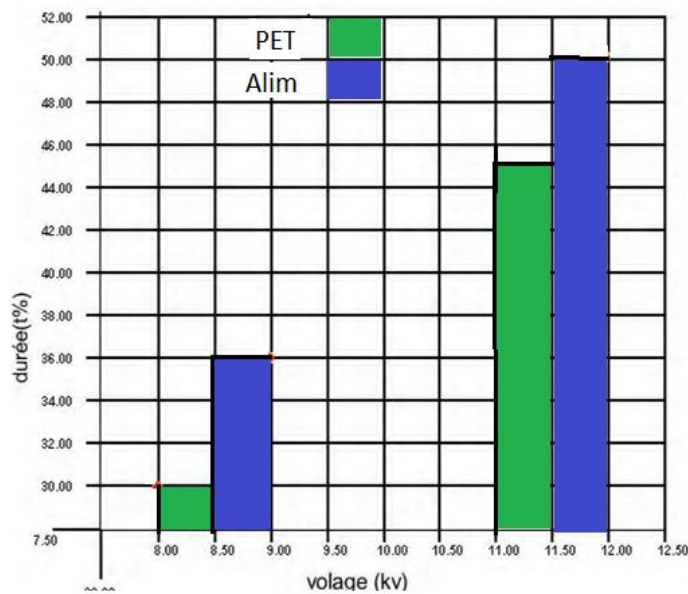
L'étude expérimentale a utilisé le séparateur à tambour rotatif, où la vitesse de rotation a été fixée à 50 tours par minute. Cinquante grammes de chaque type de matériau ont été prélevés, et les matériaux ont été chargés par frottement aérien avec l'Airo Triboélectrique. L'impact de l'intensité du champ électrique a été étudié sous une différence de tension de (8 kV - 12 kV) dans le processus de séparation des matériaux plastiques et métalliques.



Fig(VI -18)- photo du résultat de la séparation d'alim et de PET blanc(LDPE)



Fig(VI -19)-Photo d'échantillons de séparation d'alim et de PET blanc(LDPE)



Fig(VI -20)- Colonnes graphiques montrant les pourcentages de séparation entre Alim et le PET à différents voltage

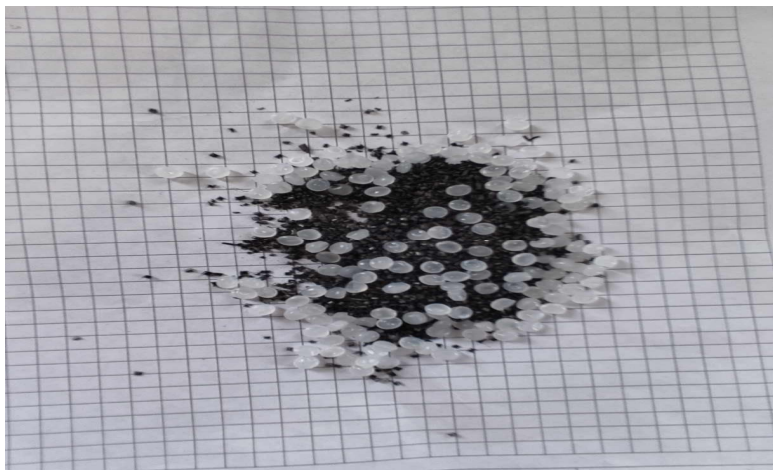
Les résultats expérimentaux ont montré l'impact de l'intensité du champ appliqué sur l'électrode sur le processus de séparation. Les résultats ont démontré l'efficacité d'un changement dans l'intensité du champ [50], avec une distinction dans la séparation entre les deux intensités (8 kV - 12 kV). Ainsi, plus l'intensité du champ augmentait, plus les résultats expérimentaux étaient distincts.

Expérience 2: Séparation du métal-plastique

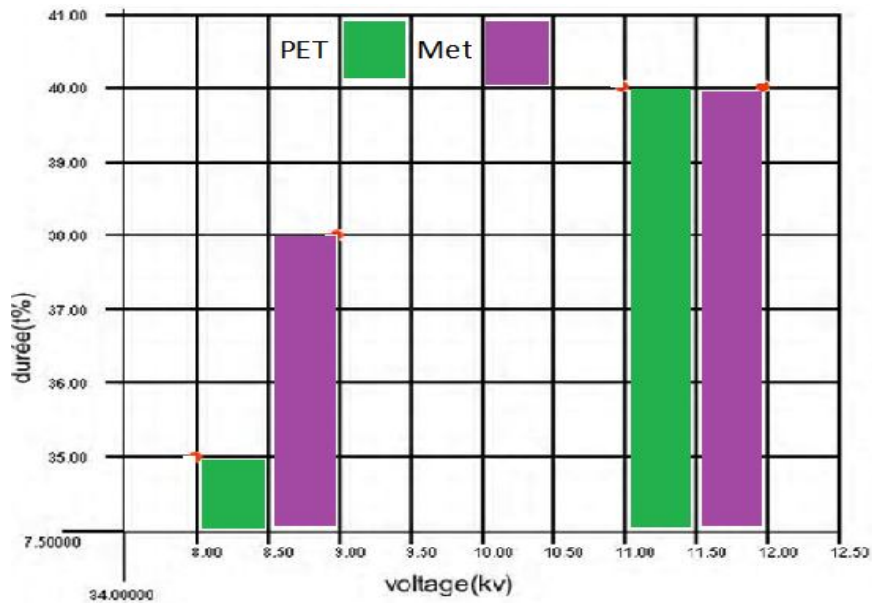
L'étude du processus de séparation avec le séparateur à tambour rotatif a été menée, avec la vitesse de rotation de 50 tours par minute fixée. Le processus de séparation du métal et du plastique a dépendu de la variation de l'intensité du champ électrique appliqué sur l'électrode pour un échantillon de 50 g de matériau plastique [51] (PET), avec une variation du courant appliqué dans le processus de séparation (8 kV - 12 kV) [49].



Fig(VI -21)- photo du résultat de la séparation du métal et de PET blanc(LDPE)



Fig(VI -22)-Photo d'échantillons de séparation du métal et de PET blanc(LDPE)



Fig(VI -23)- Colonnes graphiques montrant les pourcentages de séparation entre du Met et le PET à différents voltage

Les résultats expérimentaux ont montré une différenciation des résultats, où plus l'intensité du courant appliqué entre l'électrode et le cylindre rotatif était élevée, plus la différenciation des résultats augmentait [50].

VI-3.2. Les résultats expérimentaux du séparateur électrostatique à glissement gravitationnel:

Notre étude a été basée sur la modification de la forme de l'électrode utilisée, testée sur une gamme de matériaux en(metal- plastique)(aluminium-plastique)

Expérience 1: La forme cylindrique de l'électrode

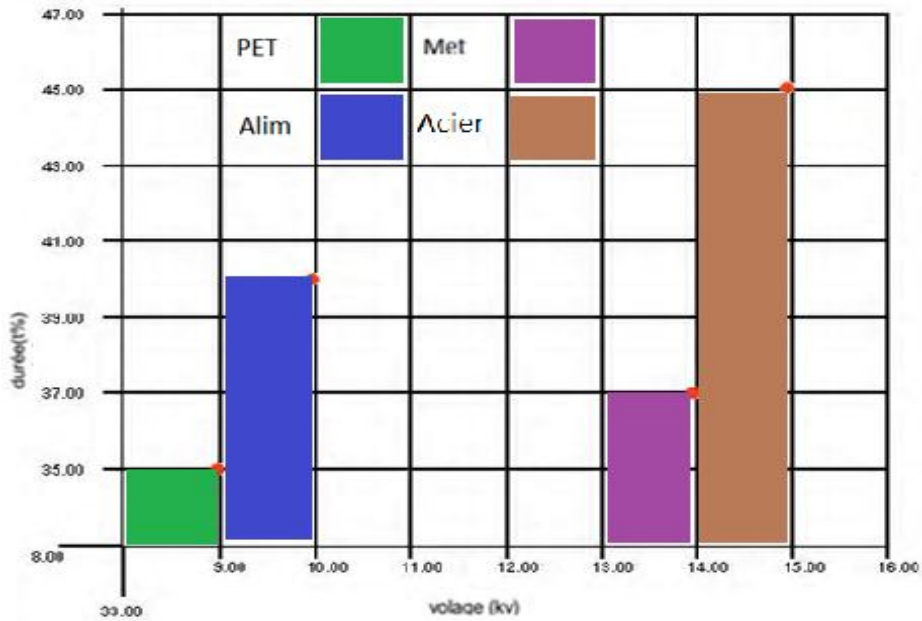
Cette expérience a étudié l'impact de la forme de l'électrode sur le processus de séparation, en utilisant une intensité de courant de (10KV-15 kV). Dans le processus de séparation en utilisant 50 g de plastique et 50 g d'aluminium avec un diamètre sphérique de 3mm.



Fig(VI -24)- image du résultat de la classe utilisant électrode cylindrique



Fig(VI -14)- électrode cylindrique

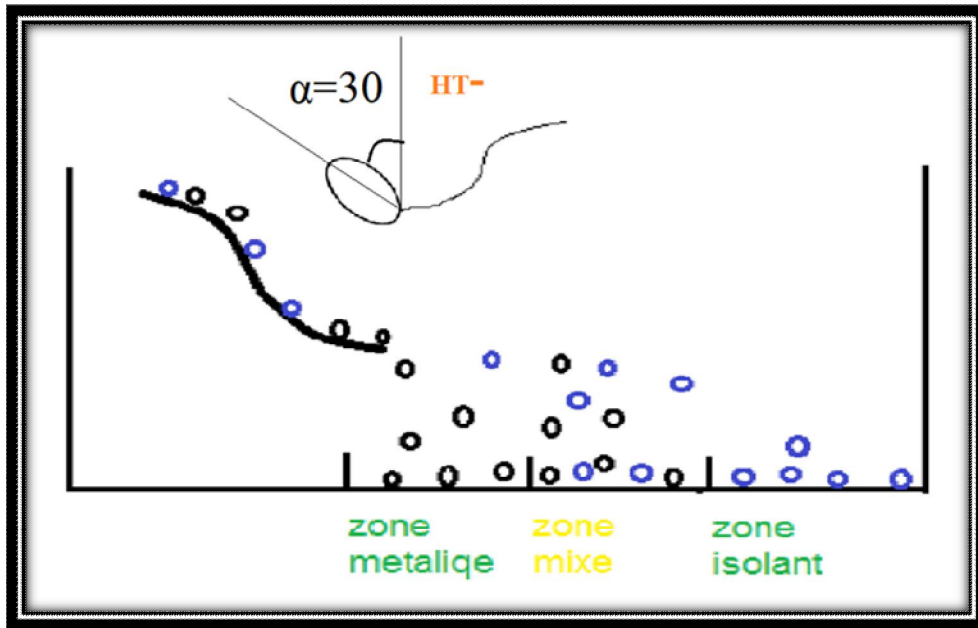


Fig(VI -25)- Colonnes graphiques montrant les pourcentages de séparation entre du Met et le Acire , entre deAlim et PET à différents voltage

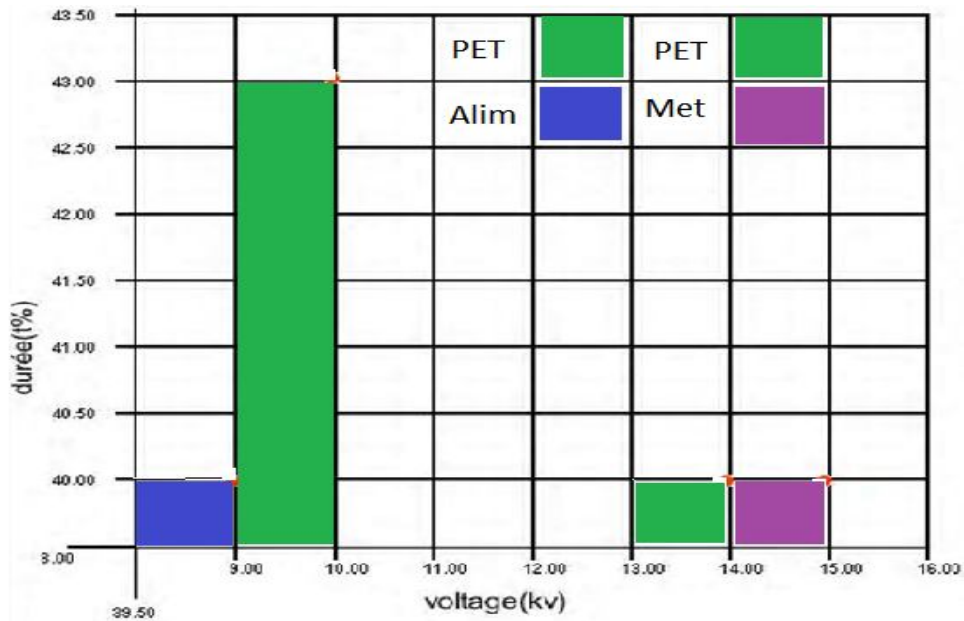
Les résultats expérimentaux ont montré l'impact de l'intensité du voltage appliqué sur l'électrode sur le processus de séparation. Les résultats ont démontré l'efficacité d'un changement dans l'intensité du champ, avec une distinction dans la séparation entre les deux intensités (10 kV - 15 kV). Ainsi, plus l'intensité du voltage augmentait, plus les résultats expérimentaux étaient distincts.

Expérience 2: La forme ovale de l'électrode

La forme ovale de l'électrode a été modifiée en une forme ovale avec un angle de courbure de 30°, avec une tension de courant négative élevée (10KV-15 kV).



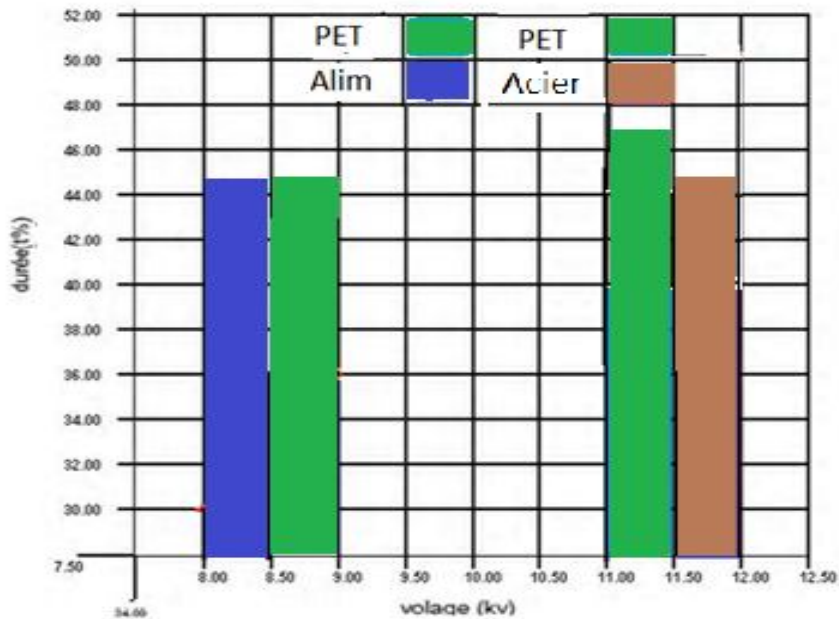
Fig(VI -26)- image représentant le changement d'angle de l'électrode



Fig(VI -27)- Colonnes graphiques montrant les pourcentages de séparation entre du Met et le PET , entre deAlim et PET à différents voltage.

Les résultats expérimentaux ont confirmé l'efficacité de l'utilisation de l'électrode de forme ovale avec un angle de courbure de 30 degrés, montrant une efficacité remarquable sur la valeur donnée dans le processus de séparation en utilisant le cylindre, cela est attribué à la courbure optimale de l'électrode [51].

Expérience 3: La forme File de l'électrode



Fig(VI-28)- Colonnes graphiques montrant les pourcentages de séparation entre du PET et le Acire, entre de Alim et PET à différent voltage

L'étude expérimentale a montré que l'utilisation d'un rayon de courbure du fil plus petit était efficace dans la séparation, similaire aux autres formes d'électrodes utilisées dans l'expérience,

en raison de plusieurs caractéristiques:

L'utilisation d'un courant élevé à polarité négative est attribuée à la libération des électrons autour du fil et à leur utilisation avec les atomes neutres (reutre d'atomes), créant ainsi un paquet électronique qui capture les électrodes électriquement neutres plutôt que de gagner des électrons, ces ions se positionnent autour du chemin sous forme d'ions négatifs.

L'utilisation de la polarité négative du courant électrique pour induire les éléments naturels présents dans l'air (N, O₂, CO₂), où ces gaz sont chargés négativement, donc l'application de la polarité négative est plus efficace.

L'étude a démontré que la nature, la forme et la taille des matériaux jouent un rôle important dans le processus de séparation, ainsi que la polarité de la tension élevée appliquée, et a également prouvé que le changement de forme de l'électrode a un impact significatif sur le processus de séparation, car ce dernier est affecté par le processus de chargement du cylindre et du curseur utilisés dans le processus de séparation.

conclusion et perspective

Conclusion générale :

L'étude expérimentale s'est appuyée sur l'analyse des résultats concrets du processus de séparation, permettant de déduire plusieurs variables qui jouent un rôle crucial dans ce processus.

La nature des matériaux utilisés dans la séparation est un facteur clé, leur charge variant en fonction de leur composition . La forme des matériaux utilisés, en particulier une forme sphérique, affecte l'efficacité du processus de séparation.

La méthode de chargement utilisant l'Airo Triboélectrique est considérée comme la meilleure méthode, car les résultats expérimentaux ont montré des différences significatives dans les résultats de séparation par rapport aux autres méthodes de chargement telles que la charge par vibration.

La forme de l'électrode joue également un rôle crucial dans le processus de séparation. L'étude expérimentale a montré que le rayon de courbure de l'électrode influence considérablement le processus de séparation, avec une efficacité accrue lors de l'utilisation d'électrodes sous forme de cylindre ou de fil.

Le processus de séparation des matériaux dépend de l'intensité du courant appliqué, de la forme des échantillons utilisés (sphériques) ainsi que de la forme de l'électrode utilisée.

L'étude expérimentale des différents types de séparateurs électrostatiques a démontré l'efficacité du processus de séparation, avec un taux de séparation compris entre [90% - 80%]. Malgré certaines erreurs dans la conception des séparateurs, le processus de séparation avec cette machine est considéré comme facile à mettre en œuvre avec d'excellents résultats .

Perspective:

Grâce à notre étude sur les procédés de séparation électrostatique, nous voyons qu'à l'avenir nous pouvons développer l'utilisation de procédés de séparation, par exemple, nous pouvons séparer le plastique selon la couleur, chaque couleur séparément, et tout cela dépend de la bonne exploitation des machines de séparation électrostatique.

Références bibliographiques

- [01] : J. M. Crowley, Fundamentals of Applied Electrostatics. New York:Wiley, 1986.
- [02]: L. Brands, P. M. Beier, and I. Stahl, “Electrostatic separation,” in Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry. Weinheim, Germany:Wiley-VCH Verlag, 2001.
- [03] : <https://www.conservation-nature.fr/ecologie>
- [04] : K. Haga, “Applications of the electrostatic separation technique,” in Handbook of Electrostatic Processes, J. S. Chang, A. J. Kelly, and J. M. Crowley, Eds. New York: Marcel Dekker, 1995.
- [05] : I. I. Inculet and G. S. E. Castle, “Tribo-electrification of commercial plastics in air,” in Proc. 8th Int. Conf. Electrostat., Oxford, U.K., 1991, pp. 217–222, Inst. Phys. Conf. Series No. 118.
- [06] : ZhenMing Xu, Jia Li, HongZhou Lu, and Jiang Wu, “Dynamics of conductive and nonconductive particles under high-voltage electrostatic coupling fields”, Sci China Ser E-Tech Sci, vol.52, pp.2359-2366, 2009.
- [07]: Logan, S., McCarty., George, M., Whitesides. (2008). Electrostatic Charging Due to Separation of Ions at Interfaces: Contact Electrification of Ionic Electrets. *Angewandte Chemie*, 47(12):2188-2207. doi: 10.1002/ANIE.200701812.
- [08]:Henriq ue, Pacini., Jennifer, Golbeck. (2020). Trade in Scrap Materials: Looking Beyond Plastics. doi: 10.20944/PREPRINTS202010.0044.V1
- [09]:SMGO 5 janvier 2023 Le Secrétaire-Messager du Général à l'occasion de la Journée internationale de la déclaration.
- [10]:A. V. Shenoy and D. R. Saini (1996), Thermoplastic Melt Rheology and Processing, Marcel Dekker Inc., New York. أبريل 14 نسخة محفوظة
- [11]: https://www.thermoplasticcoating.com/ar/what-is-thermoplastics/#Structural_Classification
- [12]: Bourekba-Marwa/2019/10 univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads
- [13]: Yang, Jiangchuan., Zhou, Zunchao., Li, Bo., Luo, Xianqun., Yang, Haiqiang., Wang, Kunlu. (2020). Material barrel residue scraping device for foamed plastic production.
- [14]: Yang, Jiangchuan., Zhou, Zunchao., Li, Bo., Luo, Xianqun., Yang, Haiqiang., Wang, Kunlu. (2020). Material barrel residue scraping device for foamed plastic production.
- [15]: Tu, Xiaoling. (2019). Material barrel waste material scraping device used for foamed

- plastic production. Tu, Xiaoling. (2019). Material barrel waste material scraping device used for foamed plastic production.
- [16]:Peng, Jiapin., Lan, Meng., Xu, Haitao. (2020). Plastic coil crushing-scraping decoiling feeding mechanism and feeding method thereof.
- [17]:Li, Shijin. (2020). Scraping plate mechanism for coating adhesive on plate material.
- [18]:Djaballah Abdelfattah 05/2022 unive-el oued memoir Réalisation d'un séparateur électrostatique de matière isolante-métallique orienté vers les déchets.
- [19]:Jia Li, Guiqing Wu, Zhenming Xu Tribo-charging properties of waste plastic granules in process of tribo-electrostatic separation [Waste Management 35 \(2015\) 36–41](#)
- [20]: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.
- [21]:MAAMMAR Mohamed Thèse Modélisation et optimisation des séparateurs électrostatiques : multifonctionnel et à tambour UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES Février 2022
- [22]: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.
- [23]:jia ali [Volume 35](#), January 2015, Pages 36-41 Tribo-charging properties of waste plastic granules in process of tribo-electrostatic separation
- [24]:Imed-Eddine, Achouri., Thami, Zeghloul., Karim, Medles., Gontran, Richard., Lucien, Dascalescu. (2020). Factors Influencing the Triboelectric Charging of Granular Plastics in a Rotating-cylinder-type Tribocharger. doi: 10.1088/1757-899X/724/1/012048
- [25]:Patel, K., & Gupta, R. (2017). "Comparative analysis of electrostatic separation methods for recycling electronic waste." Waste Management & Research, 8(1), 82-96.
- [26]:G. Richard, « Étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires », Thèse de doctorat, Université de poitiers, Poitiers, 2018.
- [27]:https://physique.cegeptr.qc.ca/webnyb/module_4.pdf

[28]:<https://www.youtube.com/watch>

[29]:https://www.youtube.com/watch?v=fmngyztEURc&ab_channel=Imene_school

[30]:- Khaouani A., "Etude et réalisation d'un électro-séparateur de particules granuleuses isolant-métal", Mémoire de magister à l'université de Sidi Bel Abbes, Algérie (1997).

[31]:Peter, L., Strauss. (2016). Review Essay: Christopher Columbus Langdell and the Public Law Curriculum. *Journal of Legal Education*, 66(1):157.

[32]:Roberto, Salazar., Camilo, Bayona-Roa., Diego, Jaramillo. (2022). Electric vector potential and the Biot-Savart like law in electrostatics *Revista de la Academia Colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales*, 46(181):939-946. doi: 10.18257/raccefyn.1671

[33]: <https://chatgpt.com/?oai-dm=1>

[34]:Power Marilyn Wolf, in *Embedded System Interfacing*, 2019

[35]:<https://www.mornsun-power.com/html/news-detail/blogposts/404.html#:~:text=AC%20FDC%20converters%20are%20electrical,obtain%20an%20unregulated%20DC%20voltage>

[36]:<https://www.youtube.com/watch?v=4wwOIJVxID8&t=932s>

[37]: <https://lewebpedagogique.com/estechno/files/2016/02/La-diode.pdf>

[38]:<https://chat.openai.com/>

[39]: <http://materiel-physique.ens>

[lyon.fr/Notices/P45.9_G%C3%A9n%C3%A9rateur%20de%20Pulses%20PM5715%20\(1Hz-50%20MHz\)_PHILIPPS.pdf](http://materiel-physique.ens/lyon.fr/Notices/P45.9_G%C3%A9n%C3%A9rateur%20de%20Pulses%20PM5715%20(1Hz-50%20MHz)_PHILIPPS.pdf)

[40]: <https://www.alldatasheet.fr/datasheet-pdf/pdf/17972/PHILIPS/NE555.html>

[41]:<https://chat.openai.com/>

[42]:https://www.youtube.com/watch?v=G2tEp-YuCQ8&t=119s&ab_channel=AdiCloud

[43]:L. Dascalescu, "Electrostatic separation of plastics from industrial wastes. A review," *J. Electrostat. Jpn.*, vol. 25, pp. 282–288, 2001.

[44]:Samir, Zelmat., Amar, Tilmatine. (2023). Electrostatic separation process of metal/plastic granular mixtures using a horizontal rotating disk. *Particulate Science and Technology*, 1-9. doi: 10.1080/02726351.2023.2201920

- [45]: C.L. Wadhwa , High Voltage Engineering, New Delhi, India : New Age International, 2007.
- des matériaux poudreux”, Thèse de Doctorat en électrotechnique, Université de Sidi-BelAbbes, 2017.
- [46]: Blajan M. “Séparation de la muscovite des pegmatites feldspathiques en utilisant des champs électriques intenses”, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers 2006
- [47]:M. Sarkis and A. Masumoto, «Electrostatic separation of chopped waste electric cables.»
Journal of Environmental Engineering, Vol. 2, pp. 227-236, 2007.
- [48]: NADJEM Abdelkader, « Etude et exploitation des charges électriques dans les procédés électrostatiques », Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2018.
- [49]:A. Iuga, R. Morar, A. Samuila, and L. Dascalescu, “Electrostatic separation of metals and plastics from granular industrial wastes,”
Proc. Inst. Elect. Eng.—Sci. Meas. Technol., vol. 148, no. 2, pp. 47–54, Mar. 2001.
- [50]: A. Tilmatine, S. Flazi, K. Medles, Y. Ramdani, and L. Dascalescu, “Séparation électrostatique: Complément des procédés mécaniques de recyclage des déchets industriels,” J. Electrostat., vol. 61, no. 1, pp. 21–30, May 2004.