



DÉPARTEMENT DE MAINTENANCE EN ELECTROMÉCANIQUE

MÉMOIRE :

Pour l'obtention du diplôme de Master

FILIÈRE : Electromécanique

SPÉCIALITÉ : Electromécanique Industrielle

THÈME :

**Étude expérimentale d'un séparateur électrostatique
du mélange granulaire (métal/isolant)
(recyclage des téléviseurs à tube cathodique)**

❖ PRÉSENTÉ PAR :

- Gasmi Mohamed EL Amine
- Habbi Mohamed

❖ DEVANT LE JURY COMPOSÉ DE :

Nom et prénom	Grade	Qualité
Dr. BACHIR BOUIADJRA BACHIR	MAB	Président
Dr. LABAIR Hakima	MCB	Jury
Dr. MIMOUNI Chahinez	MCB	Encadreuse

2021/2022

REMERCIEMENTS





الحمد لله الذي أعانني بالعلم وزينني بالحلم وأكرمني بالتقوى وجملني بالعافية، فإني أتوجه إليه سبحانه وتعالى أولاً وأخراً بجميع ألوان الحمد و الشكر على فضله وكرمه الذي غمرنا بيه فوقتنا إلى ما نحن فيه.

إلى رمز العطاء وصدق الإيلاء ، إلى نروة العطف والوفاء، لك أجمل حواء ، أنت أُمي الغالية أطال الله عمرك
الذرع الواقي والكنز الباقي ، إلى من جعل العلم منبع إشتياقي، لك أقدم وسام الإستحقاق أبي أطال الله في عمرك.
إلى من هم إنطلاقة الماضي ، عون الحاضر ، سند المستقبل ، الذين لا عيش بدونهم ولا متعة إلا برفقتهم. أخويا أطال
الله في عمرهما.

إلى اليد اليمنى، و ضلع ثابت لا يميل ، وقطعة من الأم تورد لك الحياة. أختي الغالية أطال الله عمرك.
إلى جميع أقاربي الذين يكنون لي الحب والاحترام كبيرهم وصغيرهم ، إلى كل من وقف بقربي حتى أصل إلى ما أنا
عليه الآن.

إلى رمز الصداقة وحسن العلاقة زملاء الدراسة.

إلى جميع زملاء والأصدقاء.

إلى كل من عرفته من قريب أو بعيد.

إلى من رفعوا رايات العلم والتعليم ، أساتذتي الأفاضل.

إلى كل من سقط سهوا من قلبي ولم يسقط من قلبي.

يا ربي لاتدعني أصيب بالغرور إذا نجحت ولا باليأس إذا فشلت بل ذكرني أن الفشل هو التجربة التي تسبق النجاح أمين
يارب العالمين.

MOHAMED HABBI (BOKHARI)





First of all, I would like to thank **ALLAH** the merciful for given me knowledge of science, courage, patience and for having guided my steps towards the path of knowledge

I dedicate this work To my parents who have provided me with their encouragement, love and understanding, God bless them now and forever.

To the beloved **FATIMA ZAHRAA** and **ISHAK** You have always been my source of courage , Although you are not with me anymore you will always live as angles in my heart .

To my best friend my Life-long companion **ALAA EDDINE GARADI** thank you for all the support and your presence throw hard times.

To my brothers and my sister for their whole-hearted support and love .

To all my friends and my colleagues thank you for all your support.

I would like to express my infinite gratitude and respect

To my supervisor **MRS. MIMOUNI CHAHINEZ** for her constant help, precious suggestions and valuable advices.

I am also grateful to all my teachers without whom this work would not have been possible.

To all my extended family.

To all those who have been supportive, caring and patient, I dedicate this simple work.

Thank you all for you help.

MOHAMED EL AMINE GASMI .



Résumé :

Un rideau électrique à ondes mobiles est généralement utilisé pour déplacer des particules micronisées non conductrices provenant des cartes électroniques des téléviseurs à tube cathodique dans le but de récupérer quelque métal tel que le cuivre, le fer L'objectif de ce travail est d'analyser les phénomènes observés sur les convoyeurs à rideau électrique, qui consiste à appliquer une force d'attraction sur les particules métalliques en particulier. Deux convoyeurs ont été utilisés, un biphasé et un autre triphasé alimentés par des amplificateurs de haute tension. La force d'attraction appliquée par un convoyeur triphasé est plus grande que celle appliquée par un convoyeur biphasé. En revanche cette force dépend de plusieurs facteurs tels que l'amplitude, la fréquence et le déphasage de la tension appliquée. Un convoyeur à double face alimenté par un transformateur de haute tension à point milieu, de fréquence 50 Hz. Les résultats obtenus ont révélé, d'une part, l'existence d'une force d'attraction qui dépend principalement de l'amplitude de la tension appliquée et, d'autre part, la faisabilité de la séparation des particules métalliques/plastiques.

المخلص :

ستخدم الستارة الكهربائية ذات الموجة المتحركة بشكل عام لتحريك الجسيمات الدقيقة غير الموصلة لاستعادة الألواح الإلكترونية من تلفزيونات أنبوب أشعة الكاثود بهدف استعادة بعض المعادن مثل الحديد و النحاس.... . الهدف من هذا العمل هو تحليل الظواهر التي لوحظت على ناقلات الستارة الكهربائية ، والتي تتمثل في تطبيق قوة جاذبة على الجزيئات المعدنية على وجه الخصوص. تم استخدام ناقلان ، أحدهما ثنائي الطور والآخر ثلاثي الأطوار يعملان بمضخمات الجهد العالي. تكون قوة الجذب المطبقة بواسطة ناقل ثلاثي الطور أكبر من تلك المطبقة بواسطة ناقل ذي مرحلتين. من ناحية أخرى ، تعتمد هذه القوة على عدة عوامل مثل السعة والتردد وانزياح الطور للجهد المطبق. ناقل مزدوج الوجه يعمل بمحول عالي الجهد بتردد 50 هرتز. أظهرت النتائج من جهة وجود قوة جذب تعتمد بشكل أساسي على اتساع الجهد المطبق و من ناحية أخرى ، جدوى فصل الجزيئات المعدنية / البلاستيكية

Abstract :

A moving wave electric curtain is generally used to move non-conductive micronized particles from the circuit boards of CRT televisions for the purpose of recovering some metal such as copper, iron.... . The objective of this work is to analyze the phenomena observed on the electric curtain conveyors, which consists in applying an attractive force on the metallic particles in particular. Two conveyors were used, one two-phase and another three-phase powered by high voltage amplifiers. The force of attraction applied by a three-phase conveyor is greater than that applied by a two-phase conveyor. On the other hand, this force depends on several factors such as the amplitude, the frequency and the phase shift of the applied voltage. A double-sided conveyor powered by a mid-point high-voltage transformer, with a frequency of 50 Hz. The results obtained revealed, on the one hand, the existence of an attraction force which mainly depends on the amplitude of the voltage applied and, on the other hand, the feasibility of the separation of metal/plastic particles



Tables des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Etat de l'art	
1.2. Charge électrique	3
1.3. La charge électrostatique par effet couronne	4
1.3.1. Mécanisme d'une décharge couronne à polarité négative	5
1.3.2. Induction électrostatique	7
1.2.1. Physique de la force d'image	8
1.4. Séparateur électrostatique métal-plastique	9
1.4.1. Constituants du séparateur	10
1.4.1.1. Vibro-transporteur	10
1.4.1.2. Différents types de l'électrode couronne	11
1.4.1.3. Electrode statique	11
1.4.1.4. Electrode cylindrique	12
1.4.1.5 Collecteur	13
1.4.2. Principe de fonctionnement d'un séparateur électrostatique métal /plastique	14
1.4.2.1. Charge par effet couronne des isolants granulaires	14
1.4.2.2. Charge par induction électrostatique des granulaires conductrices	14
1.4.2.3. Différents procédés de séparation électrostatique métal-plastique	14
1.5. Décharges à barrière diélectrique (DBD)	15
1.6. Ondes mobiles	17
1.6.1. Propagation de l'onde	17
1.6.2. Principe des convoyeurs à ondes mobiles	18
1.6.3. Applications de la technique des ondes mobiles	20
1.7. Forces agissant sur les particules	21

Sommaire

1.7.1. Équation du mouvement	22
1.7.2. Forces électrostatiques	22
A. Force de Coulomb	22
B. Force d'image	23
1.7.3. Force gravitationnelle	24
1.7.4. Forces d'adhérence ou de collage	24
A. Force capillaire	24
B. Force de Van Der Waals	25
1.7.5. Force diélectrophorétique	26
A. Diélectrophorèse (DEP)	26
B. Force diélectrophorétique	27
C. Propriétés de la dielectrophorèse	27
1.8. Conclusion	28

Chapitre 2 : Matériels utilisés et techniques de mesure

2.1. Introduction	29
2.2. Circuit imprimé	29
2.3. Classifications des circuits imprimés	30
2.3.1. Nombre de couches	30
2.3.2. fabrication industrielle	31
2.4. Matériels utilisés et préparation d'échantillons	33
2.4.1. Balance	33
2.4.2. Amplificateur haute tension	33
2.4.3. Générateur de fonction	34
2.4.4. Oscilloscope à mémoire	35
2.4.5. Transformateur HT à point milieu	35

Sommaire

2.4.6. Broyeur	36
2.4.7. Tamiseur	36
2.5. Mélange utilisé dans les essais expérimentaux	37
2.6. Les rideaux électriques	37
2.6.1. Convoyeur biphasé	38
2.6.2. Convoyeur triphasé	38
2.7. Conclusion	39

Chapitre 3 : Étude expérimentale avec le convoyeur biphasé

3.1. Introduction	40
3.2. Convoyeur utilisé	40
3.3. Mélange utilisé	41
3.4. Procédure expérimentale	41
3.5. Résultats obtenus et discussion	41
3.5.1. Application d'une tension alternative carrée	42
3.5.2. Description du dispositif expérimental	43
3.6. Influence des facteurs sur la séparation des particules métal/plastique	44
3.6.1. Influence Amplitude du signal haute tension	44
3.6.2. Influence de la fréquence du signal haute tension	46
3.6.3. Influence du déphasage de la tension	47
3.6.4. Influence de la distance inter-électrodes	49
3.7. Conclusion	51

Chapitre IV : Étude expérimentale avec le convoyeur triphasé

4.1. Introduction	52
4.2. Convoyeur triphasé	52
4.3. Mélange utilisé	54

Sommaire

4.4. Procédure expérimentale	55
4.5. Types des collisions sur un convoyeur à ondes mobiles	56
4.5.1. Collision des particules de même matière	56
4.5.2. Collision des particules de matières différentes	57
4.5.3. Collision entre les particules et le film isolant du convoyeur	57
4.5.4. Charge électrique	58
4.5.5. Principe de la mesure de la charge électrique	59
4.6. Résultats obtenus et discussion	60
4.6.1. Influence Amplitude du signal haute tension	60
4.6.2. Influence de la fréquence du signal haute tension	61
4.6.3. Influence de l'humidité ambiante	63
4.7. Conclusion	65
Conclusion générale	66
Références bibliographiques	67
La liste des figures et tableaux	72

Introduction

GÉNÉRALE

Introduction générale :

Le recyclage des déchets industriels devient une activité de plus en plus importante du fait de l'augmentation de quantité d'équipements électriques en fin de vie. Ces déchets contenant des matériaux conducteurs et isolants de différentes natures, il fallait trouver des moyens de les séparer. Parmi les solutions envisagées, la séparation électrostatique s'est avérée une solution adéquate : propre et avec une faible consommation d'énergie, elle assure une bonne récupération des matériaux avec une pureté élevée ; aussi à la demande, l'élévation de la pureté au détriment de la récupération est possible. Les dispositifs actuels sont efficaces et perfectibles. C'est pour cela que la recherche continue et des nouveaux brevets d'invention sont déposés à l'échelle mondiale, en s'appuyant toujours sur les forces qui s'exercent en champ électrique intense et les principes de base de l'électrostatique.

La Séparation électrostatique est le terme générique pour une classe importante de technologies de traitement des matériaux, largement utilisés pour le tri sélectif des matériaux solides par des forces électriques qui agissent sur les particules chargées ou polarisées. Dans la plupart des cas, les champs électriques dans l'ordre de 10^6 Vm^{-1} sont nécessaires, et c'est pourquoi le développement des technologies et des équipements de séparation électrostatique a toujours été synchronisé avec les progrès de l'ingénierie de haute tension. La gamme d'applications, se traduisant par des centaines de brevets, s'étend de traitement des minérales et de conditionnement des semences jusqu'au recyclage des métaux et plastiques à partir de déchets industriels.

Dans le chapitre 1, nous avons présenté dans ce chapitre les notions principales de l'électrostatique principalement des rideaux électriques. L'effet des ondes mobiles est généré par un réseau d'électrodes disposées en peigne sur la surface et recouvertes d'une fine couche d'isolant. La première condition de mise en mouvement des particules est l'acquisition d'une charge électrique par ces particules. La décharge couronne ainsi que les mécanismes de chargement des particules ont été également décrits en détails. Par ailleurs, une partie de ce chapitre a été réservée à décrire les différentes forces agissant sur les particules et les applications diverses de ce type de convoyeur.

Nous avons présenté dans chapitre 2 le matériel utilisé dans les expériences ainsi que les technique de mesure pour l'étude expérimental du convoyeur à double face biphase.

Le troisième chapitre est dédié à l'étude d'une nouvelle configuration d'un rideau électrique biphase à double face. Ce dispositif sera utilisé pour analyser à la fois le mouvement des particules isolantes micronisées dû principalement à la force diélectrophorétique et la force d'attraction appliquée sur des pièces métalliques de différentes tailles.

Nous avons décrit dans Le quatrième chapitre l'étude du fonctionnement d'un convoyeur triphasé, dédié à la séparation du mélange granulaire provenant des cartes électroniques du tube cathodique broyés. Dans le but d'évaluer le taux de séparation de ce type de convoyeur, L'influence de plusieurs facteurs a été analysée tels que l'amplitude et le déphasage de la tension appliquée, la fréquence et l'humidité.....

CHAPITRE 1

Chapitre 1 : État de l'art et généralités

1.1 Introduction :

Séparation électrostatique [01] est le terme générique pour une classe importante de technologies de traitement des matériaux, largement utilisés pour le tri sélectif des matériaux solides par des forces électriques [02] qui agissent sur les particules chargés ou polarisées [03,04] . Dans la plupart des cas, les champs électriques dans l'ordre de 10^6 Vm^{-1} sont nécessaires [05,06], et c'est pourquoi le développement des technologies et des équipements de séparation électrostatique [07] a toujours été synchronisé avec les progrès de l'ingénierie de haute tension. La gamme d'applications, se traduisant par des centaines de brevets, s'étend de le traitement des minérales et de conditionnement des semences [08].Jusqu'au recyclage des métaux et plastiques à partir de déchets industriels [09, 10, 11,12].

Dans ce chapitre, une synthèse bibliographique a été faite sur la triboélectricité, les différents séparateurs triboélectriques utilisés par les chercheurs, et la fin les méthodes appliquées à la séparation triboélectrique mise au traitement des déchets plastiques.

1.2 Charge électrique :

Faisant approcher un bâton de verre après qu'on a soigneusement passé la main ferme sur toute sa surface, à un ensemble de coupures de papier, rien ne peut être observé, mais si on frotte ce même bâton de verre avec une peau de chat ou de la soie, l'attraction des coupures de papier devient particulièrement visible. Cela est traduit par : le bâton se charge par frottement, acquerront la caractéristique de l'attraction des objets légers.

On observe que deux corps frotté par le même objet, se repousse, tandis que on trouve, d'autre qui s'attirent. On décrit ce phénomène en disant que l'un des deux objets a arraché des électrons périphériques de l'autre, tandis que le deuxième objet a acquis par conséquent la charge positive. Par conséquent, les corps portant des charges de mêmes signes se repoussent, ceux qui portent des charges opposées s'attirent.

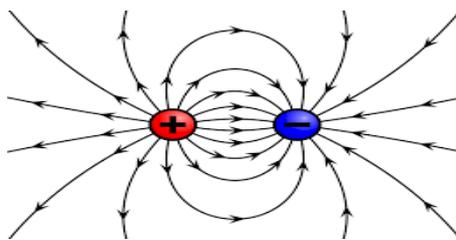


Figure 1-1 : Charge électrique

1.3 La charge électrostatique par effet couronne :

L'effet de couronne est un phénomène observé lorsqu'une électrode est amenée à une tension suffisamment élevée pour que le champ électrique excède le seuil pour lequel des décharges pré disruptives apparaissent. La valeur de la tension nécessaire à l'apparition de l'effet de couronne dépend principalement de la géométrie des électrodes. Sous les conducteurs des lignes de transport d'énergie électrique, la présence de gouttes d'eau suspendues modifie de façon importante le champ électrique, ce qui provoque ou amplifie l'effet de couronne. Cela a pour effet de créer des charges sous le conducteur appelées charges d'espace. Ces charges peuvent induire des forces suffisamment importantes pour causer la vibration des conducteurs à la fréquence naturelle d'oscillation de la portée. Ce phénomène est connu sous le nom de vibrations induites par effet de couronne.

Afin de fournir de nouvelles données sur ce phénomène, principalement sur la force induite par chacune des gouttes d'eau suspendues, une simulation numérique a été réalisée. Comme plusieurs des paramètres nécessaires à la réalisation de la simulation étaient peu connus, nous avons aussi effectué une étude expérimentale. Cette étude a permis d'obtenir des relations empiriques applicables à la simulation numérique, notamment sur l'amplitude de vibration et sur la géométrie de la goutte suspendue. Par la suite, à l'aide de relations électrostatiques simples, la simulation numérique permet d'obtenir la force induite en fonction du temps pour différentes valeurs de champ électrique à la surface du conducteur.

Les résultats de l'étude expérimentale et de la simulation numérique permettent d'étendre les connaissances du phénomène de vibration par effet de couronne et pourront servir à élaborer des modèles numériques plus complets.



Figure 1-2: Electrode couronne à pointe

1.3.1 Mécanisme d'une décharge couronne à polarité négative

Cette décharge lumineuse est l'aspect visible de l'effet couronne. Cet effet est lié à l'ionisation de l'air dans la zone de champ électrique très intense produit à la surface d'une telle électrode à faible rayon de courbure.

Une brève présentation de cette forme particulière de décharge électrique est nécessaire pour la compréhension du fonctionnement des séparateurs électrostatiques. Pour ceci, nous sommes amenés à parler de l'avalanche électronique, que nous allons décrire par rapport à la situation représentée sur la (figure 3). Elle aura lieu à proximité de l'électrode couronne, pour une polarité négative, nous expliquerons le mécanisme de ce phénomène qui est souvent utilisée dans les applications industrielles.

L'électron libre se trouvant à proximité de la pointe couronne, sera accéléré par le champ électrique intense, acquerront une énergie cinétique suffisante pour ionisée une molécule d'air ainsi libérant un électron ou plus. En multipliant leurs nombres et continuant leur trajectoire vers l'électrode positive le mécanisme se répète forment ainsi l'avalanche électronique, ce mécanisme cesse jusqu'à ce que l'électron accéléré ne peut plus ioniser d'autre molécule à cause de son énergie cinétique réduite, donc ce phénomène est limité dans l'espace, il se passe à quelques micromètres de l'électrode couronne. Au-delà de cette zone, les électrons vont alors s'associer aux molécules de l'air et forment des ions négatifs, formant une charge d'espace qui se dirigera vers l'électrode positive.

Contrairement aux molécules ayant libérés des électrons, sont devenues des ions positifs, et sont attirées par l'électrode de signe opposé, où elles regagnent leurs électrons arrachés (figure 1-3).

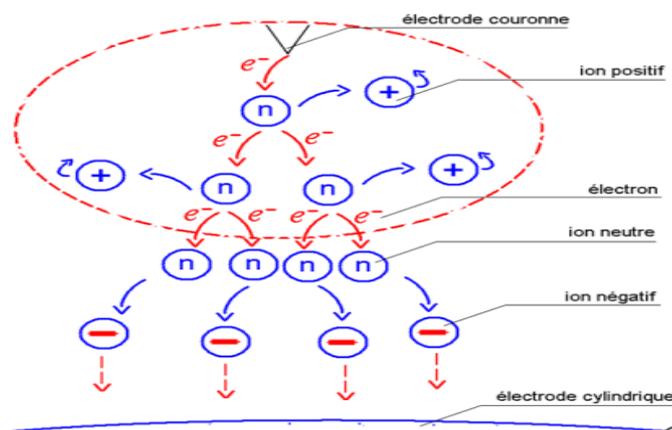


Figure 1-3 : mécanisme d'une décharge couronne à polarité négative

Soit un système pointe-plan, ou bien un fil parallèle à une plaque où le champ électrique est fortement divergent. Dans une telle situation, si l'électrode à faible rayon de courbure est portée à un potentiel négatif égal ou plus grand que le potentiel critique, le champ électrique critique est atteint au voisinage de l'électrode émissive. Il y a une très forte ionisation du gaz accompagnée d'une émission de lumière dans une zone ayant la forme d'une couronne : l'effet de couronne (Figure 1-4).

Tant que le potentiel électrique est inférieur à une valeur maximale, la décharge couronne reste localisée à proximité de l'électrode ionisante.

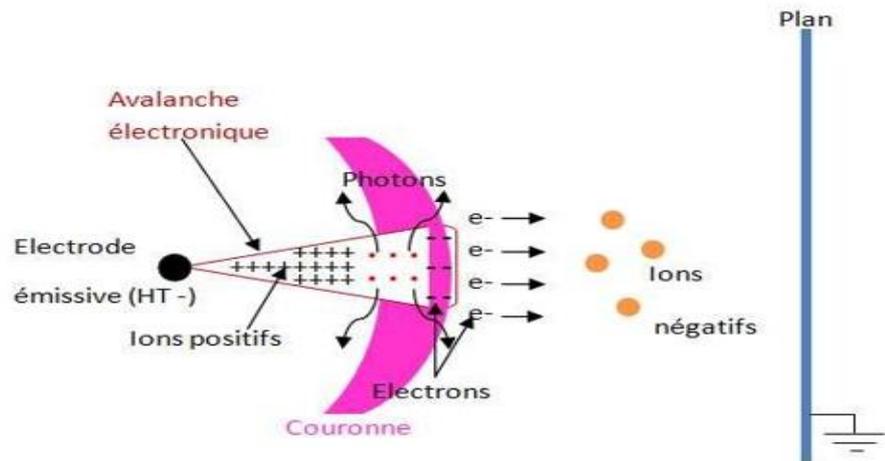


Figure 1- 4 : Représentation schématique d'une décharge couronne : avalanche électronique et formation de la couronne lumineuse.

L'avalanche électronique (Figure.1-5) se développe dans ce cas jusqu'à une distance telle que l'intensité du champ électrique n'est plus suffisante pour assurer la multiplication électronique. En dehors de cette région, les électrons libres s'attachent rapidement aux molécules neutres pour former des ions négatifs, à partir d'une certaine distance de l'électrode ionisante tout se passe comme si l'électrode à faible rayon de courbure émettait des ions de même polarité qu'elle [13-14].

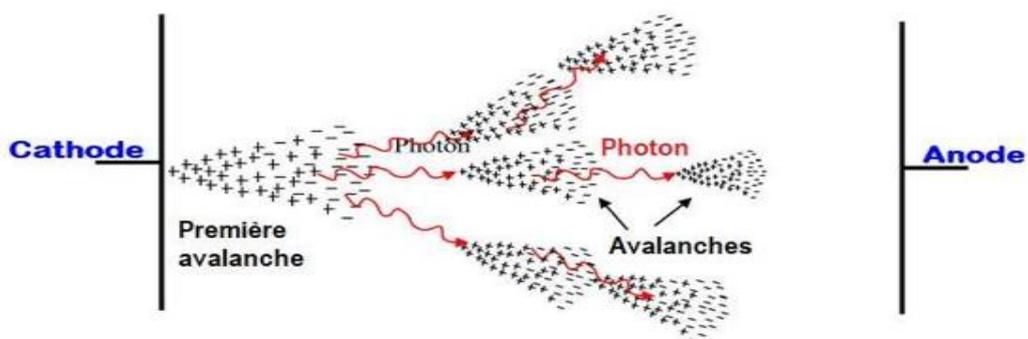


Figure 1-5 : Développement d'une avalanche électronique.

1.3.2 Induction électrostatique :

Un objet (M) électriquement chargé (figure 1-6a) crée dans son espace un champ électrostatique. Si un tel objet (M) est amené à proximité d'un conducteur (P) neutre (figure 1-6 b), le champ électrostatique fera pousser les électrons vers l'autre côté du conducteur (P) le rendant polarisé (figure 1-6c).

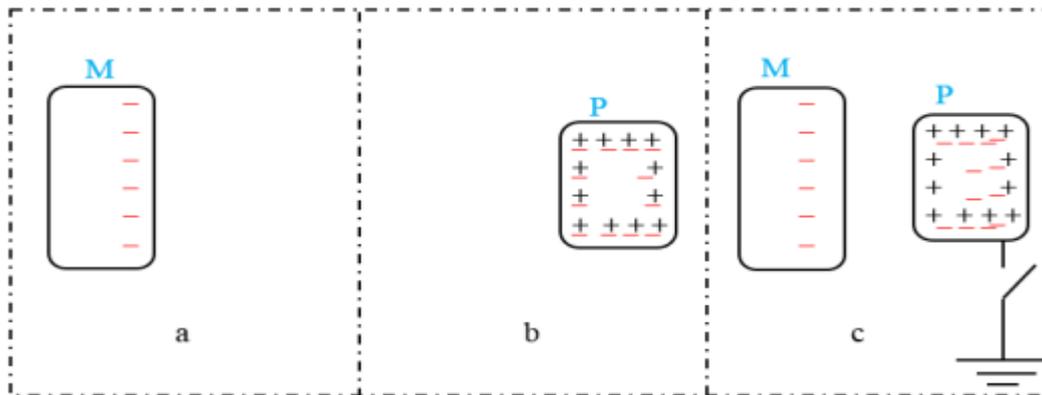


Figure 1-6: charge par influence ou induction

Si on établit une connexion temporaire à la terre à partir de la situation (figure 1-7a), le conducteur se déchargera (figure 1-7b). En isolant ce conducteur de la terre avec la présence du corps chargé la situation reste conservée (figure 1-7c), en éloignant le corps chargé, les électrons se répartissent sur le conducteur d'une façon homogène (figure 1-7d).

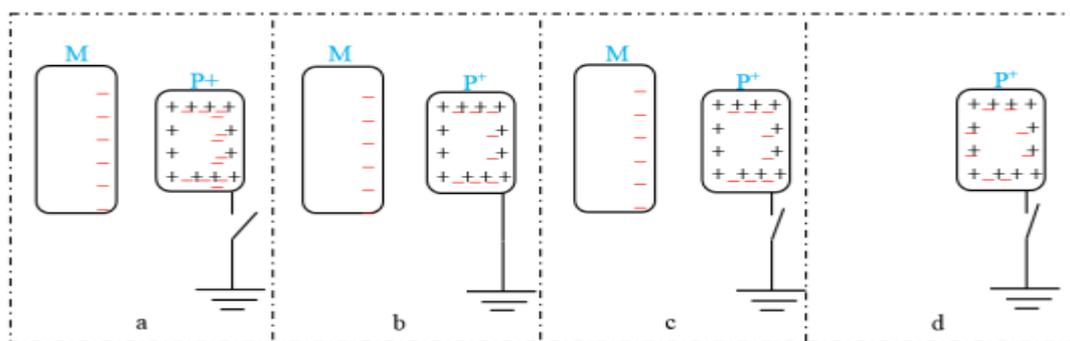


Figure 1-7 : transfert de charge à partir de la terre vers le corps A sous l'effet de l'induction du corps chargé B sur le corps A

1.2.1 Physique de la force d'image :

Si une particule isolante (1) chargée positivement se met sur la surface d'un conducteur (figure 1-8). Avec le phénomène d'influence, cette charge attire des électrons qui s'approche près de la particule sans qu'ils puissent adhérer les charges positives pour les neutraliser, en effet étant la particule isolante, ne permet pas le déplacement de charge sur sa surface. Le rassemblement de charges négatives (électrons) situés sur la surface du conducteur et au-dessous de la particule, crée une force mécanique d'attraction. La modélisation de cette force stipule : cette force se calcule on imaginant qu'une autre particule (2) de même taille se place de l'autre moitié du plan défini par la surface du conducteur, portant la même charge mais de signe opposée, ainsi la force se calcule par la loi de coulomb est prendra le nom de la force d'image référant à la particule fictive.

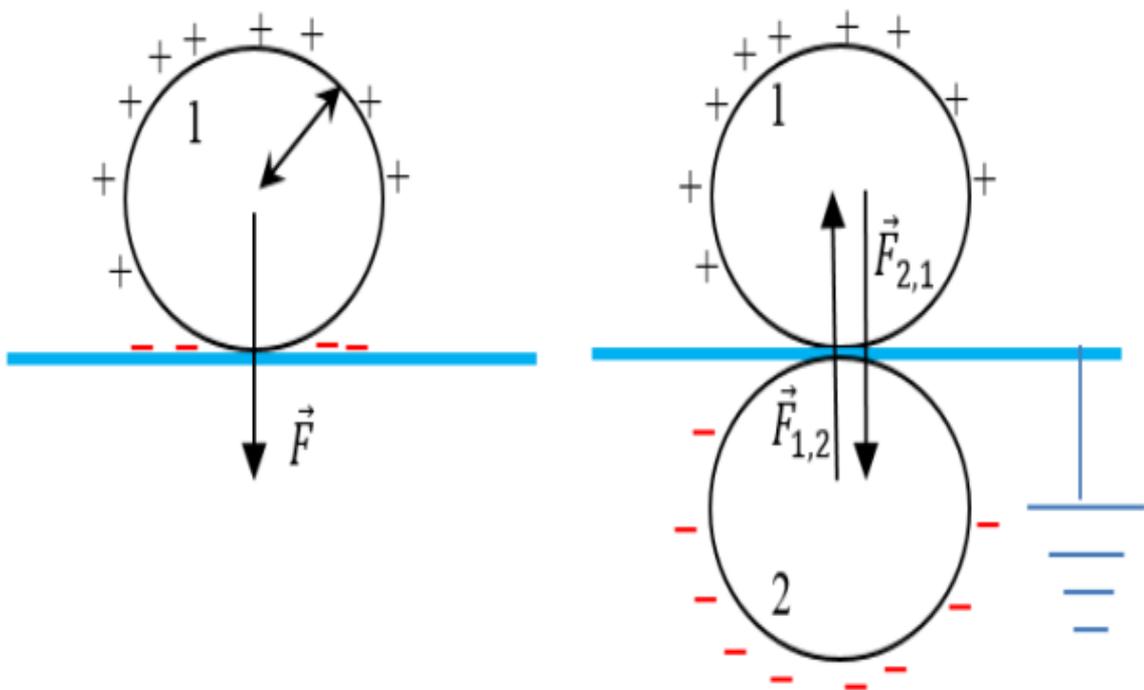


Figure 1-8 : charge fictive permettant de calculer la force d'attraction entre la particule isolante chargée contre une surface conductrice

$$F_{1,2} = k \frac{q_1}{(2a)^2} q_2 : \text{force appliquée par la particule 1 sur la particule 2}$$

$$F_{2,1} = k \frac{q_2}{(2a)^2} q_1 : \text{force appliquée par la particule 2 sur la particule 1}$$

1.4 SEPARATEUR ELECTROSTATIQUE METAL-PLASTIQUE:

La séparation électrostatique du cuivre, aluminium et des matériaux isolants électriques représente une technologie économiquement viable pour la préservation de l'environnement, car elle offre du plastique recyclé de qualité élevée et une meilleure efficacité pour le recouvrement des métaux que les méthodes conventionnelles de traitement des déchets. L'électro-séparation isolant-métal représente de nos jours une technologie moderne de recyclage des matériaux usagés issus des déchets industriels; elle est considérée comme la meilleure possibilité utilisée pour la séparation d'un mélange de granules isolant-métal(conçu à USA) baptisé CARPCO (figure 1-9). Sur la (figure 1-10), on représente la simulation du fonctionnement du séparateur électrostatique conducteur-isolant.

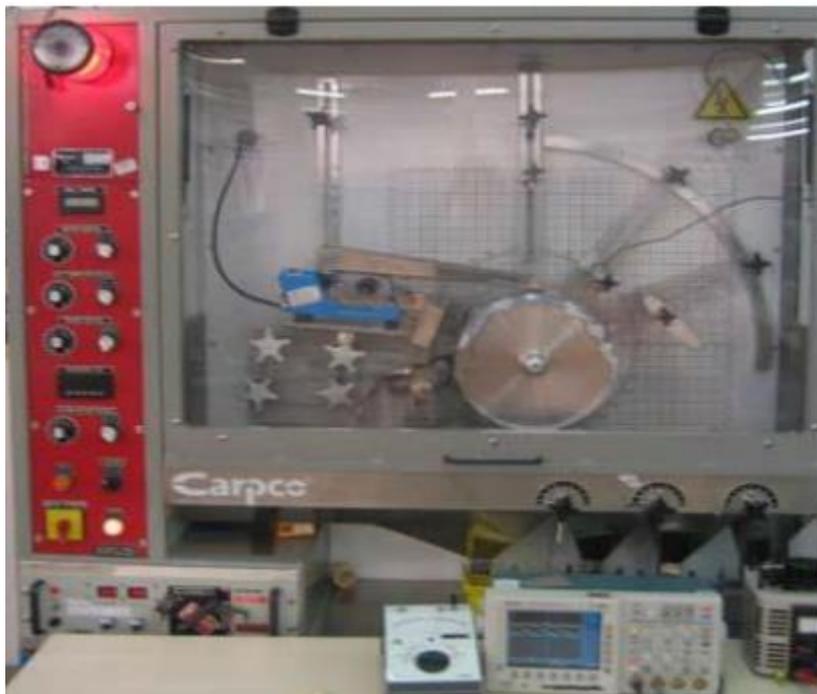


Figure 1-9 : Séparateur électrostatique CARPCO

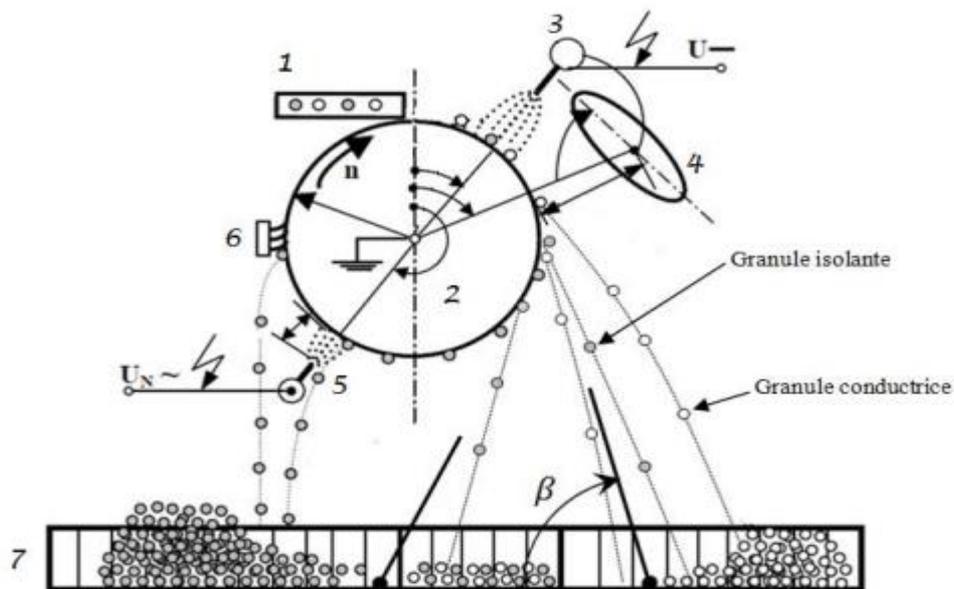


Figure 1-10 : Séparateur électrostatique conducteur-isolant en simulation de fonctionnement

Paramètres et variables dans un processus de séparation électrostatique.

- 1-vibro-transporteur ; 2-cylindre tournant mis à la masse ; 3-électrode couronne ;
4-électrode statique ; 5-électrode neutralisante ; 6-brosse ; 7-collecteur.

1.4.1. Constituants du séparateur :

1.4.1.1 vibro-transporteur

Les vibro-transporteurs électromagnétiques assurent le déplacement des matériaux granulaires dans une multitude de processus de production, dans les industries minière, pharmaceutique et agroalimentaire.

Le principe de fonctionnement est illustré sur la (figure 1-11). Le matériau se déplace à la surface d'un plateau à rebords, mis en vibration par un électro-aimant. Celui-ci est alimenté par une tension pulsatoire, dont la valeur efficace variable permet de contrôler le débit

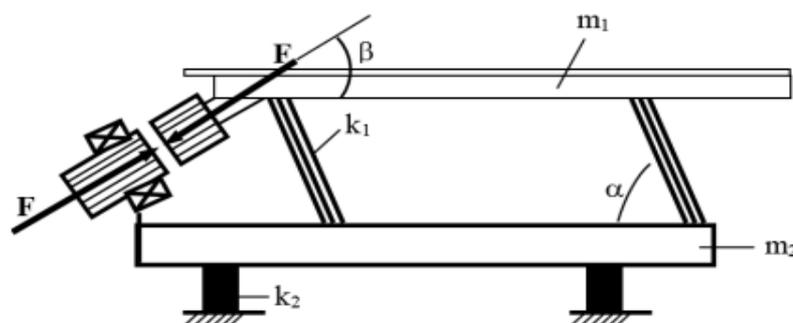


Figure 1-11 : Schéma illustratif décrivant le principe de fonctionnement du vibro-transporteur

1.4.1.2 Différents types de l'électrode couronne :

Le bombardement ionique représente le mécanisme le plus important d'acquisition de charge par les granules isolants. Les électrodes les plus couramment utilisées sont montrées dans la (figure1-12) ci-dessous, les besoins spécifiques de chaque application décident le type adéquat à utiliser.

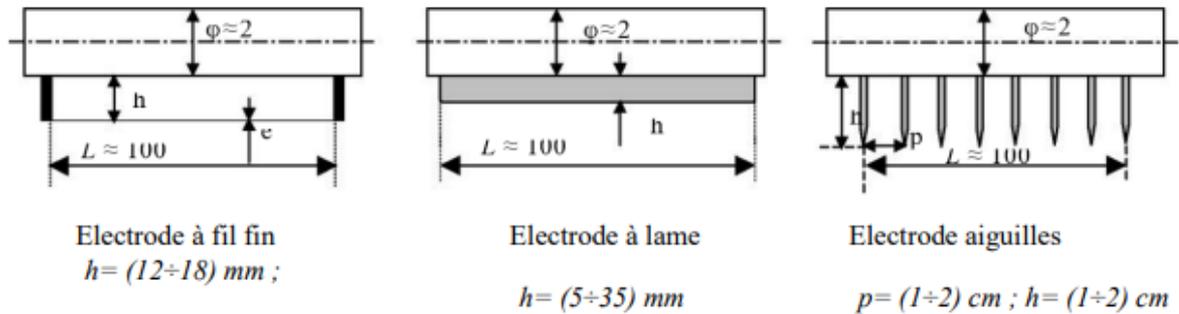


Figure 1-12 : différents types d'électrode couronne

Remarque : La longueur L varie bien entendu du modèle de laboratoire ($L \approx 100 \text{ mm}$) modèle industriel ($L \geq 500 \text{ mm}$).

1.4.1.3 Electrode statique :

L'association d'une électrode statique avec l'électrode couronne permet d'améliorer le rendement de l'appareil. L'extension, l'intensité et l'uniformité du champ électrostatique dans l'intervalle situé entre l'électrode statique et le cylindre tournant sont toujours pris en compte en vue d'assurer une séparation avec de bons rendements. L'électrode statique assure l'électrification par induction électrostatique des particules métalliques, et provoque leur « décollement » de la surface du tambour grâce à la force électrique d'attraction de coulomb associé à la force centrifuge [15].

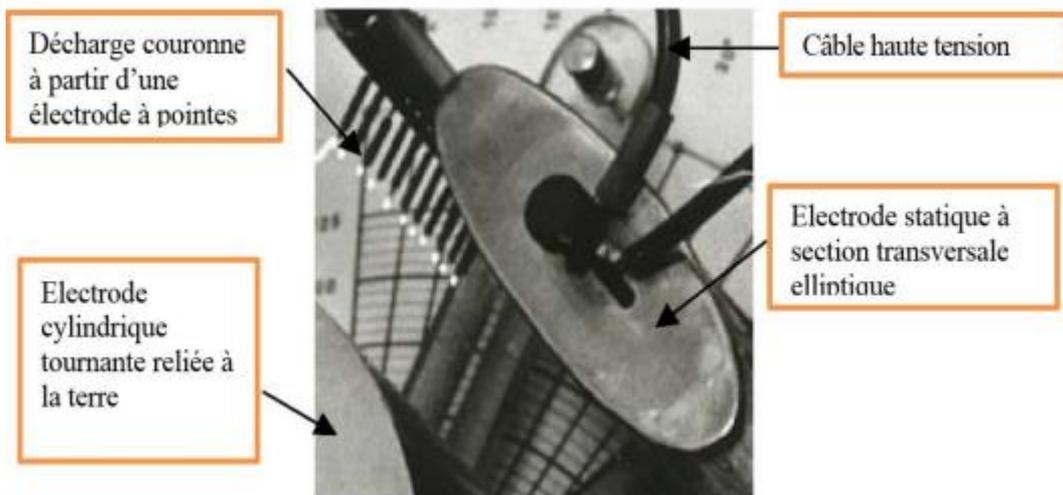


Figure 1-13 : L'électrode statique d'un séparateur à tambour

1.4.1.4. Electrode cylindrique

L'électrode cylindrique est un tambour d'une épaisseur réduite de quelques millimètres, relié à la terre et tournant autour de son axe avec une vitesse déterminée. La rotation est assurée grâce à l'entraînement par un moteur à courant continu alimenté par une tension réglable. La longueur du cylindre doit être corrélée avec la largeur de la plaque vibrante du vibro-transporteur et les longueurs des électrodes couronne et statique. Le schéma de la (figure 1-14) ci-dessous représente une électrode cylindrique.



Figure 1-14. : Électrode cylindrique

1.4.1.5 Collecteur :

Le collecteur est un accessoire nécessaire destiné à la récupération du produit granulaire après séparation. Généralement, le modèle de laboratoire est constitué par un ensemble de plusieurs compartiments identiques [16]. Il comprend environ une vingtaine de compartiments, et est divisé en trois parties (Figure1- 15) :

- Une partie réservée à la récupération des particules métalliques ;
- Une partie réservée à la récupération des particules isolantes ;
- Une partie réservée au produit mixte

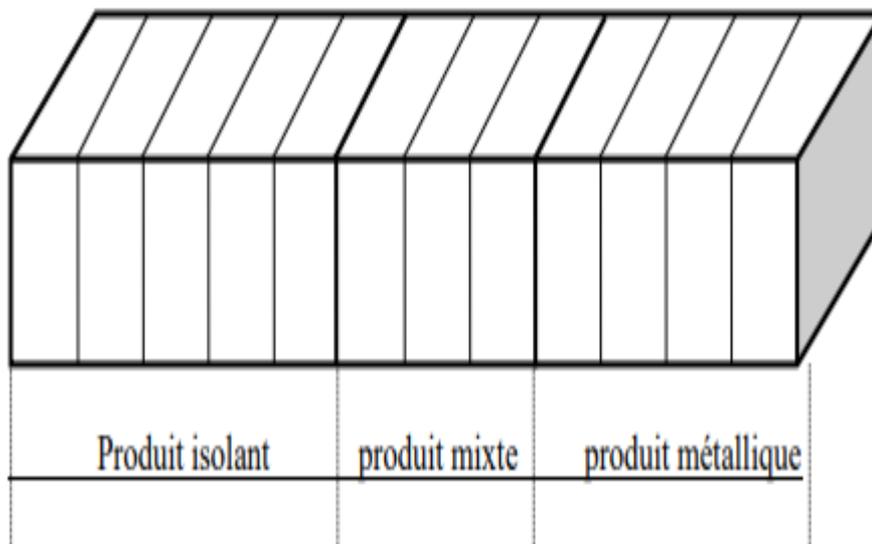


Figure 1-15 : Schéma du collecteur de particules à plusieurs compartiments

Le principe de fonctionnement de l'électro-séparateur peut être décrit comme suit : les granules isolants et métalliques sont transportés par le vibro-transporteur électromagnétique [17] et déposés sur le cylindre tournant relié à la terre [18]. Des charges électriques sont créées par ionisation de l'air grâce à la décharge couronne générée par l'électrode à pointe [19], appelée électrode couronne reliée à une source de haute tension continue ; toutes les particules acquièrent des charges électriques, et se comportent différemment suivant qu'elles sont électriquement conductrices ou isolantes ; les particules collent sur le cylindre qui vont être débarrassés de ce dernier par une brosse ; les particules conductrices chargées de signe opposé que le signe de la haute tension appliquée, vont être attirées vers l'électrode statique.

1.4.2 Principe de fonctionnement d'un séparateur électrostatique métal-plastique :

1.4.2.1. Charge par effet couronne des isolants granulaires :

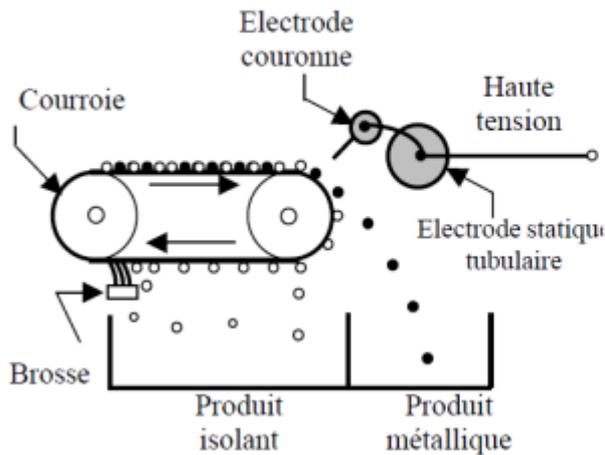
Les granules isolantes « collent » à la surface du tambour grâce à la force d'image électrique. En effet, étant exposés aux bombardements ioniques, les granules acquièrent des quantités de charge de même signe que la haute tension de l'électrode couronne et collent au tambour par la force d'image, tombent ensuite dans la partie gauche du collecteur [20] qui leur est destinée. Pour assurer le détachement et la chute des particules qui sont fortement attachées au cylindre, certains électro-séparateurs sont équipés par une seconde électrode à pointes reliée à une source de haute tension alternative, appelée électrode de neutralisation [21], dont le rôle consiste à neutraliser la charge acquise sous l'électrode couronne. Les particules qui ne tombent pas et qui restent malgré cela « collées », sont éliminées de la surface du tambour mécaniquement par une brosse [22], ou par l'électrode de neutralisation.

1.4.2.2. Charge par induction électrostatique des granulaires conductrices :

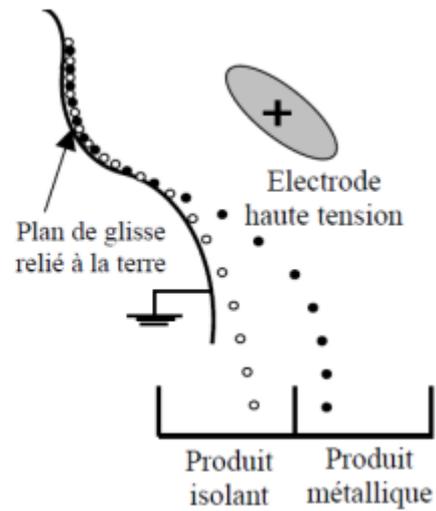
En contact du cylindre tournant relié à la masse, il aura un écoulement de charge vers la terre de l'électrode couronne vers la terre en dehors de cette zone ils se chargent par induction. Qui accélère leur décollement, ils se détachent du cylindre et vont être attirés par l'électrode statique de forme elliptique [23] suivant une trajectoire déterminée par les conditions initiales des forces : de pesanteur, de la résistance de l'air ainsi que l'effet attractif de la force électrique générée par l'électrode statique [15]. Ces granules sont ainsi déposés dans la partie droite du collecteur.

1.4.2.3. Différents procédés de séparation électrostatique métal-plastique :

Les (figures 1-16a et 1-16b) ci-dessous montrent d'autres variantes d'électro-séparation, moins pratiques et rarement appliquées dans l'industrie. Ces variantes utilisent une courroie mobile ou un plan glissant servant à introduire les particules et les faire passer près des électrodes haute tension [24,25]. Cette dernière méthode est utilisée actuellement en Australie dans la recherche minière, avec dix appareils identiques montés en série pour augmenter la pureté du produit visé.



**Figure 1-16a : Electro-séparateur
à courroie tournante**



**Figure 1-16b : Electro-séparateur
à plan incliné**

1.5. Décharges à barrière diélectrique (DBD) :

Le risque des décharges en tension continue telle que la décharge couronne est le passage à l'arc provoqué par l'accumulation de charges électriques. Ce risque est limité dans les décharges à barrière diélectrique (DBD) grâce à la présence d'au moins une couche de matériau diélectrique disposée sur ou entre les deux électrodes (Fig.1-17).

Lorsque la tension appliquée atteint la tension d'amorçage, une micro-décharge s'établit entre l'électrode et le diélectrique (Fig.1-18(a)). Aux points de jonction de la décharge avec le diélectrique, des particules chargées (électrons ou ions) s'accumulent en surface, générant un champ électrique qui s'oppose au champ externe. Le champ électrique subi par le gaz diminue donc progressivement au fur et à mesure que les charges électriques se déposent sur le diélectrique, ce qui conduit à l'extinction de la décharge avant son passage à l'arc. Alors que la tension augmente, de nouvelles micro-décharges apparaissent (Fig1-18(b)).

Quand la polarité s'inverse, la tension externe nécessaire à l'amorçage de la micro-décharge est plus faible qu'au premier cycle du fait des charges accumulées précédemment (Fig.1-18(c)). En résumé, la présence du diélectrique permet de développer des micro-décharges de quelques centaines de micromètres réparties sur toute la surface des électrodes tout en limitant le risque du passage à l'arc.

La DBD est excitée en tension alternative avec une fréquence généralement de quelques kilohertz (comprise entre 50 Hz et 1 MHz). Par ailleurs, les distances inter-électrodes généralement rencontrées sont de l'ordre de quelques millimètres [26].

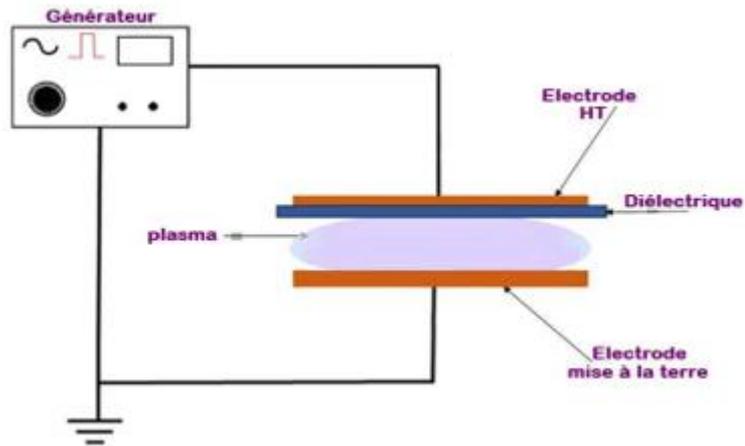


Figure 1-17 : Schéma de principe d'un DBD simple

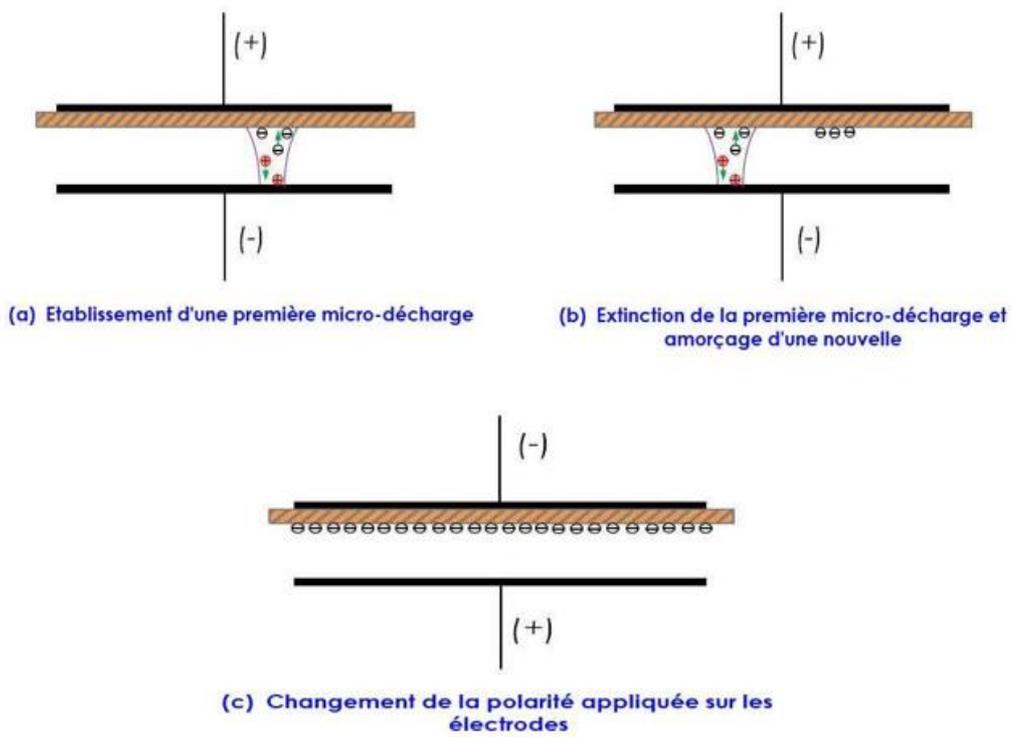


Figure 1-18 : Principe de déroulement d'une DBD .

1.6. Ondes mobiles :

Les ondes mobiles, en anglais "travelling waves", est un phénomène électrique qui provoque le déplacement de particules grâce à l'interaction entre une particule polarisée et un champ électrique polyphasé. Celui-ci est produit par un système d'électrodes parallèles, situées dans un même plan et portées à des potentiels alternatifs à 2, 3 ou 4 phases. Lorsqu'une particule est placée dans un champ électrique E , un moment dipolaire électrique p est induit dans celle-ci. Dans un champ électrique uniforme, la particule étant soumise à deux forces égales et opposées, la force résultante est par conséquent nulle.

Dans un champ électrique non uniforme, la force résultante qui s'exerce sur la particule est non nulle, est appelée la force diélectrophorétique. Cette force qui ne dépend pas de la polarité de la tension, peut être observée en tension AC ou DC, et représente la force principale dans les convoyeurs dits à "ondes mobiles".

1.6.1. Propagation de l'onde :

Lorsqu'un événement perturbe un milieu, ce milieu subit localement une déformation : les molécules ou les atomes se déplacent. Ils vont et viennent autour de leur position initiale, avec un écart maximal appelé amplitude. Ce mouvement est appelé oscillation. Ce déplacement local microscopique met alors en mouvement les particules voisines à leur tour poussées, qui poussent les suivantes avant de revenir à leur position initiale. La perturbation se propage de proche en proche. On en conclut que les ondes mobiles ont besoin d'un support pour se propager (l'air, l'eau, le métal, le bois, etc.).

(La Figure 1-19) représente un support comme une série de particules. Lorsqu'une particule individuelle est perturbée, puis revient à sa position initiale, elle transmet la perturbation à la particule interconnectée suivante. Cette perturbation continue d'être transmise à la particule suivante. Le résultat est que l'énergie est transportée d'une extrémité du milieu à l'autre extrémité du milieu sans transport réel de matière. Chaque particule revient à sa position d'origine.

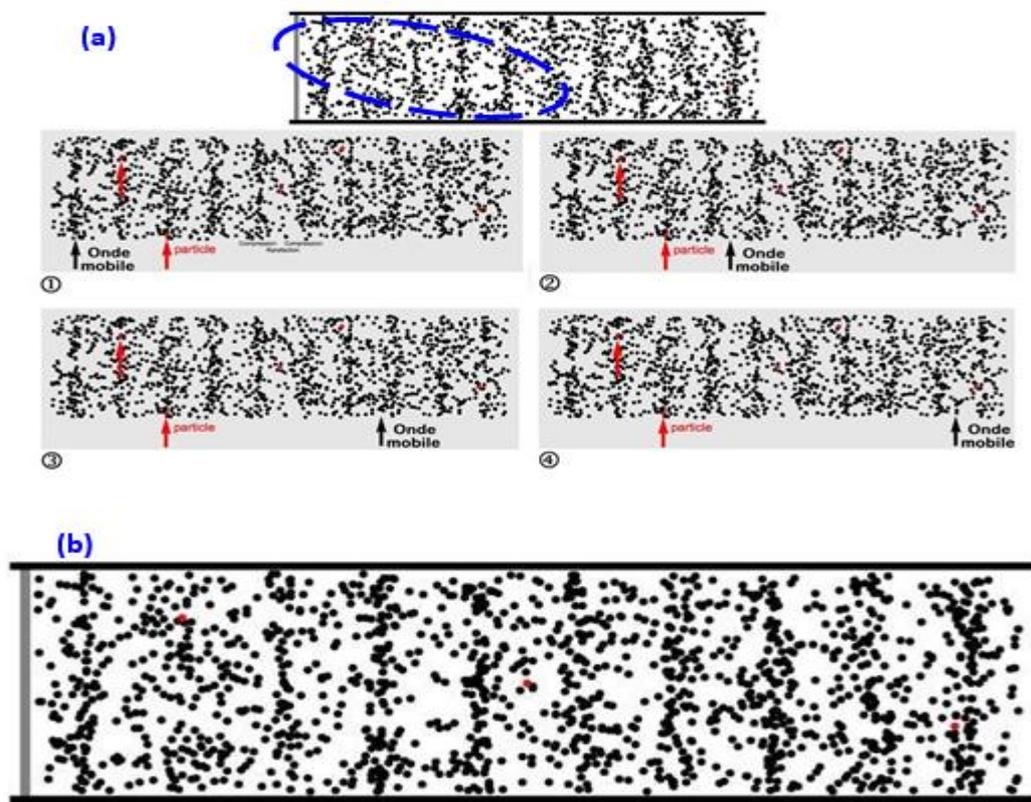


Figure 1-19 : Déplacement de l'onde mobile.

(a) Étapes de déplacement ; (b) Zoom sur le support contenant les particules.

1.6.2. Principe des convoyeurs à ondes mobiles :

Le convoyeur à ondes mobiles est un ensemble d'électrodes parallèles identiques séparées par un intervalle. L'ensemble est ensuite enduit par une couche isolante de vernis, pour éviter le claquage entre les électrodes (Figure 1-20).

Les électrodes appartenant à la même phase sont connectées ensemble. Les phases sont alimentées par des tensions périodiques ayant un déphasage de $\frac{2\pi}{n}$ (n représente le nombre de phases) et qui génèrent un champ progressif appelé "ondes mobiles" dans la direction perpendiculaire aux axes des électrodes [27]. (Fig.1-21). Le champ électrique à n phases charge les particules déposées, les soulève du substrat par des forces électrostatiques et propulse la couche de particules hors de la surface du convoyeur par une onde progressive qui n'est autre que l'onde mobile.

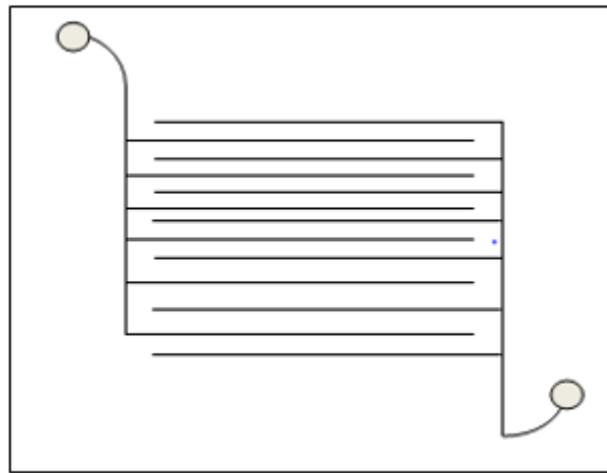


Figure 1-20 : Convoyeur à ondes mobiles biphasé.

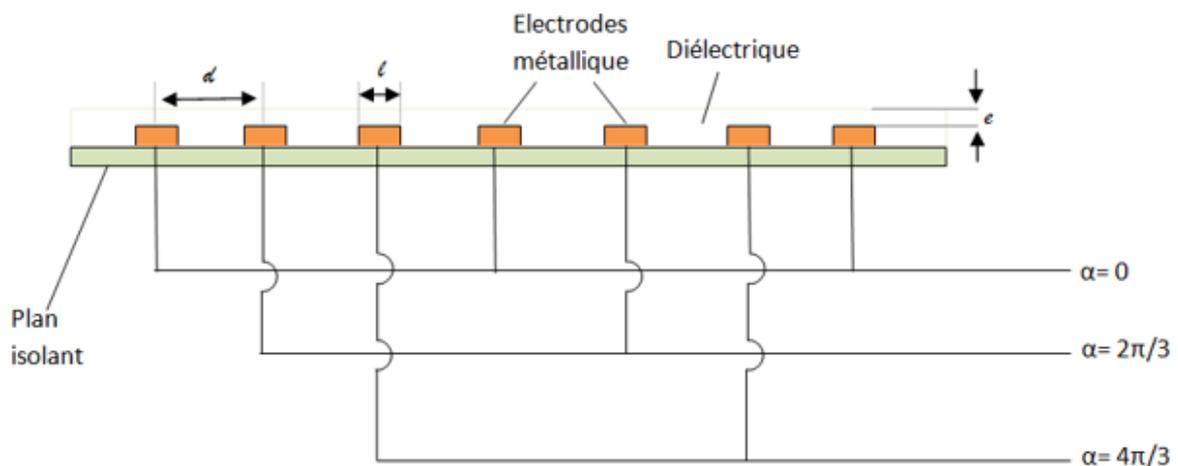


Figure 1-21 : Section transversale d'un rideau électrique triphasé.

Les forces dynamiques de l'onde de champ non uniforme ainsi générée surmontent les forces d'adhésion et de gravitation qui agissent sur les particules chargées et les transportent dans une direction dans le plan perpendiculaire aux électrodes de manière progressive, d'une électrode à l'autre.

Le processus de chargement des particules est principalement un processus dominé par la surface et est décrit comme suit : Les particules sur l'interface du film isolant mince au-dessus des électrodes de champ encastrées sont soit chargées triboélectriquement par frottement de contact pour les objets non conducteurs lorsqu'ils sont placés sur la surface, soit par induction par l'application des tensions aux électrodes pour les objets conducteurs [28].

La fixation d'une charge permanente sur des particules n'est possible que si les particules sont maintenues isolées de la terre. Par conséquent, tout matériau particulaire conducteur et non conducteur peut conserver sa charge acquise, si une isolation suffisante est garantie. L'exigence d'une isolation

complète de la terre est garantie [29] par le film mince qui recouvre les électrodes. Là encore, l'activation des électrodes induit une charge autour des électrodes à la surface du film [30-31]. La charge à la surface est alors acquise par la particule conductrice la plus proche.

Quand la tension est appliquée, l'interaction entre les champs électriques créés par les électrodes produit deux ondes mobiles identiques, mais avec une direction opposée. Supposons que le temps nécessaire pour que la particule se déplace d'une électrode vers une autre voisine est inférieur à $T/2$. Une particule se trouvant au milieu du convoyeur au-dessus de l'électrode ne qui est négative est susceptible d'être attirée vers l'électrode de signe positive de gauche (ne 1) ou de droite (ne 1) (Puisqu'ils ont les mêmes paramètres électriques). Dans ce cas, la position initiale de la particule va influencer sa direction, si la grande partie de la particule se trouve entre les deux électrodes ne et (ne 1) alors elle suivra l'onde mobile gauche (Figure1-22).

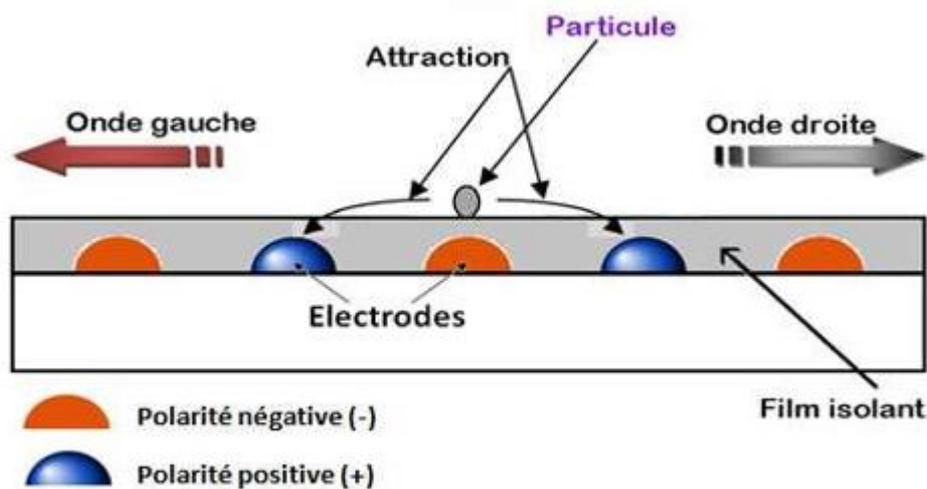


Figure 1-22 : Schématisation de l'onde mobile du convoyeur biphasé. Particule repoussée par l'électrode négative et attirée par l'électrode positive.

1.6.3 Applications de la technique des ondes mobiles :

Parmi les nombreuses solutions de transport de particules à partir d'une surface sans vibration mécanique, le convoyeur à ondes mobiles (COM), est considéré comme l'un des plus performants [32]. En 1970, *Masuda* et al. ont effectué des études sur les rideaux électriques pour le confinement et le transport d'aérosols chargés [33].

La technique des ondes mobiles est utilisée pour la séparation électrostatique des particules à une fréquence donnée du champ AC appliqué. La séparation des particules micronisées par cette technique a été étudiée pour plusieurs types de particules et dans des

milieux différents (liquide, air). Des résultats satisfaisants ont été obtenus pour des applications en biologie, biochimie, nettoyage des panneaux solaire, etc.

Le dépôt de poussière sur un panneau solaire peut provoquer une perte de puissance et diminue de **16 %** la production d'énergie [34]; des études ont été effectuées sur les rideaux électriques à ondes mobiles dans le but de dépoussiérer les couches de poudre déposée sur les panneaux solaires. D'un autre côté, elle sera appliquée dans les précipitateurs électrostatiques pour une tentative de nettoyage des électrodes collectrices, afin d'éliminer la couche de pollution.

La diélectrophorèse peut être utilisée pour le transport, la séparation et pour le tri de différents types de particules submillimétriques. Étant donné que les cellules biologiques présentent des propriétés diélectriques [35] la diélectrophorèse peut avoir de nombreuses applications biomédicales. Plusieurs Prototypes ont été démontrés dans des séparateurs de cellules cancéreuses des cellules saines. Il a été étudié comment la diélectrophorèse peut interagir avec des particules sous-micrométriques et virus [36].

L'avantage de cette technologie réside dans le fait que le transport des particules est assuré par les forces du champ électrique au lieu des moyens mécaniques sans produire ni d'effets de bruit acoustique ni de vibrations mécaniques.

1.7. Forces agissant sur les particules :

Généralement, les forces qui s'exercent sur les particules sont de différentes natures :

- Les forces de volume (force de flottabilité, force électrique, force magnétique, force thermophorétique).
- Les forces de surface (force diélectrophorétique, force de traînée, force de portance, force de masse ajoutée, force due au gradient de pression).

Il y a de nombreuses manières différentes de déplacer les particules de taille supérieure à $10\ \mu\text{m}$: le jet d'air forcé, les centrifugeuses et d'autres moyens mécaniques. Pour les particules allant de 1 à $10\ \mu\text{m}$, il ne reste en revanche aucune manière efficace de contrôler le déplacement parce que des forces extérieures complexes dominent la force de la gravitation ou d'inertie.

Dans les manières de déplacer les particules en suspension dans un fluide, un effet très important est la force exercée sur une particule chargée par un champ électrostatique. La plupart des particules en suspension portent un certain nombre de charges électriques élémentaires, et

peuvent parfois être fortement chargées. Pour des particules fortement chargées, la force électrostatique peut être des milliers de fois plus grande que la force de gravitation [37].

1.7.1. Équation du mouvement :

Dans un convoyeur à ondes mobiles, les forces appliquées sur une particule de masse m_i doivent satisfaire l'équation de mouvement suivante [38] [39] [40-43]:

$$m_i \frac{d^2x_i}{dx^2} + F_f = F_a + F_\varepsilon + F_l + F_g \quad (1-1)$$

avec :

m_i : Masse de la particule ; x_i : position de la particule suivant la direction de déplacement.

Les forces sont : la force de Coulomb F_ε , la force diélectrophorétique F_ε appliquée sur une particule dipolaire, la force d'adhérence F_a , la force gravitationnelle F_g et la force de frottement avec l'air F_f .

La force de frottement avec l'air est donnée par :

$$F_f = 6. \pi. \eta. r. \frac{dx_i}{dt} \quad (1-2)$$

Où :

η : Viscosité de l'air , r : Rayon de la particule

1.7.2. Forces électrostatiques :

A. Force de Coulomb :

Une particule chargée est soumise à une force électrostatique dès qu'elle est proche de surfaces chargées ou d'autres particules chargées. En présence d'un champ électrique E, les particules ayant acquis une charge électrique q subissent la force de Coulomb F_e proportionnelle à la charge [44] (Figure 1-23).

$$F_e = q.E \quad (1-3)$$

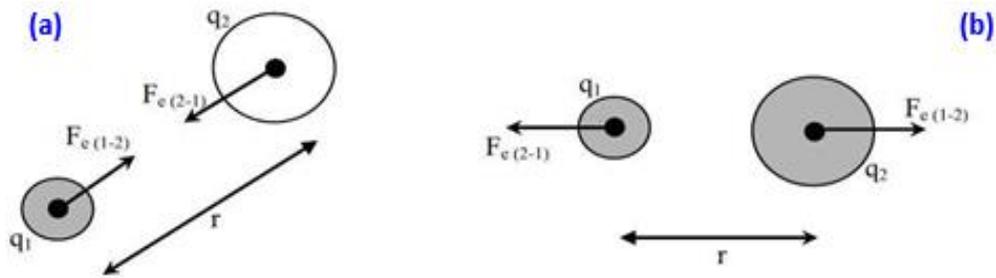


Figure 1-23 : Force de coulomb entre deux particules sphériques chargées.

a) Attraction, charges de signes contraires $q_1.q_2 < 0$

b) Répulsion, charges de signes semblables $q_1.q_2 > 0$

L'expression scalaire de la loi de Coulomb en électrostatique est représentée par l'équation suivante [45]:

$$F_e = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (1-4)$$

Où :

F_e : Force électrique en newton (N) ;

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

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

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

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

B. Force d'image :

Lorsqu'une particule chargée approche une surface, elle induit une charge d'image sur la surface. La force d'image électrostatique F_i dépend de la taille des particules et de la nature du matériau du film isolant du convoyeur. Cependant, le paramètre majeur est la charge de la particule qui diminue généralement avec le temps, de sorte que la force d'image peut être négligée dans la pratique. Cette force est donnée par [38] [39] [40-43] :

$$F_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{N=1}^N \left(\frac{q_i q_n}{2z} \right)^2 \frac{z}{|z|} \quad (1-5)$$

Avec :

q_i : Charge de la particule.

q_n : Charge du film isolant qui est négligeable.

Z : Distance entre la particule et la surface du convoyeur.

1.7.3 Force gravitationnelle :

Au XVIIe siècle, *Isaac Newton* affirme que deux corps quelconques A et B sont en interaction gravitationnelle, du fait qu'ils possèdent une masse. Cette force est responsable de la chute des corps et du mouvement des corps célestes. Elle s'exprime par la relation suivante :

$$F_i = m_i \cdot g \quad (1-6)$$

g : étant la constante gravitationnelle.

1.7.4 Forces d'adhérence ou de collage :

Fondamentalement, il y a des forces gravitationnelles et adhésives qui agissent sur les particules qui se déposent sur la surface du convoyeur. Il y a deux types principaux de forces adhésives :

- Force *Van der Waals*,
- Force Capillaire.

Pour des particules de petite taille, la force de *Van der Waals* est souvent la force la plus importante et peut provoquer l'adhésion des particules sur les surfaces ou sur d'autres particules. La force de *Van der Waals* est causée par la polarisation instantanée des atomes et des molécules due aux effets de la mécanique quantique [46]. Puisque le fonctionnement du champ électrodynamique est limité à la condition sèche pour les applications pratiques des convoyeurs, les principales forces d'attraction sont celles de *Van-Der-Waals* et les forces électrostatiques.

A. Force capillaire :

Le mouvement d'un liquide à la surface d'un solide est causé par l'attraction plus grande des molécules du liquide vers la surface du solide que les unes vers les autres. Les molécules du liquide adhèrent à la surface du solide et aussi entre elles, de sorte que chaque molécule entraîne la suivante. L'eau se déplace par capillarité.

La force d'adhésion du liquide est proportionnelle à la distance entre deux particules et à la quantité de liquide disponible, une humidité ambiante élevée augmentera l'effet de la force d'adhésion (Fig.1-24).

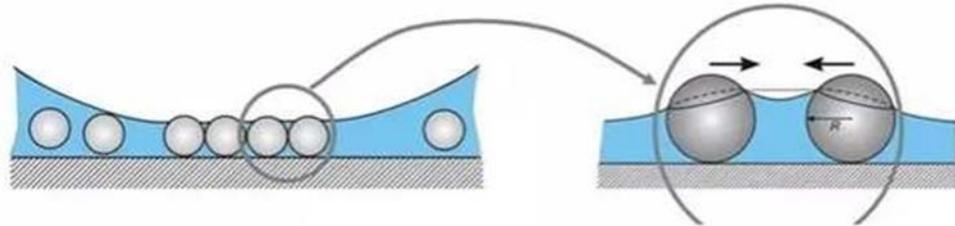


Figure 1-24 -Vue latérale de la force capillaire.

B. Force de Van Der Waals :

Une liaison de van der Waals est une interaction électrique de faible intensité entre atomes, molécules, ou entre une molécule et un cristal. Il est possible de décrire sommairement cette interaction en considérant les forces électriques qui sont présentes entre tous les couples de charges électriques qui forment ces atomes et ces molécules. Ces forces ont été nommées en l'honneur du physicien néerlandais *Johannes Diderik van der Waals* (1837-1923),

Les forces de Van der Waals sont de trois types :

- Des interactions dipôle permanent - dipôle permanent

Il existe des forces électrostatiques entre deux molécules polaires, Le pôle + d'une molécule attire le pôle - d'une molécule voisine (ces interactions participent à la cohésion des systèmes) (Fig.1-25).

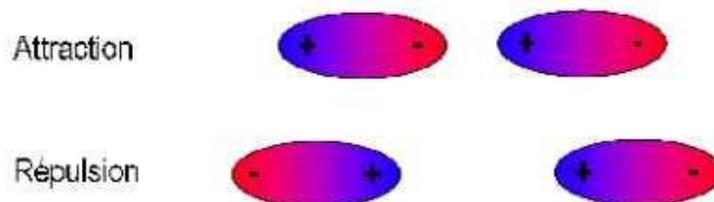


Figure 1-25 Interactions dipôle permanent - dipôle permanent.

- Des interactions dipôle permanent – dipôle induit

Ce type d'interaction peut également exister entre une molécule polaire et une molécule non polaire, La molécule polaire crée un champ électromagnétique autour d'elle. Le pôle + de la molécule polaire attire les charges négatives de la molécule non polaire (voisine) de son côté (Fig. 1-26).

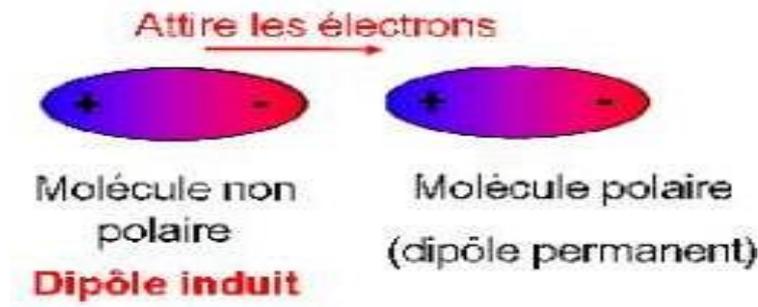


Figure 1-26 : Des interactions dipôle permanent – dipôle induit.

- Des interactions dipôle instantané - dipôle instantané

Dans les atomes et les molécules neutres et non polaires, les électrons " se déplacent", créant ainsi des dipôles instantanés. Des interactions peuvent exister entre ces dipôles et participer à la cohésion de la molécule.

1.7.5 Force diélectrophorétique :

A. Diélectrophorèse (DEP) :

La **DEP** est le déplacement sous champ électrique de la matière polarisée. La non uniformité du champ électrique appliqué est une condition nécessaire et ce phénomène est de plus en plus utilisé dans les microsystèmes pour manipuler ou pour déplacer les particules sans contact mécanique. La **DEP** se caractérise par deux points :

- (a) Elle concerne autant la matière neutre que chargée, solide ou liquide ;
- (b) Les champs électriques peuvent être alternatifs, ce qui diminue les réactions électrochimiques aux électrodes. La particule se déplace soit vers le champ le plus fort (la diélectrophorèse est dite alors positive) soit repoussée vers le champ le plus faible (auquel cas la diélectrophorèse est dite négative).

B. Force diélectrophorétique :

La force diélectrophorétique est proportionnelle au diamètre de la particule et au gradient du champ électrique qui lui est appliqué. Un champ fortement variable dans l'espace ainsi que de grosses particules sont des situations favorables à l'obtention de forces **DEP** capables de déplacer les particules malgré l'existence de nombreuses forces antagonistes. Parmi elles, nous trouvons l'agitation thermique, la force de frottement.

La force diélectrophorétique appliqué sur une particule sphérique est donnée par :

$$F_d = 2\pi r^3 \epsilon_m \text{Re}[F_{cm}] \nabla |E_{rms}|^2 \quad (1-7)$$

Où :

r : Rayon de la particule

ϵ_m : Permittivité du milieu

$\text{Re}[F_{cm}]$:Partie réelle du facteur de Clausius –Mossotti.

$|E_{rms}|^2$: Racine carrée moyenne du champ électrique.

$\nabla |E_{rms}|^2$: est déterminé par la forme de l'électrode et la tension appliquée.

La différence de polarisabilité de la particule et de son milieu de suspension dépend de la fréquence du champ électrique appliqué et du système particule - milieu de suspension. Elle est quantifiée par le Facteur de Clausius-Mossotti.

Le facteur de Clausius-Mossotti est fonction de la permittivité complexe du milieu et de la particule, donné par l'équation (1-8) :

$$F_{cm} = \frac{\epsilon_p^* + \epsilon_m^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_m^*} \quad (1-8)$$

Où :

ϵ_p^* et ϵ_m^* sont la permittivité complexe de la particule et du milieu respectivement

C. Propriétés de la dielectrophorèse :

1. La force diélectrophorétique ne peut être observée que lorsque les particules sont sous l'influence des champs électriques non uniformes.
2. Étant donné que la force diélectrophorétique ne dépend pas de la polarité du champ électrique, le phénomène peut être observé à la fois dans des conditions d'excitation continu (DC) et alternatif (AC).
3. Les particules sont attirées vers les régions de plus forte intensité du champ électrique

lorsque leur permittivité électrique est supérieure à celle du milieu de suspension.

4. Lorsque la permittivité électrique du milieu est supérieure à celle des particules, le mouvement des particules est orienté vers les régions ayant une intensité de champ électrique plus faible.
5. La dielectrophorèse est observée principalement pour des particules ayant un diamètre dans la plage d'environ **1 à 1000 microns**. Outre cette dimension (**1mm**), c'est la force de gravité qui domine l'effet de dielectrophorèse ; en dessous de **1 micron**, c'est le mouvement brownien qui prédomine.

1.8. CONCLUSION :

Nous avons présenté dans ce chapitre les notions principales de l'électrostatique principalement des rideaux électriques. L'effet des ondes mobiles est généré par un réseau d'électrodes disposées en peigne sur la surface et recouvertes d'une fine couche d'isolant. La première condition de mise en mouvement des particules est l'acquisition d'une charge électrique par ces particules. La décharge couronne ainsi que les mécanismes de chargement des particules ont été également décrits en détails. Par ailleurs, une partie de ce chapitre a été réservée à décrire les différentes forces agissant sur les particules et les applications diverses de ce type de convoyeur.

Le chapitre suivant sera consacré à présentation du matériel utilisé dans les expériences ainsi que les techniques de mesure pour l'étude expérimentale du convoyeur à double face biphase.

CHAPITRE 2

Chapitre 2 : Matériels utilisés et techniques de mesure

2.1.Introduction :

Le recyclage des déchets industriels devient une activité de plus en plus importante du fait de l'augmentation de quantité d'équipements électriques en fin de vie. Ces déchets contenant des matériaux conducteurs et isolants de différentes natures, il fallait trouver des moyens de les séparer. Parmi les solutions envisagées, la séparation électrostatique s'est avéré une solution adéquate : propre et avec une faible consommation d'énergie, elle assure une bonne récupération des matériaux avec une pureté élevée ; aussi à la demande, l'élévation de la pureté au détriment de la récupération est possible. Les dispositifs actuels sont efficaces et perfectibles. C'est pour cela que la recherche continue et des nouveaux brevets d'invention sont déposés à l'échelle mondiale, en s'appuyant toujours sur les forces qui s'exercent en champ électrique intense et les principes de base de l'électrostatique.

Le chapitre suivant sera consacré à présentation du matériel utilisé dans les expérience ainsi que les technique de mesure pour l'étude expérimental du convoyeur à double face biphasé.



Figure 2- 1 : Télévision à Tube Cathodique.

2.2 Circuit imprimé :

Un circuit imprimé (ou PCB de l'anglais printed circuit board) est un support, en général une plaque, permettant de maintenir et de relier électriquement un ensemble de composants électroniques entre eux, dans le but de réaliser un circuit électronique complexe. On le désigne aussi par le terme de carte électronique [47].

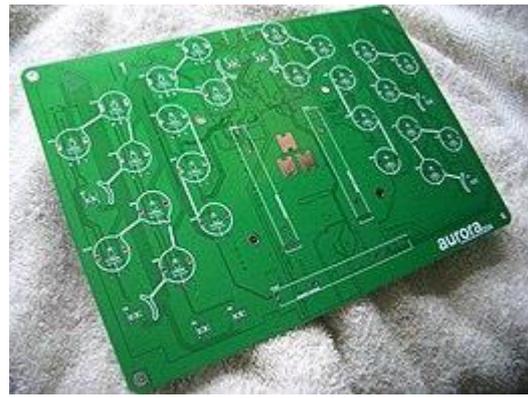
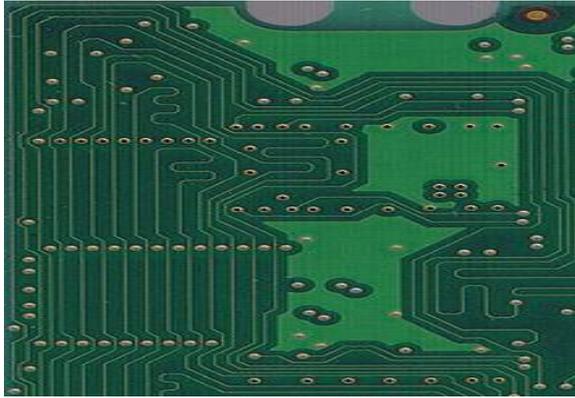


Figure 2-2 : Circuit imprimé

Il est constitué d'un assemblage d'une ou plusieurs fines couches de cuivre séparées par un matériau isolant. Les couches de cuivre sont gravées par un procédé chimique pour obtenir un ensemble de pistes, terminées par des pastilles. Le circuit imprimé est souvent recouvert d'une couche de vernis coloré qui protège les pistes de l'oxydation et d'éventuels court-circuit.

Les pistes relient électriquement différentes zones du circuit imprimé. Les pastilles, une fois perforées, établissent une liaison électrique, soit entre les composants soudés à travers le circuit imprimé, soit entre les différentes couches de cuivre. Dans certains cas, des pastilles non perforées servent à souder des composants montés en surface [48].

2.3 Classifications des circuits imprimés :

Les circuits imprimés peuvent se classer en différentes catégories :

2.3.1 Nombre de couches :

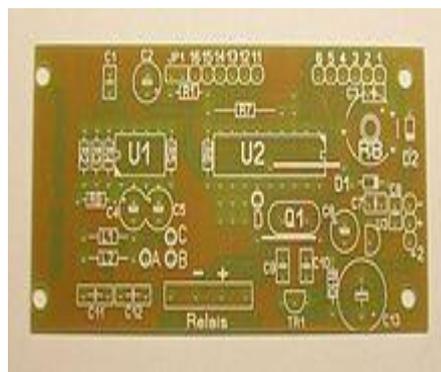


Figure 2-3 : Circuit imprimé simple face.

(La couche conductrice est visible par transparence.)

Le circuit imprimé le plus simple est un circuit appelé *simple face*, avec une seule couche conductrice en cuivre, sur laquelle peuvent être soudés les composants électroniques. Celle-ci est associée à une couche de matière isolante qui lui sert de support. En général ce type de circuit comporte des trous qui permettent l'insertion des composants électroniques. [49].

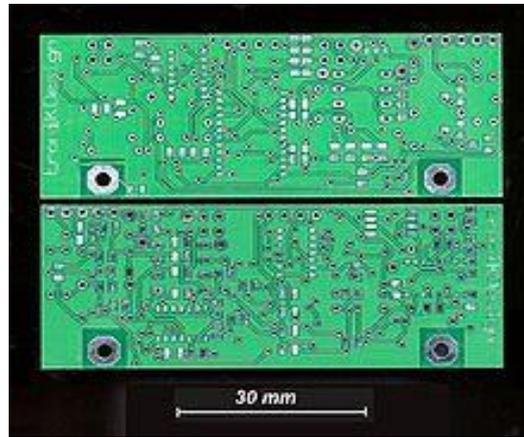


Figure 2-4 : Circuit imprimé double face.

Le circuit imprimé *double face* comporte deux couches conductrices isolées par une couche isolante.

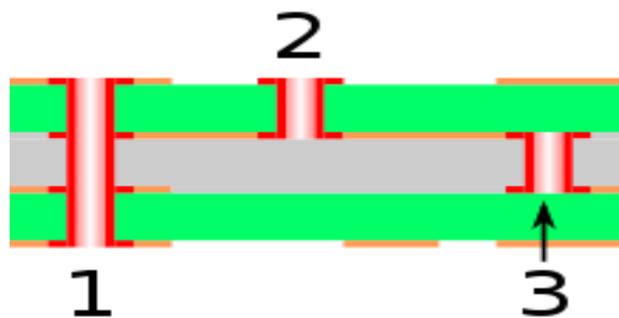


Figure 2-5 : Circuit imprimé multicouche à quatre couches

Le circuit imprimé multicouche comporte au moins trois couches conductrices, séparées chacune par des couches isolantes [50].

2.3.2 fabrication industrielle :

Les stratifiés sont fabriqués en durcissant sous pression et température des couches fibreuses (fibre de verre, papier, etc.) avec une matrice, le plus souvent de la résine époxyde thermo durcie. Cela forme une pièce finale d'épaisseur uniforme dont les plaques carrées peuvent mesurer jusqu'à 2,5 m de côté. L'épaisseur et les caractéristiques diélectriques du circuit sont

données par différents tissages, concentration et épaisseur de fibres, et par le pourcentage résine/fibre. [51]

Avec l'apparition des technologies liées à l'informatique, des circuits de plus en plus complexes ont vu le jour. Les circuits imprimés ont vu le nombre de leurs couches se multiplier, pouvant atteindre jusqu'à trente couches pour des applications très complexes et où le coût peut être considéré comme secondaire. Dans une carte mère de micro-ordinateur par exemple, les couches sont au nombre de six, voire plus. Une couche est réservée à la masse ou alimentation 0 V, une à l'alimentation 5 V, les autres sont distribuées en fonction des besoins.

Le point de départ de la fabrication d'un circuit double face est une feuille de résine époxyde collée entre deux fines couches de cuivre, appelé stratifié. Les épaisseurs du diélectrique constitué par la résine sont en général un multiple de 50 μm .

Les épaisseurs des feuilles de cuivre les plus courantes sont de 9, 18, 35, 70, 105 μm . Les entreprises américaines utilisent couramment une unité de masse, l'once (oz) pour définir l'épaisseur des feuilles de cuivre. Il s'agit de la quantité de cuivre nécessaire pour faire une feuille de cuivre de un pied carré.

Donc 1 oz (environ 28 g) de cuivre pour un pied carré (environ 30,5 cm par 30,5 cm) correspond à une feuille de 35 μm d'épaisseur.

Épaisseur (μm)	18	35	70	105
Masse de cuivre (oz) pour 1 pied carré	0,5	1	2	3

Des épaisseurs de cuivre plus importantes peuvent être utilisées pour des couches dites drain qui ont une fonction de dissipation thermique, alors que les autres couches sont destinées à établir soit une liaison électrique entre deux pastilles (couches signal), soit une liaison à un potentiel donné (couches masse) [52].

Le matériau isolant le plus utilisé est une résine époxyde appelée « FR-4 » pour des applications basses fréquences. Pour les applications à plus hautes fréquences, d'autres types de résines sont utilisées comme la résine polyimide ou des matériaux à base de Téflon

2.4 Matériels utilisés et préparation d'échantillons :

Nous avons utilisé dans ce chapitre le matériel décrit ci-après

2.4.1. Balance :

Mesurer la masse granulaire avant et après chaque expérience est nécessaire pour le traitement des résultats de séparation, pour cela une balance digitale a été utilisée (Figure) de masse maximale 500 g, de précision 0,1 g et qui possède une liaison RS232 avec l'ordinateur. Figure II.28 : Balance digitale GM-500



Figure 2-6 : Balance digitale GM-500

2.4.2. Amplificateur haute tension :

L'amplificateur de tension (Trek, modèle 2220) est l'un des nombreux types de la série Trek 2200. Cette série d'amplificateurs haute tension de 40 W offre des performances élevées. Le modèle 2220 (Fig.2-7) fournit un contrôle précis des tensions de sortie dans la plage de 0 à ± 2 kV CC ou crête AC avec une plage de courant de sortie de 0 à ± 20 mA crête AC et une large bande passante DC à 7,5 kHz (3 dB). Étude expérimentale avec le convoyeur à une seule face
Deuxième chapitre 35 Figure 2-7 - Amplificateur de tension (TREK, Modèle 2220).



Figure 2-7 : Amplificateur de tension (TREK, Modèle 2220).

2.4.3. Générateur de fonction :

Le dispositif est un générateur de fonction de 2 canaux, capable de produire deux différentes formes d'onde en même temps (Fig.2-8). Ces formes d'onde sont affichées sur le grand écran de l'affichage à cristaux liquides du dispositif, permettant à l'utilisateur de faire facilement des ajustements et de changer le type de forme d'onde. Les formes d'ondes générées de manière digitales nous ont garanti une haute stabilité. Plusieurs réglages peuvent être effectués sur le générateur de fonctions, tels que le type de signal (carré, sinusoïdal, triangle, entre autres), la fréquence et l'amplitude. Le signal délivré par le générateur de fonction est envoyé directement à l'entrée de chaque amplificateur, qui sera ensuite amplifié avec un rapport de 200 V/ 1V.

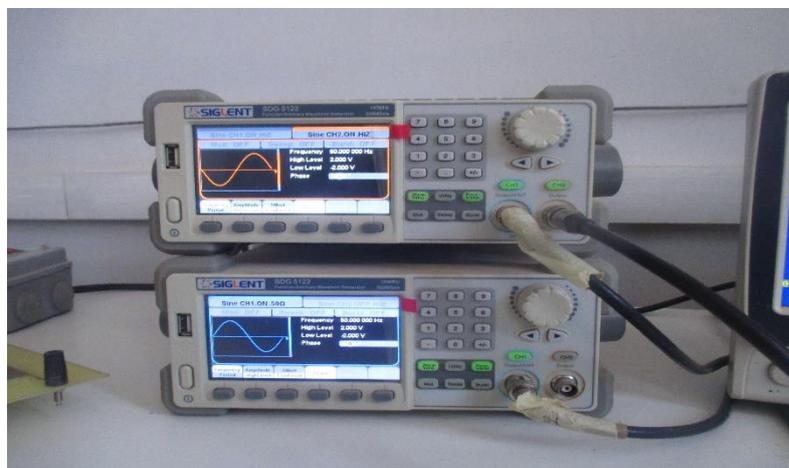


Figure 2-8 : Générateur de fonction Siglent SDG 5122.

2.4.4. Oscilloscope à mémoire :

L'étude des variations d'une grandeur en fonction d'une autre nécessite un relevé très rapide d'une série de points pour obtenir le tracé d'une courbe. L'oscilloscope à mémoire numérique de la série GDS-3000a permis de tracer directement sur écran, les courbes correspondant à l'évolution du signal de mesure.

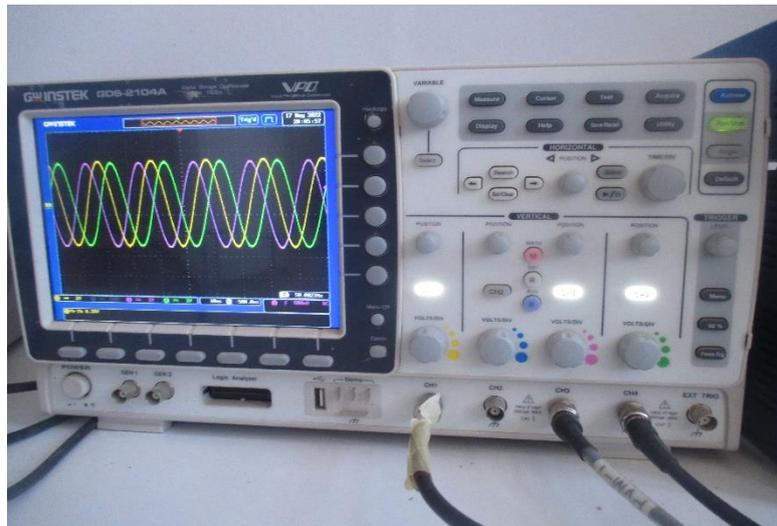


Figure 2-9 : Oscilloscope à mémoire.

2.4.5. Transformateur HT à point milieu :

On utilise un transformateur à point milieu représenté par la Figure 2-10. Ce transformateur permet d'avoir une tension " symétrique".



Figure 2-10 : Transformateur HT à point milieu.

2.4.6 Broyeur :

Afin de recycler les cartes électroniques des téléviseurs à tube cathodique, c'est été nécessaire de les broyer dans un broyeur de type BM400 qui est une Machine ou appareil dont la fonction de concasser et de réduire à l'état de particule (Grains) [53].



Figure 2-11 : Le Broyeur BM400 .

2.4.7 Tamiseur :

Des échantillons de granules de métal et de plastique de différentes tailles granulométriques ont été préparés à l'aide d'un tamiseur (Fritsch). Le tamiseur possède une large gamme de tamis de mailles de tailles différentes (Fig. 2-12).



Figure 2-12 : Photographie du tamiseur FRITSCH.

2.5. Mélange utilisé dans les essais expérimentaux :

Les expériences ont été effectuées en utilisant le mélange granulaire provenant d'une carte électronique d'un téléviseur à tube cathodique concasser et broyer après tamisé avec un tamis de 1mm. La photographie montre le mélange quand vas utiliser dans tous les essais qui vont suivre.



Figure 2-13 : Photographie du mélange granulaire.

2.6. Les rideaux électriques :

Dans le cas d'un champ uniforme, les forces de Coulomb qui s'exercent sur les charges opposées du dipôle se compensent : la polarisation ne produit donc aucune force électrique nette capable de déplacer la particule. Dans le cas contraire, les forces ne se compensent pas ce qui engendre un déplacement de la particule polarisée [54]. La non uniformité du champ électrique est donc une condition nécessaire à la manipulation des particules (Fig.2-14).

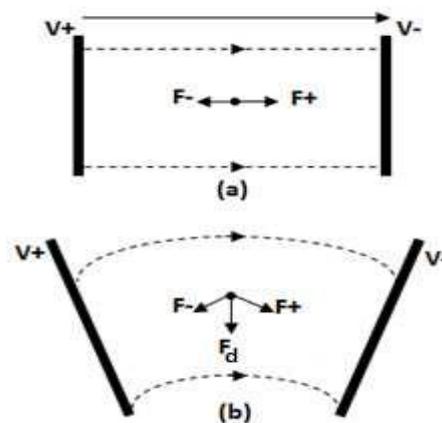


Figure 2-14 : Comportement d'une particule électrique soumise à un champ électrique uniforme (a) et non uniforme (b).

Deux méthodes différentes peuvent induire une polarisation et causer le déplacement d'une particule :

- Application d'un champ non uniforme en amplitude associée au terme de d'électrophorèse conventionnelle ;
- Application d'un champ non uniforme en phase tel qu'un champ tournant induisant le phénomène d'électro-rotation ou glissant induisant le phénomène de la diélectrophorèse dite à ondes progressives. C'est le cas de notre étude.

De nombreuses structures d'électrodes peuvent être utilisées pour générer un champ électrique non uniforme. Dans notre cas, les électrodes utilisées pour réaliser nos convoyeurs à 2 phases et à 3 phases sont des fils de cuivre parallèles.

2.6.1. Convoyeur biphasé :

Deux convoyeurs biphasés ont été réalisés à l'aide d'une plaque en Plexiglas avec les dimensions 120x140 mm² pour différentes configurations, sur lesquels sont placés des fils en cuivre séparés par un intervalle d qui varie de 1 mm à 6 mm (Fig.2-15).

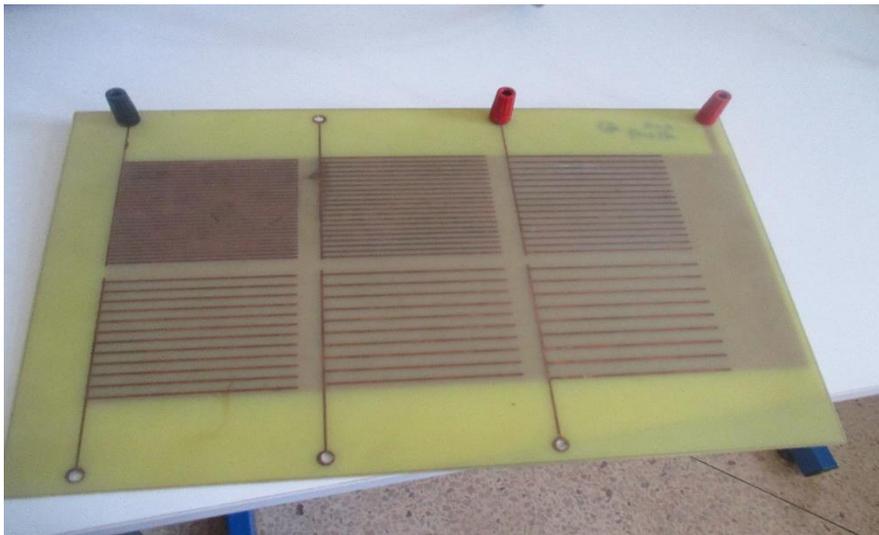


Figure 2-15 : Dimensions des convoyeurs à ondes mobiles biphasé .

2.6.2. Convoyeur triphasé :

Le convoyeur triphasé a été réalisé avec les dimensions 150 x 160 mm², sur lequel sont placées des électrodes en cuivre de 1 mm de diamètre séparées par un intervalle égal à 2 mm. La Figure 2-3 illustre une photographie du convoyeur triphasé utilisé.

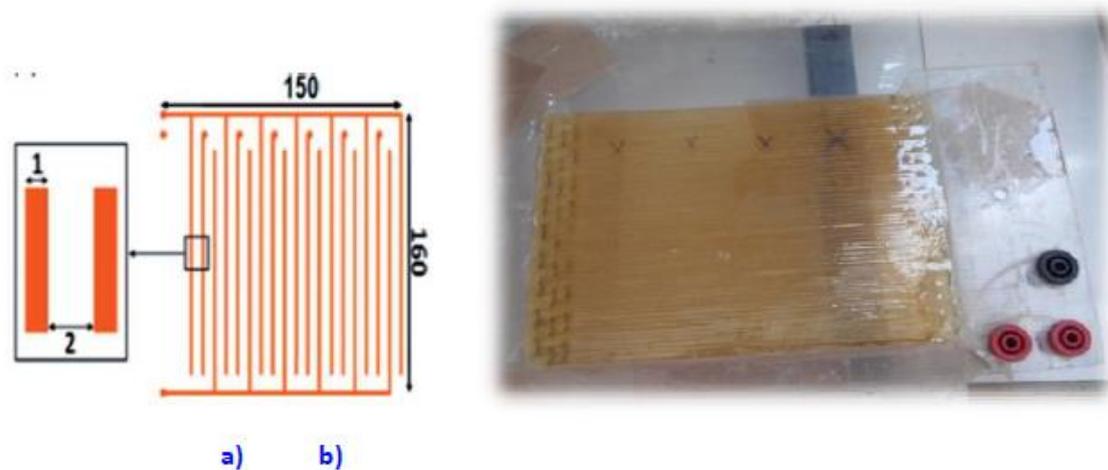


Figure2-16 : Convoyeur à ondes mobiles triphasé .

2.7. Conclusion :

Le recyclage est un procédé de traitement des déchets et de réintroduction des matériaux qui en sont issus dans le cycle de production d'autres produits équivalents ou différents. Le recyclage permet de réduire les volumes de déchets, et donc leur pollution, et de préserver les ressources naturelles en réutilisant des matières premières déjà extraites. Par exemple le recyclage de cartes électroniques des téléviseurs à tube cathodique.

Nous avons présenté dans ce chapitre les rideaux électriques biphasé et triphasé avec des espaces inter-électrodes différents ($d=1$ mm, $d=2$ mm et 3 mm), ainsi que le matériel utilisé et les instruments de mesure et d'alimentation.

Le chapitre 3 sera consacré à l'étude d'un convoyeur biphasé à double face pour l'analyse de la force d'attraction appliquée sur les particules métalliques ainsi que le mouvement des particules isolantes micronisées dû à la force diélectrophorétique.

CHAPITRE 3

Chapitre 3 : Étude expérimentale avec le convoyeur biphasé

3.1. Introduction :

Une nouvelle configuration d'un convoyeur à ondes mobiles à double face (CRED), qui permet d'étudier la force d'attraction appliquée sur les particules métalliques a été développée et expérimentalement analysée dans ce chapitre. La nouvelle configuration du CRE à double face est constituée d'une série d'électrodes parallèles qui s'accumulent sur les faces supérieure et inférieure de la couche diélectrique, alimentées par un transformateur haute tension à point milieu, de fréquence 50 Hz. Ce dispositif a été utilisé pour analyser à la fois le mouvement des particules isolantes micronisées dû principalement à la force diélectrophorétique [55-60][44][38], et la force d'attraction appliquée sur les granules métalliques. La principale caractéristique de la configuration à double face est l'application de valeurs élevées de la tension sans risque de rupture diélectrique. De plus, ce dispositif a été utilisé pour étudier la séparation des échantillons granulaires de taille de l'ordre du μm et du mm , comprenant des particules de plastique et de métal.

3.2. Convoyeur utilisé :

Le convoyeur utilisé est un convoyeur biphasé à double face. Ce dispositif de séparation de particules est une plaque de circuit imprimé électronique de dimensions $200 \times 165 \text{ mm}^2$, sur laquelle ont été réalisées des électrodes de cuivre parallèles de 1 mm à 6 mm de largeur et 100 mm de longueur. Les électrodes ont été réalisées sur les deux faces du circuit imprimé, séparées par l'épaisseur elle-même du circuit imprimé égale à 1,5 mm (Fig. 3-1).



Figure 3-1-Dimensions des convoyeurs à ondes mobiles biphasé

3.3. Mélange utilisé :

Les expériences ont été effectuées en utilisant le mélange granulaire provenant d'une carte électronique d'un téléviseur à tube cathodique concasser et broyer après tamisé avec un tamis de 1mm. La photographie montre le mélange quand vas utiliser dans tous les essais qui vont suivre.



Figure 3-2 - Photographie du mélange granulaire

3.4. Procédure expérimentale :

Le but de cette section est de présenter les mesures expérimentales obtenues lors des expériences effectuées au laboratoire sur le convoyeur à ondes mobiles biphase en utilisant le mélange granulaire préparé et présenté dans le chapitre précédent. Nous décrivons la procédure expérimentale ainsi que les analyses visant à déterminer l'influence de plusieurs facteurs sur la force d'attraction appliquée par les convoyeurs à ondes mobiles. Les facteurs étudiés sont l'amplitude, la distance inter électrodes la taille et la masse des pièces utilisées dans les expériences. Trois signaux de tension ont été utilisés :

- Une tension alternative carrée générée par des amplificateurs de haute tension contrôlés par des générateurs de fonction.
- Une tension alternative sinusoïdale qui est délivrée par un transformateur à point milieu d'amplitude 5kV. Pour chaque expérience, le mélange granulaire a été placées sur toute la surface du convoyeur, lequel est initialement placé sur le plan horizontal ($\alpha=0^\circ$). Après avoir été alimenté, le convoyeur a ensuite été lentement incliné.

3.5. Résultats obtenus et discussion :

Cette partie est consacrée à la présentation et la discussion des résultats obtenus avec les convoyeurs à 2 phases.

3.5.1. Application d'une tension alternative carrée :

Un signal carré est un signal périodique qui varie entre deux valeurs distinctes : une valeur haute et une valeur basse. Ce signal passe de manière quasiment instantanée du niveau bas au niveau haut (Fig.3-3) et c'est exactement ce qui se passe dans les signaux numériques binaires.

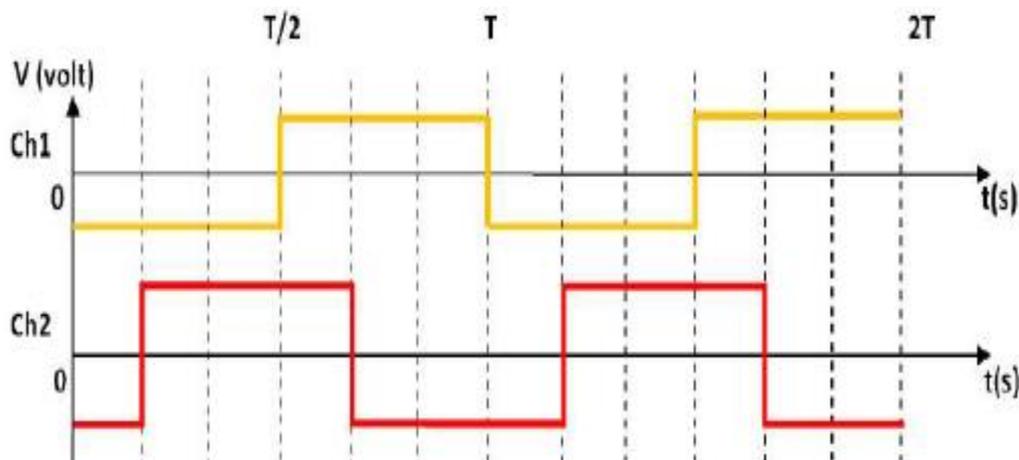


Figure 3-3—Formes du signal utilisé dans les essais.

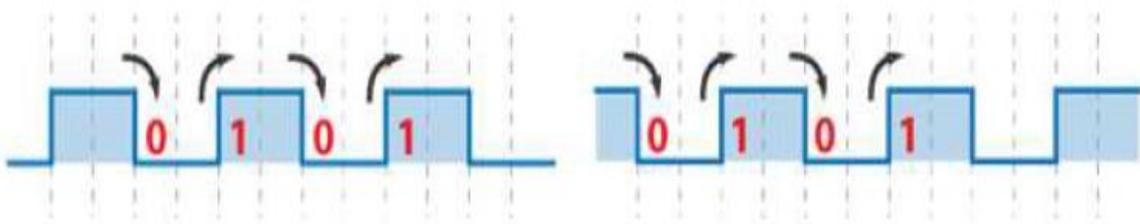


Figure 3-4 – Les deux niveaux d'un signal carré.

Un signal à haute fréquence est souvent appelé, signal carré. La tension change rapidement à une valeur de consigne. La tension reste à cette valeur durant un laps de temps et redescend rapidement à une tension nulle. La tension du signal à une allure rectangulaire, comme une succession d'ondes carrée ou rectangulaire. Le signal carré est facile à traiter pour calculer quoi que ce soit. Le signal carré impose une tension complète pendant toute la période du temps hormis les changements de polarité, contrairement aux signaux de formes sinusoïdale et

triangulaire. Pour cette raison, nous avons opté pour le signal de forme carré et les résultats préliminaires ont montré que l'effet de la tension appliquée est plus important avec un tel signal.

3.5.2 Description du dispositif expérimental :

La Figure 3-5 représente une photographie globale du dispositif expérimental. Il est constitué de quatre parties principales :

- 1- Le convoyeur à ondes mobiles biphasé.
- 2- Le système d'excitation électrique.
- 3- Le système de visualisation des données, (Oscilloscope à mémoire (GwInstek GDS-3154)).
- 4- Le système de pesée (balance).

Cet ensemble permet de faire varier le déphasage, la fréquence et le niveau de la tension appliquée à chaque électrode. Une représentation schématique de l'installation expérimentale est illustrée sur la Figure 3.5.



Figure 3-5- Banc Expérimental représentant l'alimentation du Convoyeur biphasé

Le système d'alimentation électrique est présenté sur la Figure 3-4 La Figure 3-6(a) représente les connexions du convoyeur avec le système d'alimentation, avec un déphasage de 180° illustré sur la Figure 3-6 (b).

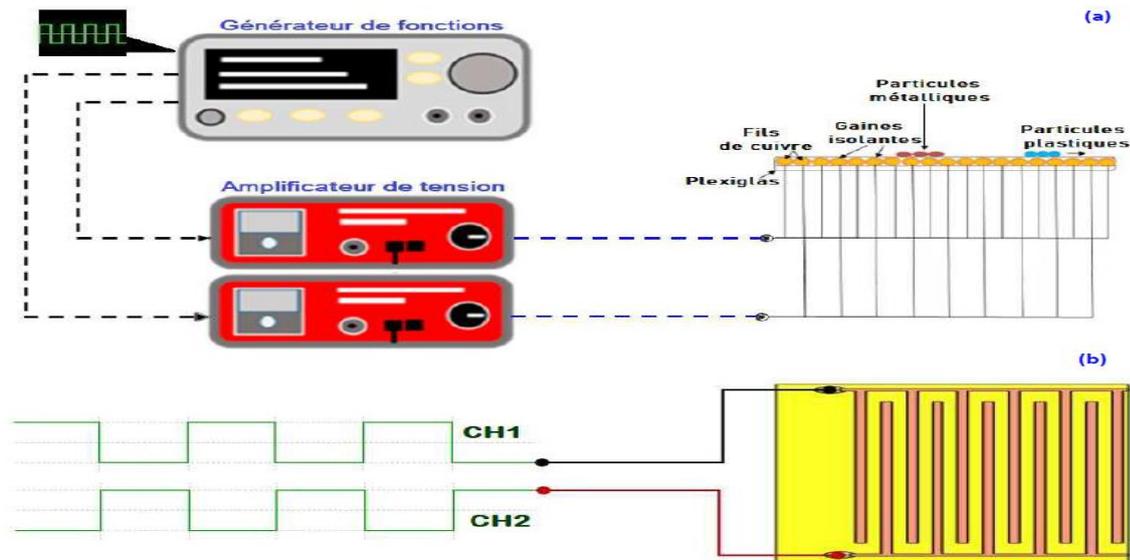


Figure 3-6- Convoyeur biphasé

(a) Schéma descriptif de l'alimentation du convoyeur biphasé

(b) Forme du signal appliqué aux électrodes (Déphasage de 180°).

La masse des produits séparés ont été mesurées à l'aide d'une balance électronique digitale de masse maximale 500 g, de précision 0,1 g et qui possède une liaison RS232. Les taux de pureté et de récupération des produits récupérés ont été calculés afin de déterminer l'efficacité de la séparation. La récupération a été calculée à l'aide des équations (3-1), (3-2).

3.6. Influence des facteurs sur la séparation des particules métal/plastique :

Dans le cadre de cette étude, tous les paramètres explicités ont fait l'objet d'une attention particulière dans l'optique d'une analyse de leur influence sur le comportement de la séparation en variant un seul facteur et en maintenant les autres à des valeurs constantes. Les différentes grandeurs testées dans ce chapitre sont :

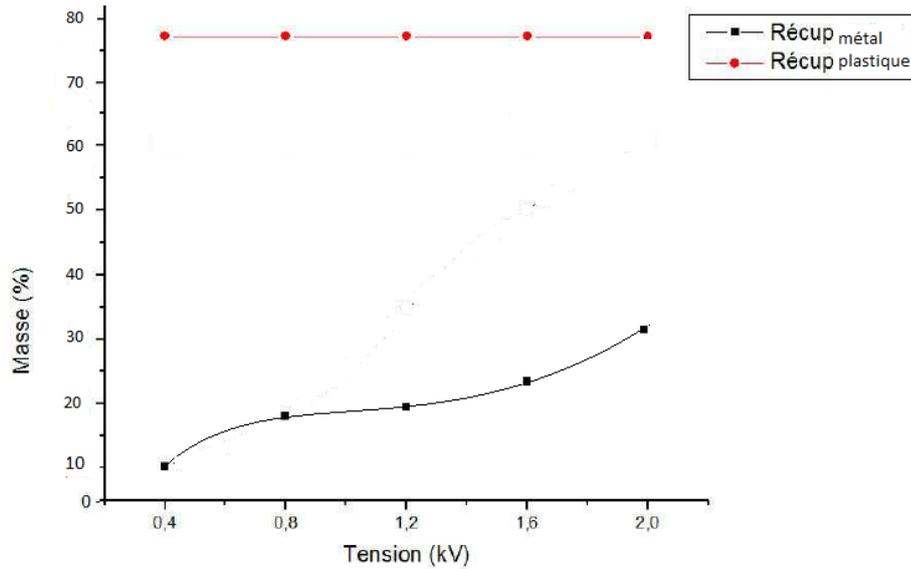
- 1- Tension AC appliquée aux électrodes : $U = 0 \dots 2 \text{ kV}$;
- 2- Fréquence : $f = 0 \dots 100 \text{ Hz}$;
- 3- Distance inter-électrode : $d = 1 \dots 3 \text{ mm}$
- 4- Déphasage : $= 0 \dots 180^\circ$.

3.6.1 Influence Amplitude du signal haute tension :

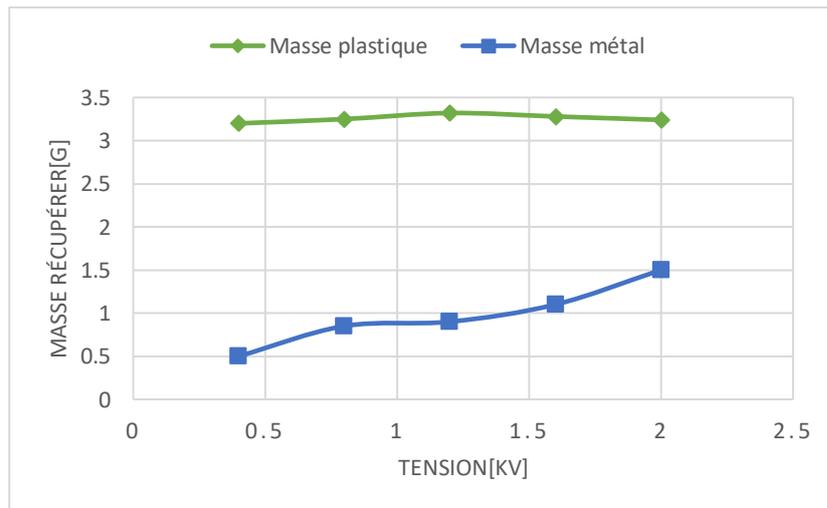
En plus de la distance inter-électrodes, l'influence des paramètres électriques (fréquence, amplitude et déphasage de la tension) a été aussi analysée. Le premier paramètre testé est l'effet de l'augmentation de la tension U appliquée au niveau du convoyeur. Nous avons expérimenté dans cette partie les deux formes de tension, à savoir une tension alternative

de forme carrée Application d'une tension alternative de forme carrée Pour ces expériences, la tension a été variée pour évaluer l'efficacité de la séparation du mélange granulaire.

Les Figures 3-7 représente la variation de la récupération du métal et du plastique en fonction de la valeur de la tension appliquée, pour une fréquence $f=50$ Hz, distance inter-électrode $d=1$ mm et un débit $D=0,5$ g/s.



Figures 3-7 - Variation de la récupération en fonction de la tension appliquée (D=0,5 g/s, f= 50 Hz et d=1 mm)

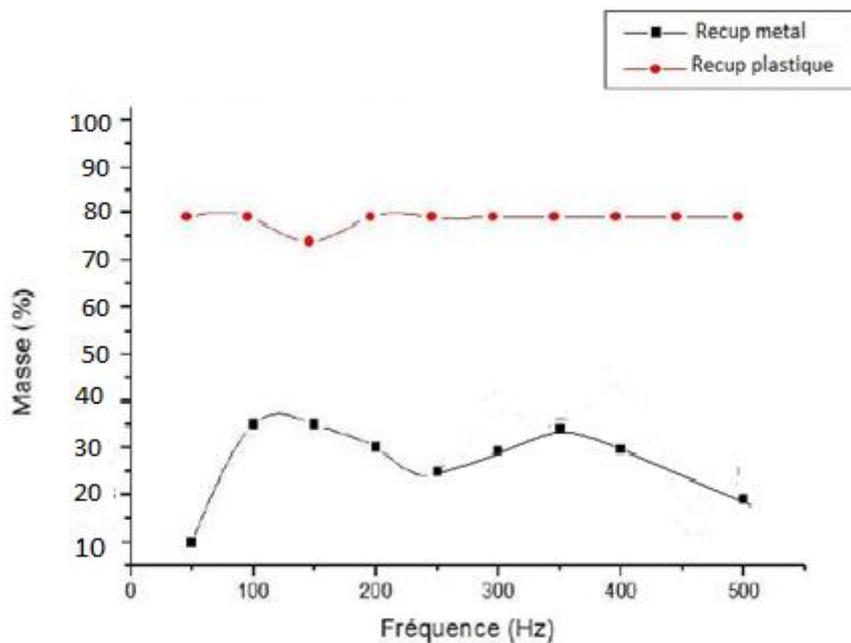


Figures 3-8 - Variation des masses de métal et plastique en fonction de la tension appliquée (D=0,5 g/s, f= 50 Hz et d=1 mm)

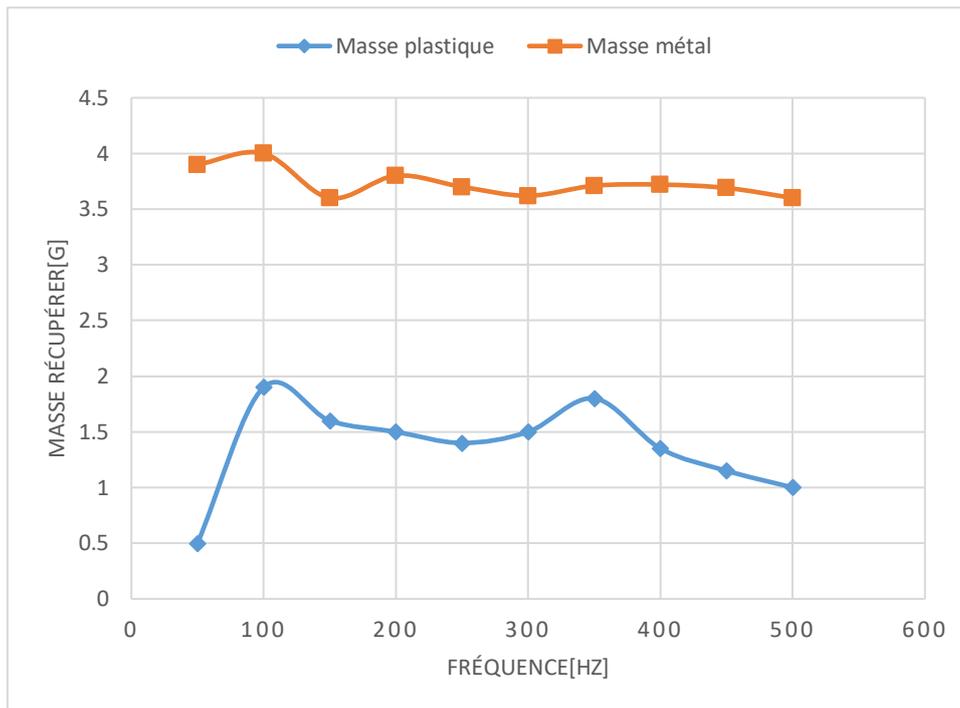
3.6.2 Influence de la fréquence du signal haute tension :

Le second paramètre on a étudié est l'effet de l'augmentation de la fréquence f du signal. L'amplitude du signal haute tension carré est fixé à $U= 2$ kV, distance inter-électrode $d=1$ mm et un débit de particules $D=0,5$ g/s.

L'évolution de la récupération et de la pureté est donnée par la Figure 3-9 et 3-10 et celles-ci demeurent, pratiquement, insensibles aux variations de la fréquence du signal appliqué. Les résultats obtenus montrent que dans la gamme des valeurs de la fréquence utilisée, la fréquence n'a pas une influence significative sur la force d'attraction. Par contre, des résultats obtenus pour une gamme de fréquence comprise entre 30 et 70 Hz, montrent que celle-ci a en effet un effet considérable sur la force appliquée sur les particules (Fig.3-8) ; on en déduit alors que la force d'attraction est pratiquement inexistante. Par ailleurs, dès que la fréquence atteint 100 Hz, plus de 60% du mélange s'attachent à la surface du convoyeur. Et près de 80% des granules plastiques sont extraite du convoyeur.



**Figures 3-9 - Variation de la récupération en fonction de la fréquence du signal
($D=0,5$ g/s, $U=2$ kV et $d=1$ mm)**



Figures 3-10 - Variation des masses récupérées en fonction de la fréquence du signal

3.6.3 Influence du déphasage de la tension :

L'onde mobile est un mouvement de déplacement des particules provoqué par les interactions entre plusieurs champs électriques qui sont produits par des électrodes. Cette définition est simple car le déphasage entre deux électrodes voisines est nécessaire selon la configuration du convoyeur biphase, triphasé ou quatre phases (Fig. 3-11).

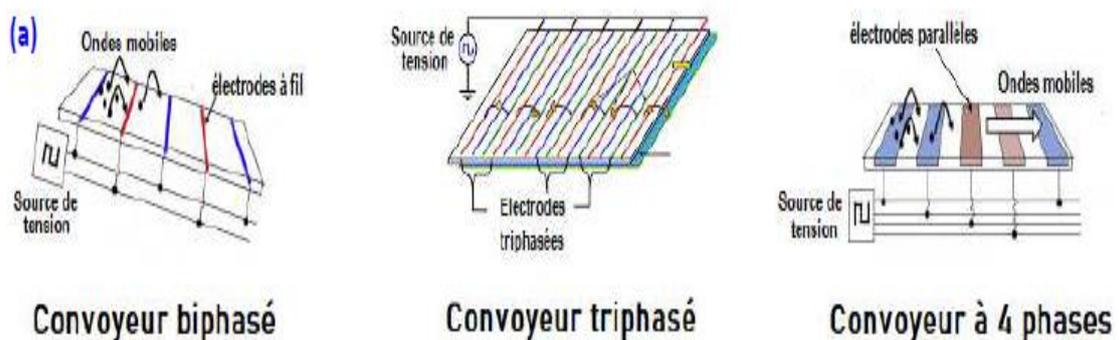
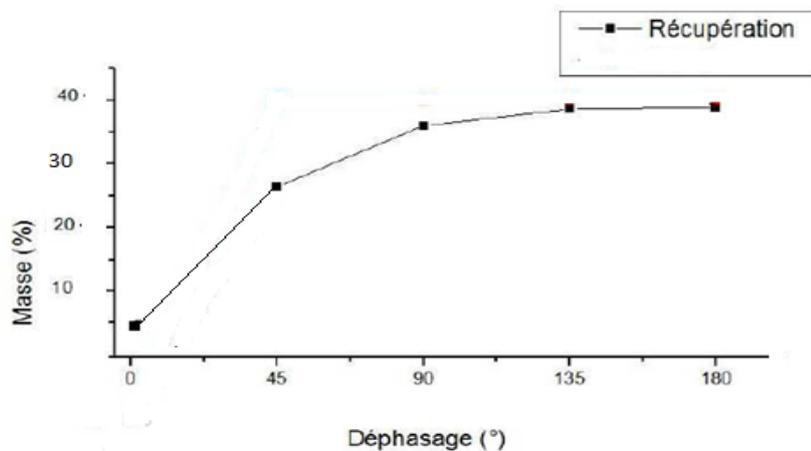
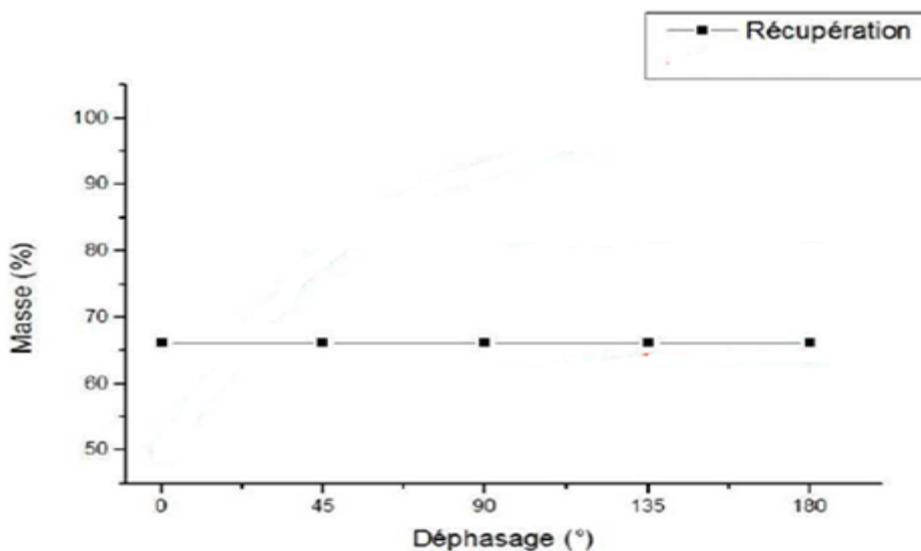


Figure 3-11 Configurations du convoyeur

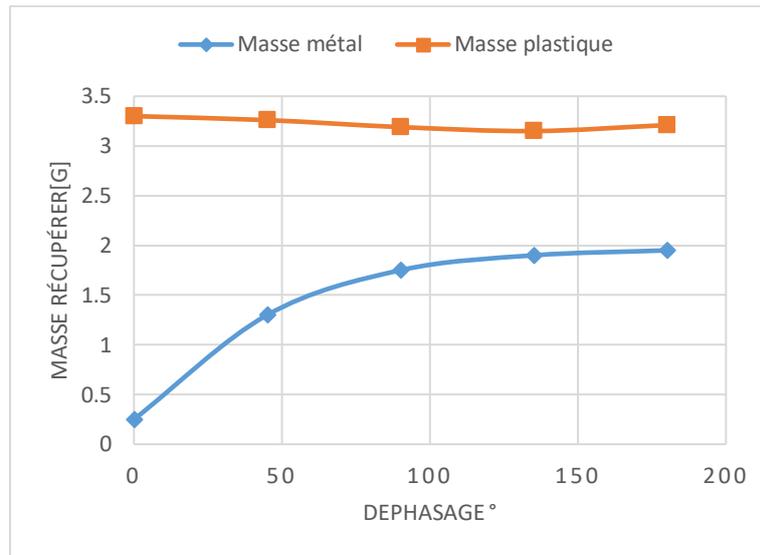
Le déphasage entre deux électrodes voisines peut être égal à 90° , 120° ou 180° selon qu'il s'agit d'un convoyeur à quatre, à trois ou à deux phases, respectivement. Les résultats reportés aux Figures 3-12 et 3-13 représente la récupération du plastique et du métal, sont obtenus en fonction de la variation du déphasage de la tension biphasée (de 0° à 180°) avec une tension constante égale à 2kV et une fréquence égale à 50 Hz. Un déphasage $=0^\circ$ correspond à une différence de potentiel nulle entre les électrodes, ce qui explique que pratiquement aucune particule métallique n'ait adhéré à la surface du convoyeur. La figure 3-14 représente la variation de la masse récupérer du métal et du plastique en fonction du déphasage.



Figures 3-12 - Variation de la récupération du métal en fonction du déphasage de la tension
($D=0,5$ g/s, $U=2$ kV).



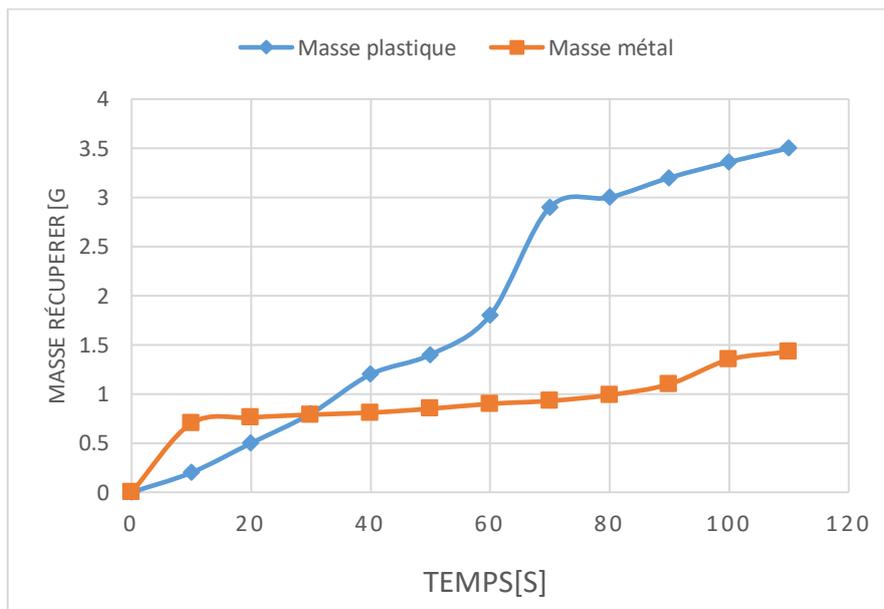
Figures 3-13 - Variation de la récupération du plastique en fonction du déphasage de la tension
($D=0,5$ g/s, $U=2$ kV).



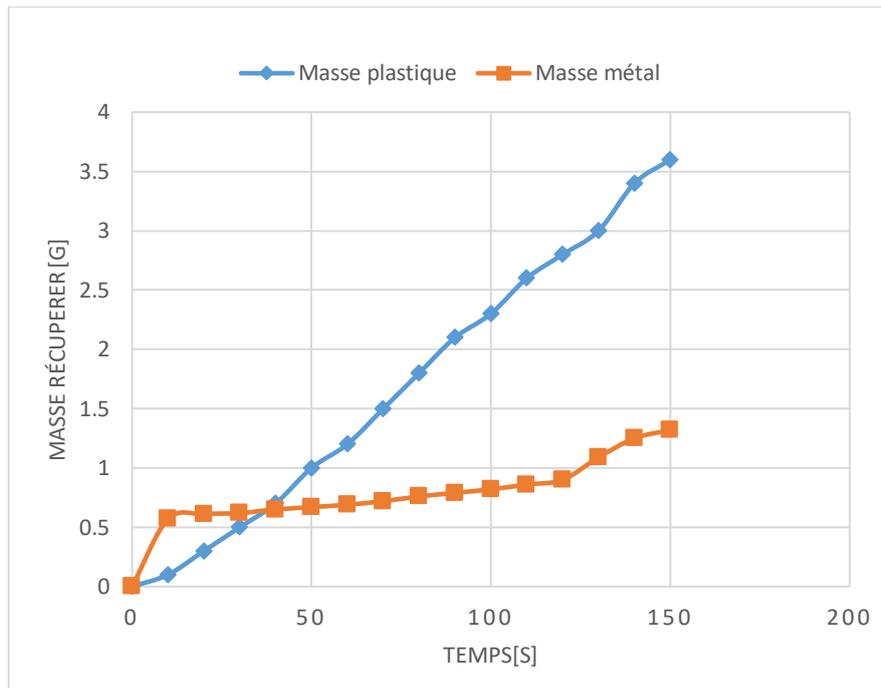
Figures 3-14 - Variation des masses récupérées en fonction de la fréquence du signal

3.6.4 Influence de la distance inter-électrodes :

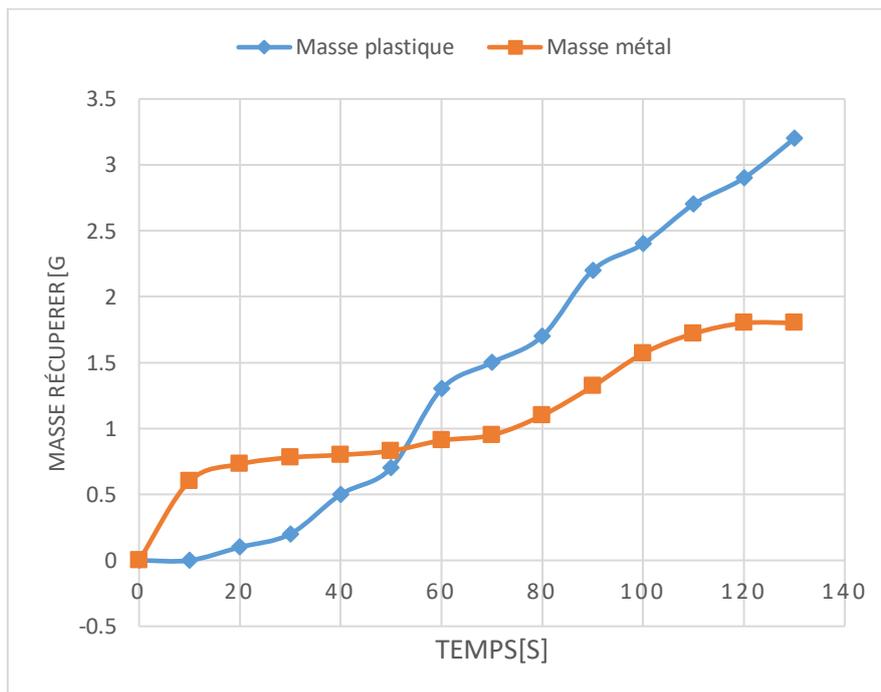
Le dernier partie, on a étudié est l'effet de la distance inter-électrodes. L'amplitude du signal haute tension carré est fixé à $U= 2 \text{ kV}$, le débit de particules $D=0,5 \text{ g/s}$ avec une masse du mélange égal à 5g. L'évolution de la masse séparer en fonction du temps représenter dans les figures 3-15 a, 3-15 b et 3-15 c, celles-ci demeurent, pratiquement, sensibles aux variations de distance inter-électrode. Les résultats obtenus montrent que la diminution de la distance donne de meilleurs résultats car le champ électrique augmente et les particules métalliques seront mieux ionisées.



a) d=1 mm



b) d=2 mm



c) d=3 mm

Figures 3-15 - Variation de la masse récupération en fonction de la distance inter-électrode (D=0,5 g/s, U=2 kV, f=200 Hz).

3.7. Conclusion:

Nous avons montré dans ce chapitre l'application d'une nouvelle force d'attraction exercée en particulier sur les granules conducteurs, que nous avons observé sur les convoyeurs à ondes mobiles. Cette force dépend de plusieurs facteurs, tels que le niveau et le déphasage de la tension, la fréquence et la distance inter-électrode. L'étude paramétrique montre la faisabilité d'une nouvelle technique de séparation d'un mélange comprenant des particules de métal et de plastique en utilisant un tel convoyeur.

CHAPITRE 4

Chapitre 4 : Étude expérimentale avec le convoyeur triphasé

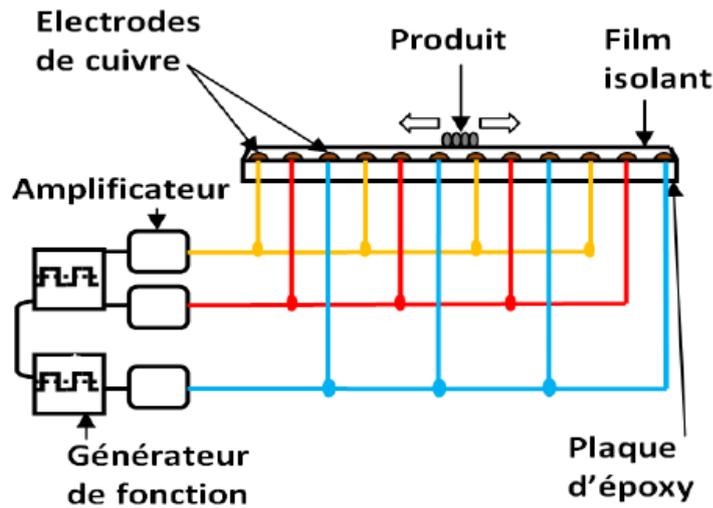
4.1. Introduction :

La micromanipulation des particules par la technique des ondes mobiles progressives est principalement influencée par les facteurs suivants : la géométrie du convoyeur, le type des particules et la force du champ électrique. Les convoyeurs constituent le moyen de base pour la génération d'un champ électrique contrôlable ainsi que pour le déplacement des particules. Les tensions multi-phrasées appliquées à un ensemble d'électrodes produisent l'onde mobile du convoyeur. Le champ électrique dynamique créé utilise les électrodes comme guide principal lorsqu'il est formé autour d'elles. Il est nécessaire de choisir la conception d'électrodes appropriée pour la tâche désirée afin de tirer la meilleure partie de la capacité de transport du convoyeur. Les équipements nécessaires pour le travail de recherche effectué dans ce chapitre concernant le transport des particules ainsi que leur séparation par la technique des ondes mobiles sont :

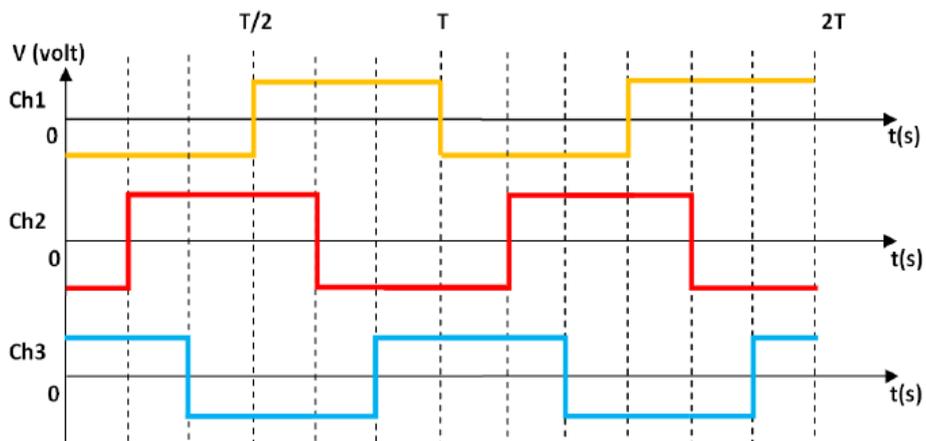
- Deux générateurs de fonction.
- Trois amplificateurs de haute tension.
- Convoyeurs à ondes mobiles à trois phases
- Câbles BNC.
- Balance de précision 1mg.
- Oscilloscope à quatre chaînes.
- Tamiseur
- Mesureur d'humidité ambiante
- Mesureur de charge électrique (Electromètre).

4.2. Convoyeur triphasé :

Le convoyeur à 3 phases, sur lequel sont tracées des électrodes en cuivre de 1 mm de largeur et de 126 mm de longueur, sont séparées par un intervalle égal à 2 mm (Fig. 4-1). Le schéma descriptif de la Fig. (4-1(a)) représente les connexions du convoyeur avec le système d'alimentation. Le déphasage est montré sur la Fig. (4-1(b)), tandis que les signaux appliqués aux électrodes sont montrés sur la Fig. (4-2)



a) Schéma descriptif du convoyeur triphasé.



b) Formes du signal appliqué aux électrodes

Figure 4-1 : Schéma descriptif d'un convoyeur à trois phases avec la disposition des trois signaux appliqués aux électrodes

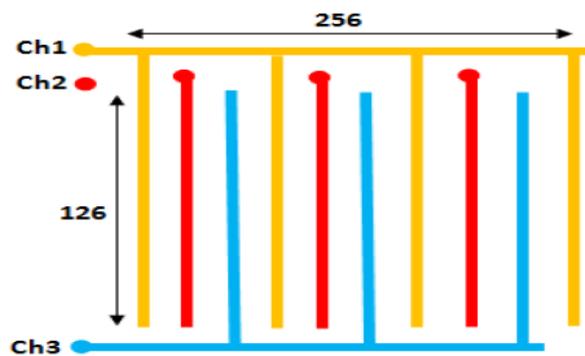


Figure 4-2- : Convoyeur triphasé

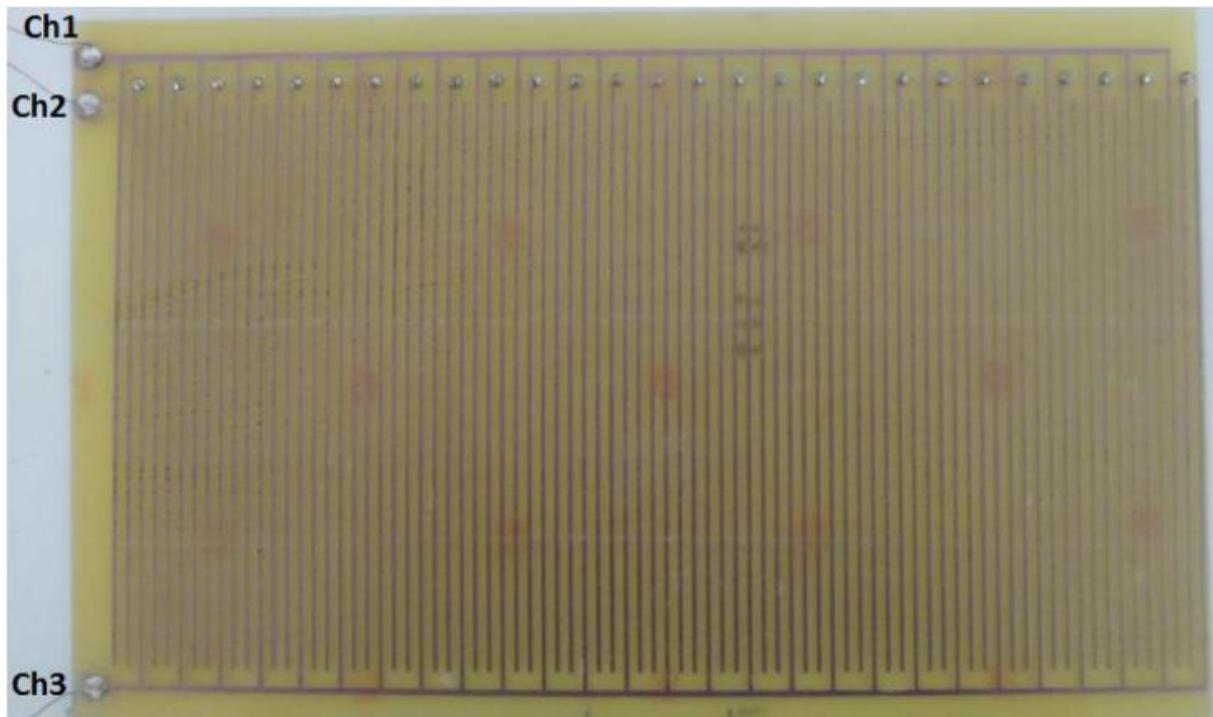


Figure 4-3 : Photographie du convoyeur triphasé

4.3. Mélange utilisé :

Les expériences ont été effectuées en utilisant le mélange granulaire provenant d'une carte électronique d'un téléviseur à tube cathodique concasser et broyer après tamisé avec un tamis de 1mm. La photographie montre le mélange quand vas utiliser dans tous les essais qui vont suivre.



Figure 4-4 : Photographie du mélange granulaire

4.4. Procédure expérimentale :

Le montage expérimental utilisé est montré à la Fig. (4-5) comprend principalement un convoyeur à ondes mobiles, des amplificateurs de HT et des générateurs de fonction. Chaque phase est alimentée par un amplificateur de tension (modèle Trek 2220, 2 kV - 20 mA). Le déphasage, la fréquence et le niveau de tension appliquée à chaque électrode peuvent être modifiés en utilisant deux générateurs de fonctions synchronisées (SDG Siglent 5122) qui contrôlent les amplificateurs. Les signaux carrés de tension alternative appliqués aux électrodes du convoyeur sont visualisés à l'aide d'un oscilloscope numérique à mémoire vive (Gwinstek GDS-3154).

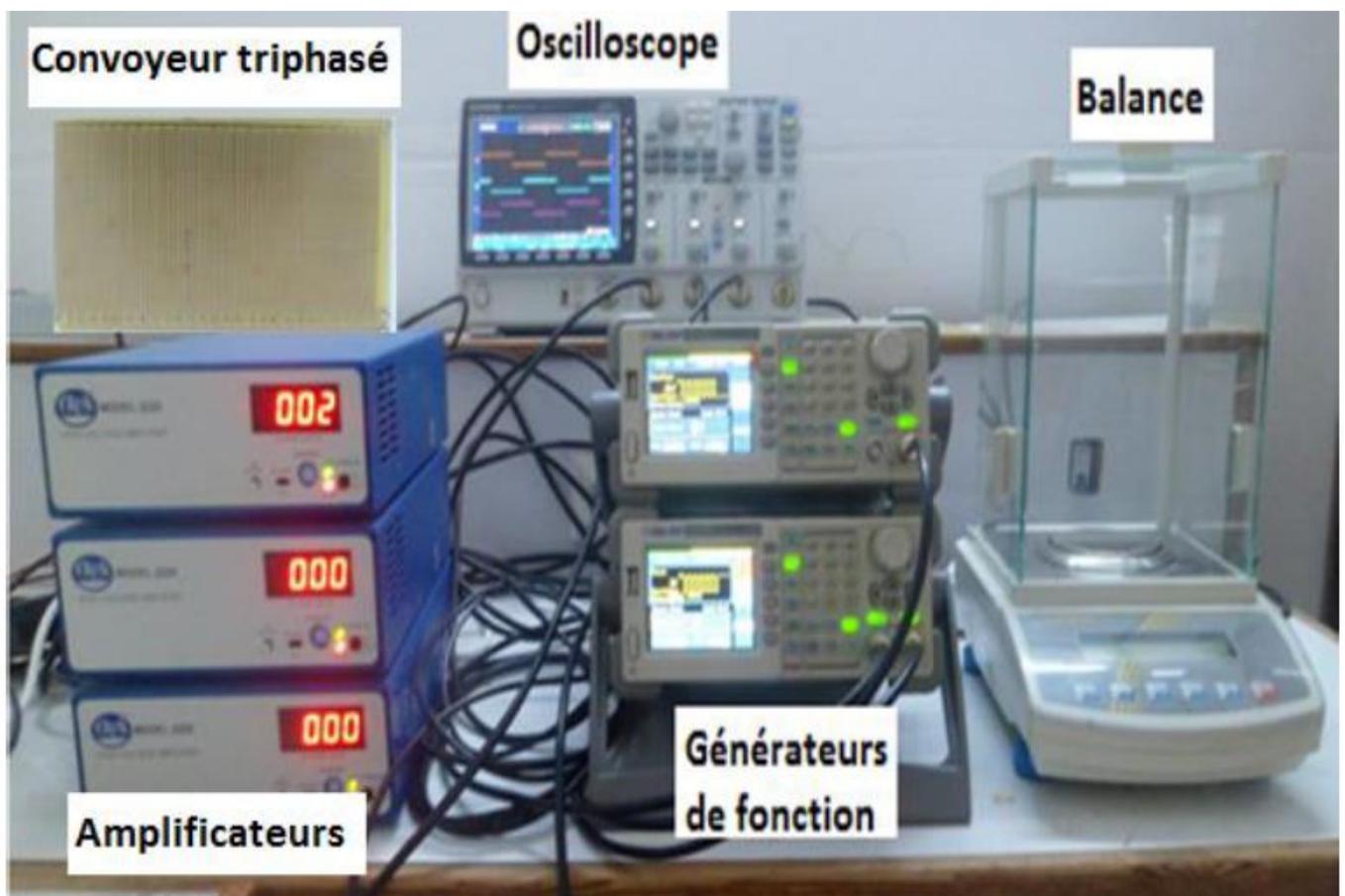


Figure 4-5: Photographie du dispositif expérimental utilisé

4.5. Types des collisions sur un convoyeur à ondes mobiles :

Avant d'aborder les résultats, il faut savoir que l'acquisition de charge tribo-électrique est un phénomène électrostatique présent dans le mouvement des particules. Il est causé par différentes collisions entre particules. L'acquisition de charge par effet triboélectrique se produit entre deux granules, leur contact cause l'apparition d'une charge électrique. Des charges électriques passent de l'une à l'autre, modifiant ainsi le nombre de charges contenues dans chacune des granules, ce qui les rend contrairement polarisées [61].

Le mouvement des particules isolantes dans les dispositifs à ondes mobiles successives implique trois types de collision : collision des particules de même matière, collision des particules de matière différente et collision entre les particules et la surface du convoyeur [62]. Le phénomène des ondes mobiles commence par deux types des collisions « particule /particule » de même matière et « particule/convoyeur »; cela est dû aux différents modes de déplacement pour le transport des particules. Pour ce qui est de la séparation de particules « PVC-Cuivre », le contact entre particules de matières différentes s'ajoutera aux deux autres.

4.5.1. Collision des particules de même matière :

Le transfert de charge entre deux corps de même matière de manière tribo-électrique a été écarté dans le modèle de Helmholtz. Cependant plusieurs recherches effectuées par de nombreux auteurs ont réussi à électriser positivement et négativement deux morceaux du même isolant frottés l'un contre l'autre (Fig. 4-6). Par exemple, Kawamoto a utilisé la méthode de chute libre, Les particules sont introduites au centre entre deux électrodes parallèles de signe opposé à travers une fente. Comme conclusion, il a été montré que dans un mélange de particules de même matière, il y a des particules chargées négativement et positivement [63] [65]. Ceci est inexplicable selon les idées et l'analyse de Helmholtz [64].

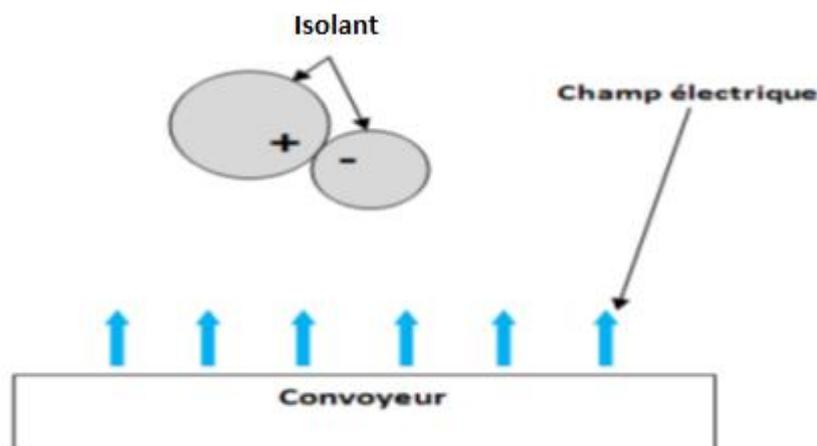


Figure 4-6 : Transfert de charge par collision entre deux particules de même nature

4.5.2. Collision des particules de matières différentes :

Lorsque deux matériaux différents sont mis en collision ils acquièrent des charges électriques de signe opposé. La polarité des charges dépend de nombreux facteurs, notamment l'ordre dans la série triboélectrique ; le dernier de la liste est le matériau le plus électronégatif, qui se charge négativement et vice versa (Fig. 4-7). Plus les deux matériaux dont il s'agit sont éloignés l'un de l'autre sur la liste, plus la charge qu'ils vont engendrer sera élevée. En réalité, cet ordre de séries n'est que très approximatif car il diffère souvent d'un auteur à l'autre. En effet, des facteurs externes peuvent facilement inverser les signes obtenus.

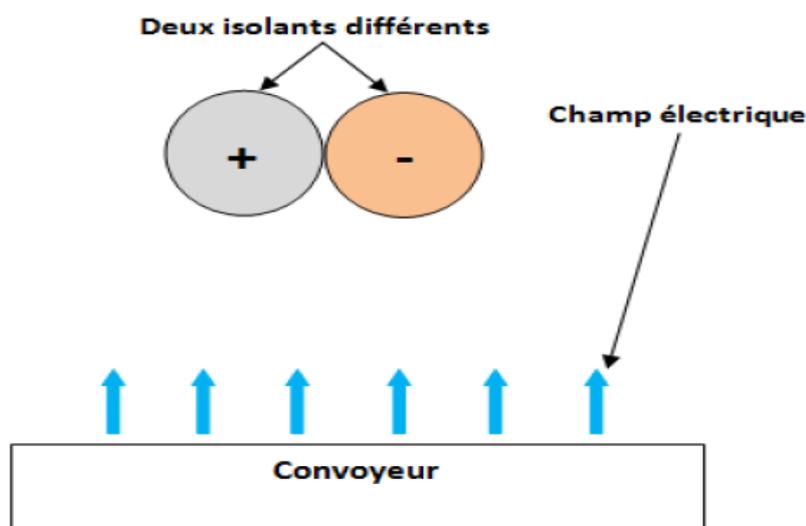


Figure 4-7 : Transfert de charge par collision entre deux particules de différente nature

4.5.3. Collision entre les particules et le film isolant du convoyeur :

Sur un dispositif à ondes mobiles successives, l'intensité de la collision « particule /convoyeur » augmente de façon significative lorsque la vitesse des ondes est élevée, ces collisions persistent et causent le chargement des particules. Ce phénomène ne s'arrête que lorsque les particules quittent le convoyeur. Sachant que le produit se déplace suivant trois modes de mouvement : Curtain, Surfing et Hopping mode, en particulier les deux derniers qui comportent un contact avec la surface du convoyeur. La Fig. (4-8) représente une description des collisions causées par les sauts répétitifs du Hopping mode ainsi que le frottement « granulé-convoyeur » du au glissement continue causé par le Surfing mode. Ce frottement « particules-convoyeur » produit évidemment un transfert de charge, le film isolant à tendance de se charger de signe opposé par rapport aux granules. En réalité, les signes peuvent s'inverser d'une manière facile et très surprenante, sous l'influence de facteurs tels que : l'électronégativité des matériaux, la rugosité de la paroi,...etc.

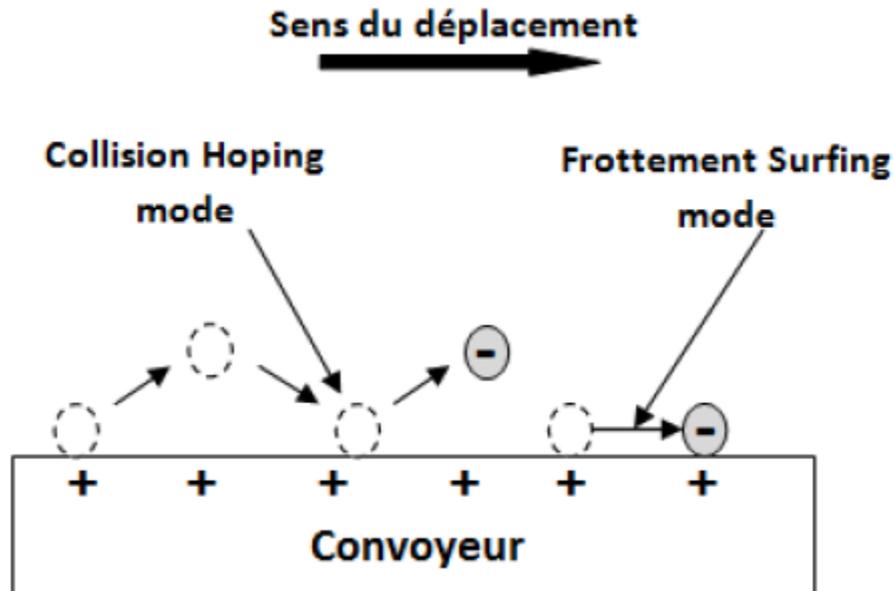


Figure 4-8 : Transfert de charge par collision et frottement entre une particule et le film isolant du convoyeur

4.5. 4. Charge électrique :

Un produit chargé et un autre moins chargé ne donnent pas le même résultat, la charge initiale des granules avant d'alimenter le dispositif a un impact significatif sur le mouvement. L'estimation de la charge a été faite en mesurant la charge des particules avant toute expérience. La cage de Faraday se présente comme deux récipients métalliques, l'un à l'intérieur de l'autre, isolé électriquement entre eux. Le récipient extérieur, relié à la terre, fait office de blindage contre les parasites extérieurs. La mesure de la charge électrique produite par les granules chargés, a été faite par une cage de Faraday et un électromètre de marque KEITHLEY, modèle 6514 (Fig. 4-9).

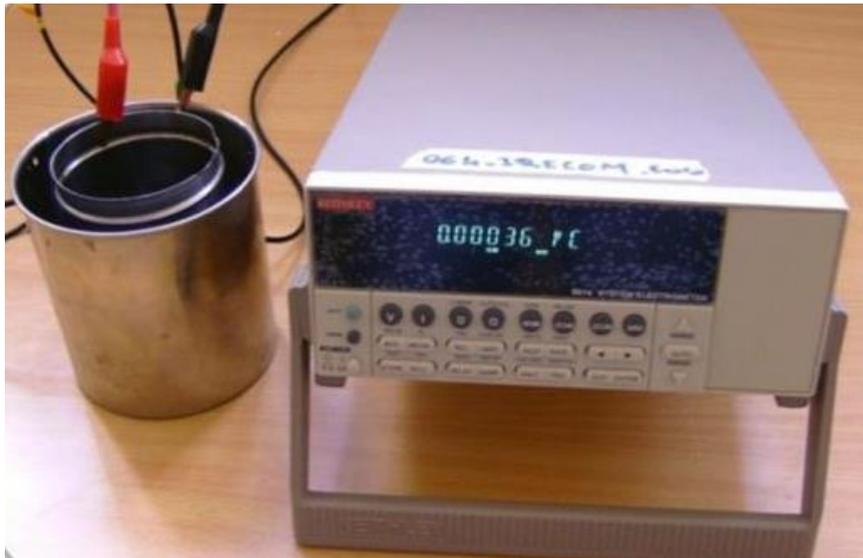


Figure 4-9 : Photographie de la cage Faraday et l'électromètre 6514.

L'ensemble des particules chargées sont mises à l'intérieur de la cage de Faraday puis on mesure la charge à l'aide de l'électromètre. Les résultats sont exprimés en termes de charge massique des échantillons (n C/g), celle-ci est mesurée après la séparation du mélange.

4.5.5 . Principe de la mesure de la charge électrique :

La mesure directe de la charge électrique est établie sur un même principe de base : un capteur relié à un appareil de mesure dont la base est un voltmètre. L'impédance d'entrée de ce voltmètre doit être la plus grande possible, afin d'éviter toute consommation de la part de ce dernier. Le cylindre de Faraday se présente comme un récipient métallique (d'ailleurs pas forcément cylindrique) à l'intérieur duquel on introduit les échantillons chargés (Fig.4-9). Ce récipient est placé dans un autre, métallique lui aussi, mais isolés l'un de l'autre. Le récipient extérieur est relié à la terre et fait office de blindage contre les parasites extérieurs. Pour mesurer la charge électrique d'un échantillon, il suffit de l'introduire dans le cylindre intérieur, en évitant tout contact prématuré, celui-ci étant relié à un dispositif de mesure (voltmètre). On mesure alors une charge globale, somme algébrique de toutes celles que porte l'échantillon, donnée par la relation suivante

$$Q=CV$$

(4-1)

4.6. Résultats obtenus et discussion :

4.6.1 Influence Amplitude du signal haute tension :

L'influence des paramètres électriques (fréquence, amplitude et humidité ambiante) ont été analysées. Le premier paramètre testé est l'effet de l'augmentation de la tension U appliquée au niveau du convoyeur, la tension a été variée pour évaluer l'efficacité de la séparation avec le dispositif triphasé et biphasé pour éclaircir la différence entre les deux.

Les Figures (4-10 et 4-11) représentent la variation de la récupération du métal et du plastique en fonction de la valeur de la tension appliquée pour les deux convoyeur triphasé et biphasé, pour une fréquence $f= 50$ Hz, débit $D=0,5$ g/s.

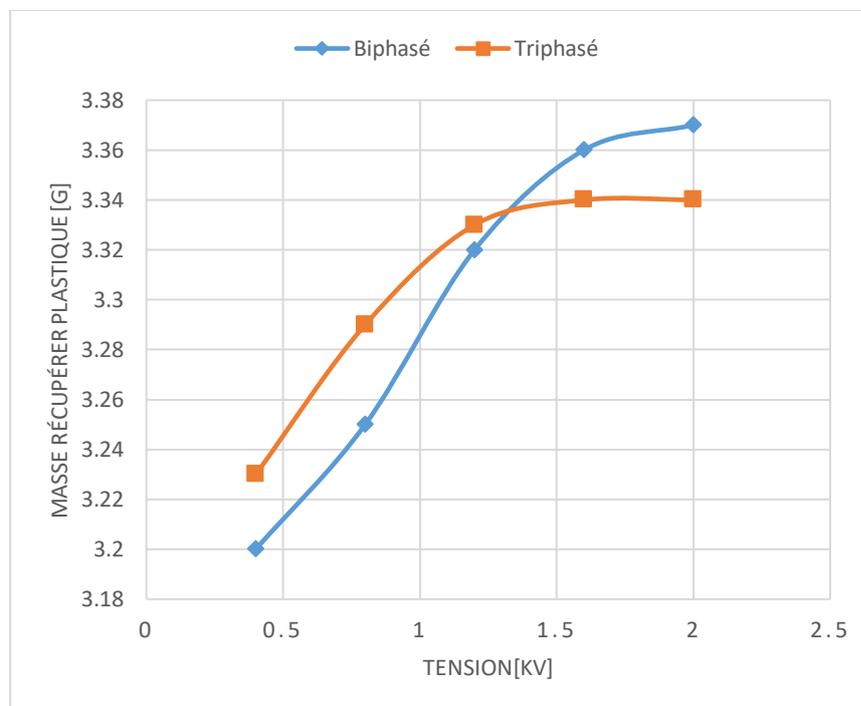


Figure 4-10 : Variation des masses de métal en fonction de la tension appliquée pour un convoyeur biphasé et triphasé

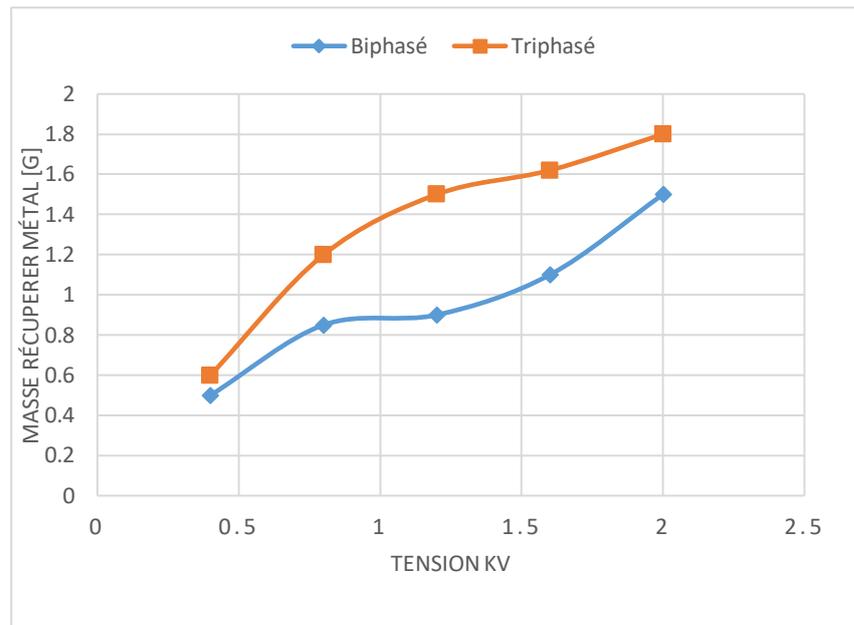


Figure 4.11 : Variation des masses de métal en fonction de la tension appliquée pour un convoyeur biphasé et triphasé

Pour les deux convoyeurs, il est clair que plus la tension appliquée est faible plus le rendement diminue, tandis que pour la tension 1,2 kV le résultat est meilleur que 1 kV et inférieur à celui de 1,4 kV. Cela est dû à l'influence de la tension sur la force de Colomb et la force diélectrophorétique comme décrit dans le chapitre I. La valeur élevée de ces deux forces leurs permettent de l'emporter sur la force d'opposition qui est la force de gravité.

Il y'a une différence de mouvement des granulés entre les deux convoyeurs utilisés, le transport dans le cas du convoyeur triphasé est unidirectionnel et instantané tandis que pour le convoyeur biphasé le mouvement est intermittent.

Pour des tensions supérieures à 1,4 kV des étincelles apparaissent entre les électrodes qui provoquent un court-circuit et endommagent le convoyeur.

4.6.2 Influence de la fréquence du signal haute tension :

La valeur du champ électrique joue un rôle très important car il s'agit de la valeur qui affecte les forces électriques. La deuxième partie été consacrer à l'étude de l'effet de la fréquence du signale utilisée sur un produit de taille moyenne inférieur à 1 mm, pour un convoyeur triphasé et un convoyeur biphasé dont on a choisi une tension $U=1.4$ kV.

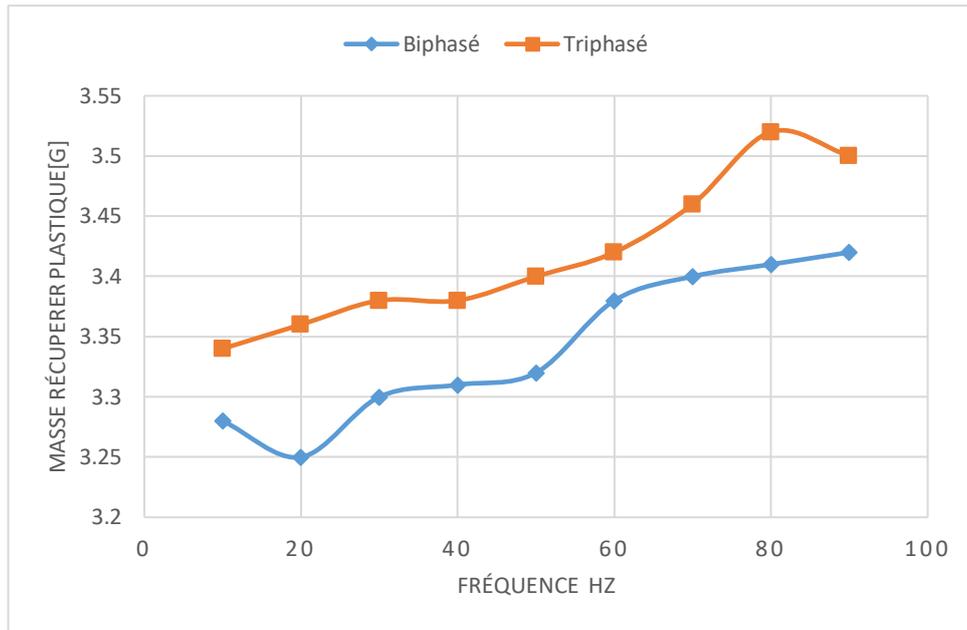


Figure 4-12 : Variation de la récupération du plastique en fonction de la fréquence du signal

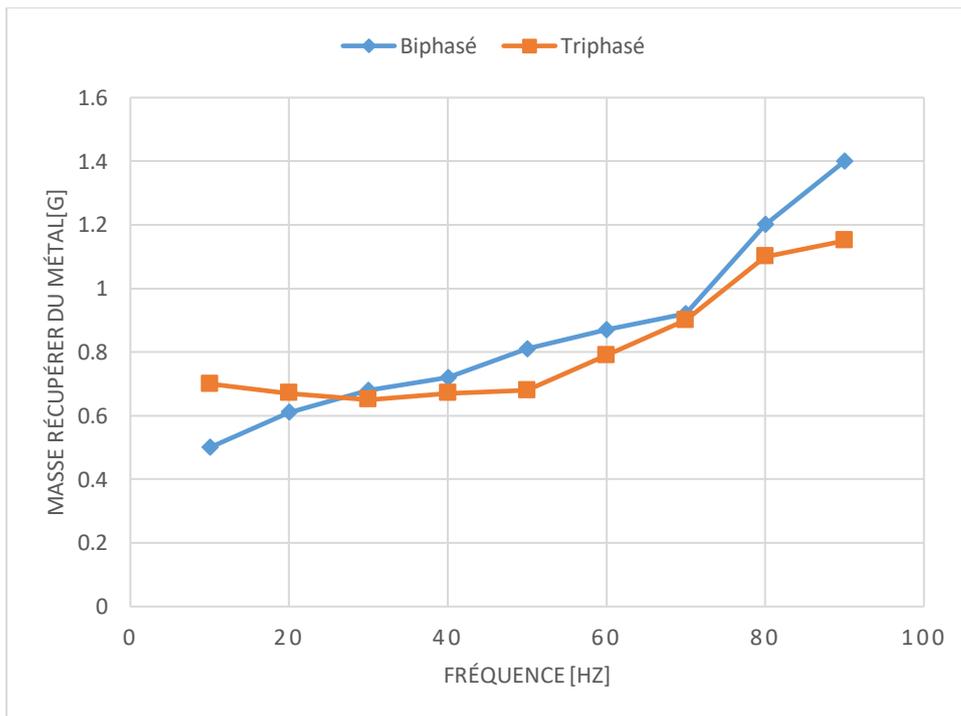


Figure 4-13 : Variation des masses récupérées du métal en fonction de la fréquence du signal

L'évolution de la masse récupérée du métal et du plastique est donnée par la Figure (4-12 et 4-13) et celles-ci demeurent, pratiquement, insensibles aux variations de la fréquence du signal appliqué. Les résultats obtenus montrent que dans la gamme des valeurs de la fréquence utilisée, la fréquence n'a pas une influence significative sur la force d'attraction.

4.6.3 Influence de l'humidité ambiante :

L'humidité ambiante influe sur les résultats obtenus entre des jours différents, avec les mêmes paramètres les résultats peuvent être différents. Il faut toujours la mesurer avant chaque expérience. La Fig. (4-14 ,4-15, 4-16 et 4-17) montre son influence sur un convoyeur triphasé et biphasé avec le paramétrage suivant :

- Biphase : fréquence 80 Hz, Humidité 50% et 30% et pour une gamme de Tension de 1 à 1.6 kV.

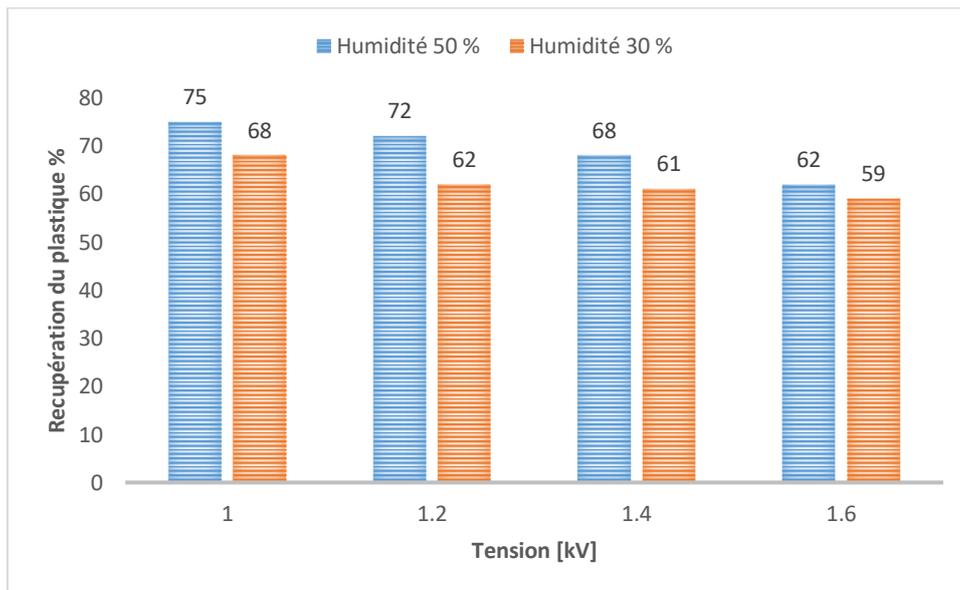


Figure 4-14 : La récupération du plastique en fonction de l'humidité ambiante (convoyeur biphasé)

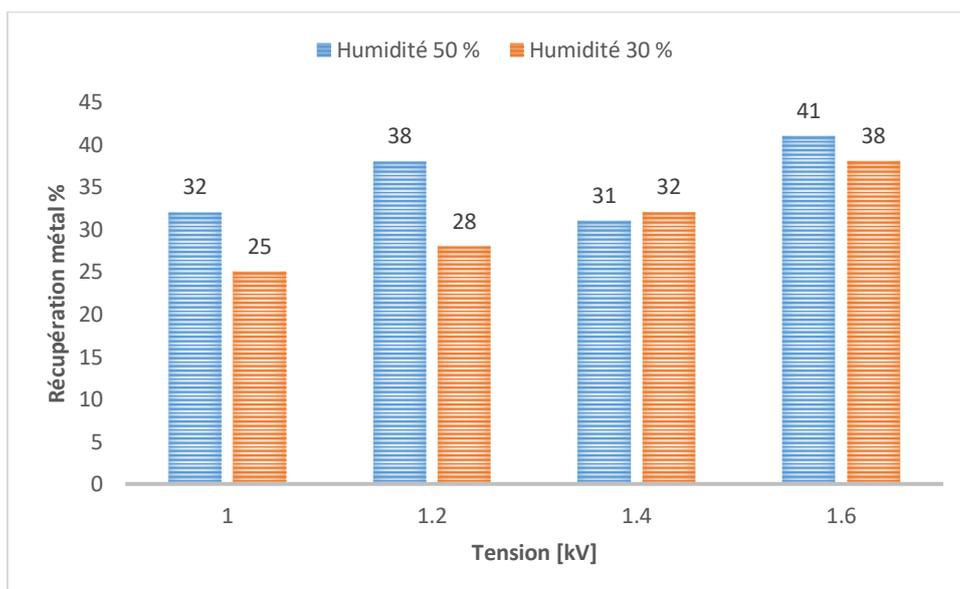


Figure 4-15 : La récupération du métal en fonction de l'humidité ambiante (convoyeur biphasé)

- Triphasé : fréquence 80 Hz, Humidité 50% et 30% et pour une gamme de Tension de 1 à 1.6 kV.

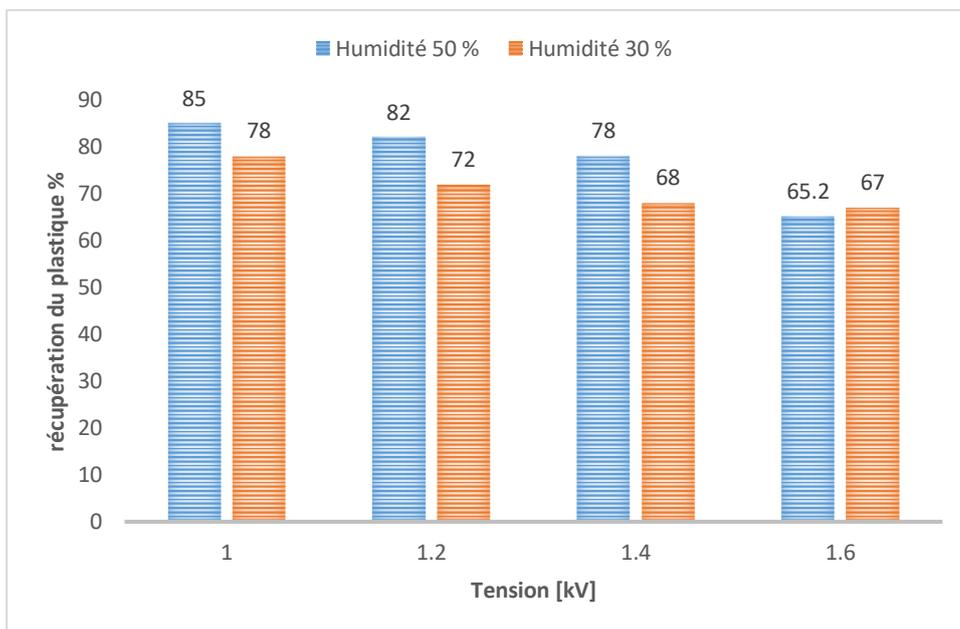


Figure 4-16 : La récupération du plastique en fonction de l'humidité ambiante (convoyeur triphasé)

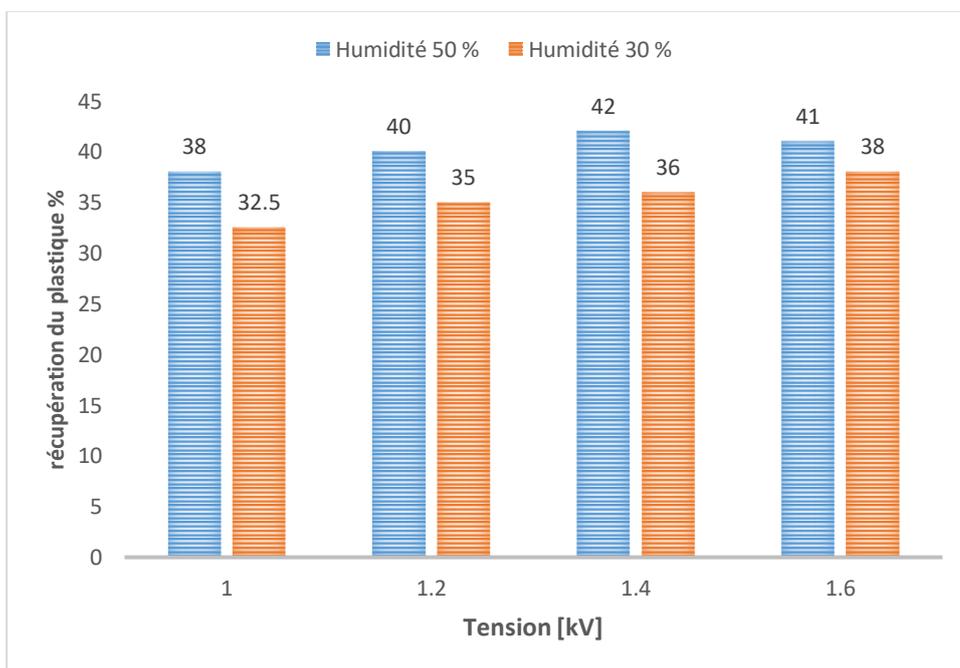


Figure 4-17 : La récupération du métal en fonction de l'humidité ambiante (convoyeur triphasé)

Il est clair que l'humidité ambiante joue un rôle très important, pour le convoyeur triphasé la différence pour le plastique varie est de 85% à 65% pour une humidité de 50 %, de 78% à 67% pour une humidité de 30 %; tandis que pour le métal la différence varie est de 38% à 41% pour une humidité de 50 %, de 32.5% à 38% pour une humidité de 30 %. Presque 10% de marge dans le rendement, un écart non négligeable. Concernant le biphasé, le résultat est un peu inférieur, de 75% à 62% pour 50% et de 68% à 59% pour 30 % pour le plastique et pour le métal, de 32% à 41% pour 50% et de 25% à 38% pour 30 % un écart de 7% a peut prés.. Comment l'humidité influe sur le comportement des particules ? L'explication est dans la relation entre les forces capillaires, d'adhésion et les valeurs de l'humidité ambiante ; C'est-à-dire que plus les particules ne se collent entre elles plus la force d'image ne retient certaines particules sur le film isolant avec des valeurs importantes d'humidité, à cause des ponts d'eau qui existent entre les particules qui forment des macro-particules, plus persistants et résistants.

4.7 Conclusion :

Le déplacement des particules micronisées avec la technique des ondes mobiles nécessite un certain réglage pour obtenir des résultats optimaux. Nous avons montré que les paramètres qui influent sur le déplacement des particules sur les convoyeurs sont : fréquence, tension, humidité ambiante, charge des particules pour une taille moyenne inférieure à 1 mm.

Nous avons étudié dans ce chapitre la force d'attraction appliquée par les rideaux électriques biphasé et triphasé avec des espaces inter-électrodes de 2 mm.

Les séries d'essais que nous avons effectués montrent que :

- (1) La force d'attraction appliquée par un rideau électrique à trois phases est plus importante que celle appliquée par un rideau électrique à deux phases.
- (2) l'humidité influe sur le comportement des particules.
- (3) Le champ électrique appliqué par un signal de forme carrée génère une force d'attraction plus grande que les autres formes de tension.

CONCLUSION

GÉNÉRALE

Conclusion générale :

La séparation des matériaux granulaires représente aujourd'hui un domaine important d'application industrielle de l'électrostatique. Historiquement, elle était principalement développée pour la purification de substances minérales et de produits agricoles. Par la suite, l'étude théorique, l'analyse numérique par ordinateur et surtout l'expérimentation ont tracé le chemin pour plusieurs autres applications industrielles, notamment dans le domaine du recyclage des déchets industriels.

L'objectif principal de ce travail de mémoire été d'analyser le déplacement des particules micronisées d'un mélange provenant des cartes électronique des téléviseurs à tube cathodique broyé, et de voir la faisabilité de la séparation des particules de taille inférieure à 1 millimètre, en utilisant la technique des ondes mobiles. Pour cela nous avons jugé utile de présenter l'état de l'art en axant sur la technique des ondes mobiles et les applications de séparation électrostatique.

Au niveau du laboratoire de recherche APELEC de l'université DJILALI LIABES de Sidi Bel Abbes, nous avons réalisé des essais expérimentaux pour deux différents types de convoyeurs : biphasé, triphasé. Nous avons remarqué que la tension, la fréquence du signal ainsi que le déphasage propre à chaque type de convoyeur sont les facteurs électriques les plus importants pour la création des ondes mobiles. L'humidité ambiante et la valeur de la charge massique des particules sont les facteurs les plus influents pour des rendements élevés et des résultats satisfaisants.

La faisabilité de la séparation des déchets des équipements électroniques et des équipements électriques sous forme de particules granulaires micronisées (mélanges plastique / métal) par la technique des ondes mobiles a été confirmée par des résultats expérimentaux.

Nous espérons que dans un proche avenir, notre travail soit amélioré et soit la base pour d'autres études dans le domaine de la recherche sur les modes de séparation électrostatique.

Bibliographie:

- [1] Lawver, J.E., Dyrenforth, W.P. "Electrostatic separation". In: *Electrostatics and Its Applications*. A.D. Moore (Editor). New York, John Wiley&Sons, 221-249, 1973.
- [2] Lee, L.H. "Dual mechanism for metal polymer contact electrification". In: *Journal of Electrostatics*. 32(1), 1-29 (1994).
- [3] Nicoara, Simona, Calin, L., Iuga, A., Serban, N. "Considerations on triboelectrostatic separation of plastic material for recycling purpose". In: *Environment and Progress*. 6, 341- 346, (2006).
- [4] Ralston, O.C. *Electrostatic Separation of Mixt Granular Solids*. Amsterdam, Elsevier, pp.162-172, (1961).
- [5] Schmoutziguer, W.S., Mcgovern, J.J. "Tribocharging in separating apparatus". Outokumpu, Patent No: GB 2 351 928, 2001.
- [6] Stencel, J.M., Schaefer, J.L., Neathery, J.K., Ban, H., Finseth, D. "Electrostatic particle separation system, apparatus, and related method". US Patent No: 6 498 313, 2002.
- [7] Taylor, D.M., Secker, P.E. *Industrial Electrostatics: Fundamentals and Measurements*. New York, John Wiley&Sons, pp. 82-104, (1994).
- [8] Dascalescu, L., Dragan, C., Bilici, M., Beleca, R., Hemery, Y., Rouau, X., "Electrostatic Bases for Separation of Wheat Bran Tissues". In: *IEEE Transactions and Industry Applications*, 46, 659 – 665, (2010).
- [9] American Plastics Council. "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*. (2000).
- [10] Association of Plastics Manufactures in Europe. "Insight into consumption and recovery in Western Europe 2000".
- [11] HG 448/2005 on Waste Electric and Electronic Equipment. Romanian Government Decision.
- [12] Inculet, I.I., Castle, G.S.P., Brown, J.D. "Electrostatic separation of plastics for recycling". In: *Particulate Science and Technology*, 16(1), 91-100, (1998).
- [13] Felici. N., "Diélectriques", Institut Polytechnique, Grenoble, 1966.
- [14] Dupuy. J., "Effet de couronne et champs ionisés", *Revue Générale d'Électricité*, 67, 2, pp. 85-104, 1958.
- [15] Franck Dernoncourt, Elisabeth Métails« La logique Floue :le raisonnement humain au cœur du système décisionnel ; Mémoire de NFE211 Ingénierie des systèmes décisionnels Conservatoire National des Arts et Métiers.

- [16] Ralston, O.C. « *Electrostatic Separation of Mixt Granular Solids* ». Amsterdam, Elsevier, pp.162- 172, (1961).
- [17] Schmoutziguer, W.S., Mcgovern, J.J. “*Tribocharging in separating apparatus*». Outokumpu, Patent No: GB 2 351 928, 2001.
- [18] Stencil, J.M., Schaefer, J.L., Neathery, J.K., Ban, H., Finseth, D. « Electrostatic particle separation system, apparatus, and related method ». US Patent No: 6 498 313, 2002.
- [19] Lee, L.H. « Dual mechanism for metal polymer contact electrification ». Journal of Electrostatics. 32(1), 1-29 (1994).
- [20] Dascalescu, L., Dragan, C., Bilici, M., Beleca, R., Hemery, Y., Rouau, X., « Electrostatic Bases for Separation of Wheat Bran Tissues ». In: IEEE Transactions and Industry Applications, 46, 659 – 665, (2010).
- [21] A.Samuila, M.Mihailescu, A.Iuga, R. Morar, R.Tobazeon, L.Dascalescu « recyclage des matériaux isolants en fin de vie. Technologies basées sur la séparation électrostatique ».
- [22] I.I. Inculet, G.S.P. Castle, J.D. Brown « Electrostatic separation of plastics for recycling ». Particulate Sci. Technol. 16 (1998) 91e100.
- [23] L. Dascalescu, A. Iuga, R. Morar « Electrostatic Technologies for the Recycling of, Non-ferrous Metals and Plastics from Wastes.
- [24] Hansruedi Buhler « Réglage par logique floue collection électricité presse polytechnique et universitaire ». Romande 1994.
- [25] M. Younes, A.Tilmatine, K.Medles, M.Rahli, A.Samuila and L.Dascalescu « Simulation des trajectoires des particules métalliques dans le séparateur couronne électrostatique à tambour ». ACATA ELECTROTEHNICA Mediamira Science Publisher Academy Of Technical Science of Cluj-Napoca, vol, 47, number 1, 2006 ISSN 1841-3323 Romania.
- [26] Chen, Longwen. "Etude Expérimentale de la décharge couronne pour le traitement de l'air intérieur: COV et particules." PhD diss., Université Grenoble Alpes, 2018.
- [27] Masuda S, Kamimura T. Approximate methods for calculating a non-uniform travelling field. Journal of Electrostatics. 1975 Nov 1;1(4):351-70.
- [28] Masuda S, Matsumoto Y. Contact-type electric curtain for electrodynamic control of charged dust particles. In Proc. 2nd Int. Conf. on Static Electricity, Frankfurt 1973 Mar (No. 72, pp. 1370-09).
- [29] Ford CL, Winzor DJ. Experimental tests of charge conservation in macromolecular interactions. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects. 1983 Mar 15;756(1):49-55.
- [30] Niino T, Egawa S, Nishiguchi N, Higuchi T. Development of an electrostatic actuator exceeding 10 N propulsive force. In [1992] Proceedings IEEE Micro Electro Mechanical Systems 1992 Feb 4 (pp. 122-127). IEEE.

- [31] Melcher. J.R., "Electric fields and forces in semi- insulating liquids," *Journal of Electrostatics*, vol. 2, 1976, pp. 121-132.
- [32] Pohl. A. H., Pollok. K. et Crane. J. S., "Dielectrophoretic force: a comparison of theory and experiment", *Journal of biological physics*, vol. 6, pp. 133-160, 1979.
- [33] Masuda. S., Fujibayashi. K., Ishida. K. and Inaba. H., "Confinement and transportation of charged aerosol clouds via electric curtain", *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 92, No. 1, pp. 43-52, 1972.
- [34] Tarek Diab. O., and Nouiri. A., "Protection des panneaux solaires", 2014.
- [35] Pethig R. Dielectric and electrical properties of biological materials. *Journal of Bioelectricity*. 1985 Jan 1;4(2):vii-ix.
- [36] Müller T, Gerardino A, Schnelle T, Shirley SG, Bordoni F, De Gasperis G, Leoni R, Fuhr G. Trapping of micrometre and sub-micrometre particles by high-frequency electric fields and hydrodynamic forces. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 1996 Feb 14;29(2):340.
- [37] Pang H. Depoussierage électrostatique pour les particules submicroniques en atmosphère usuelle (terre) et raréfiée (planète mars) (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I , 2006.
- [38] Mazumder M, Horenstein MN, Stark JW, Girouard P, Sumner R, Henderson B, Sadder O, Hidetaka I, Biris AS, Sharma R. Characterization of electrodynamic screen performance for dust removal from solar panels and solar hydrogen generators. *IEEE Transactions on industry applications*. 2013 Apr 16;49(4):1793-800.
- [39] Kawamoto H. Some techniques on electrostatic separation of particle size utilizing electrostatic traveling-wave field. *Journal of Electrostatics*. 2008 Mar 1;66(3-4):220-8.
- [40] Masuda S, Washizu M, Iwadare M. Separation of small particles suspended in liquid by nonuniform traveling field. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1987 May(3):474-80.
- [41] Adachi. M., Moroka. H., Kawamoto. H., Wakabayashi. S., Hoshino. T., "Particle-size sorting system of lunar regolith using electrostatic traveling wave", *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics*, 2016.
- [42] Kawamoto H, Uchiyama M, Cooper BL, McKay DS. Mitigation of lunar dust on solar panels and optical elements utilizing electrostatic traveling-wave. *Journal of Electrostatics*. 2011 Aug 1;69(4):370-9.
- [43] Kawamoto. H., Seki. K. and N. Kuromiya. N., "Mechanism of travelling-wave transport of particles", *Journal of Physics D: Applied Physics* 39, pp. 1249-1256, 2006.
- [44] Calle CI, Buhler CR, Mantovani JG, Clements S, Chen A, Mazumder MK, Biris AS, Nowicki AW. Electrodynamic shield to remove dust from solar panels on Mars. *InProceedings of the 41st Space Congress 2004 Apr 27*.

- [45] Séguin. M. , Descheneau. J. , Tardif. B., “Ondes et physique moderne”, Physique XXI, Tome C, 2010.
- [46] Fearing RS. Survey of sticking effects for micro parts handling. InProceedings 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human Robot Interaction and Cooperative Robots 1995 Aug 5 (Vol. 2, pp. 212-217). IEEE.
- [47] « The history of the printed circuit », Ken Gilleo, Printed Circuit Fabrication, janvier 1999, vol. 22, no 1.
- [48] PROCESS AND MECHANISM FOR THE PRODUCTION OF ELECTRIC HEATERS, brevet US1256599 [archive]
- [49] Electrical apparatus and method of manufacturing the same brevet US1563731 [archive].
- [50] « NF C93-713 Janvier 1989 : Composants électroniques - Cartes imprimées - Prescriptions générales » [archive], sur boutique.afnor.org, janvier 1989 (consulté le 25 mai 2020).
- [51] Jean-Pierre Josse, « Quelques bonnes pratiques pour la conception de circuits imprimés *rapides* » [archive], sur electronique-mag.com, novembre 2013 (consulté le 27 juillet 2019).
- [52] a et b « L'avantage des normes IPC dans la fabrication des cartes électroniques - Partie 2 : Les circuits imprimés » [archive], sur electronique-mag.com, juin 2012 (consulté le 27 juillet 2019).
- [53] « IPC Fact Sheet - French » [archive], sur ipc.org (consulté le 27 juillet 2019).
- [54] Didier Girault, « Circuits imprimés : une version française de la norme IPC-6012C » [archive], sur electroniques.biz, 17 janvier 2013 (consulté le 27 juillet 2019).
- [55] Landis GA, Jenkins PP. Dust mitigation for mars solar arrays. InConference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002. 2002 May 19 (pp. 812-815). IEEE.
- [56] Mazumder M, Horenstein M, Stark J, Hudelson JN, Sayyah A, Heiling C, Yellowhair J. Electrodynamic removal of dust from solar mirrors and its applications in concentrated solar power (CSP) plants. In2014 IEEE Industry Application Society Annual Meeting 2014 Oct 5 (pp. 1-7). IEEE.
- [57] Lean MH, Volkel AR, Hsieh HB, Lu JP, Daniel JH, Preas BT, Limb SJ. Traveling wave bio- agent concentrator. In2005 3rd IEEE/EMBS Special Topic Conference on Microtechnology in Medicine and Biology 2005 May 12 (pp. 80-83). IEEE.

- [58] Zouaghi A, Zouzou N, Dascalescu L. Assessment of forces acting on fine particles on a traveling-wave electric field conveyor: Application to powder manipulation. *Powder Technology*. 2019 Feb 1;343:375-82.
- [59] Mahi I, Messafeur R, Belgacem A, Bellebna Y, Louati H, Tilmatine A. New separation method of metal/plastic micronized particles using travelling wave conveyors. *International Journal of Environmental Studies*. 2018 Sep 3;75(5):788-99.
- [60] Hywel. M., Izquierdo. A. G., Bakewell. D., Green. N. G., and Ramos. A., "The dielectrophoretic and travelling wave forces generated by interdigitated electrode arrays: analytical solution using Fourier series", *Journal of Physics D: Applied Physics* 34, no. 10 (2001): 1553.
- [61] J. Ferreira, *Cours d'Electrostatique-Electrocinétique*, université Joseph Fourier, P. 23, 2001-2002
- [62] M. Miloudi, K. Medles, W. Aksa, A. Tilmatine, M. Brahamiet L. Dascaluscu, "Association et optimisation de deux nouveaux procédés de chargement tribo-électrique et de séparation électrostatique pour les particules isolantes", *Ajot Algerian journal of technologie*, 8^{ème} conférence nationale sur la haute tension CNHT, P. 276-281, 2011.
- [63] M. Adachi, H. Moroka, H. Kawamoto, S. Wakabayashi, T. Hoshino, "Particle-Size Sorting System of Lunar Regolith Using Electrostatic Traveling Wave", *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics* 2016.
- [64] J. Lang, H. Shuanshui and S. Kemin, "Separation of the Helmholtz equation in prolate spheroidal coordinates", *Journal of applied physics*, 56(5): P. 1532–1535, 1984.
- [65] H. Kawamoto, K. Seki and N. Kuromiya, "Mechanism of travelling-wave transport of particles", *Journal of physics D: Applied Physics* 39, pp. 1249-1256, 2006.

Chapitre I

Figure 1.1 : Charge électrique.

Figure 1.2 : Electrode couronne à pointe.

Figure 1.3 : Mécanisme d'une décharge couronne à polarité négative.

Figure 1.4 : Représentation schématique d'une décharge couronne : avalanche électronique et formation de la couronne lumineuse.

Figure 1.5 : Développement d'une avalanche électronique.

Figure 1.6 : Charge par influence ou induction.

Figure 1.7 : Transfert de charge à partir de la terre vers le corps A sous l'effet de l'induction du corps chargé B sur le corps A.

Figure 1.8 : Charge fictive permettant de calculer la force d'attraction entre la particule isolante chargée contre une surface conductrice.

Figure 1.9 : Séparateur électrostatique CARPCO.

Figure 1.10 : Séparateur électrostatique conducteur-isolant en simulation de fonctionnement.

Figure 1.11 : Schéma illustratif décrivant le principe de fonctionnement du vibro-transporteur.

Figure 1.12 : Différents types d'électrode couronne (La longueur L varie bien entendu du modèle de laboratoire ($L \approx 100$ mm) modèle industriel ($L \geq 500$ mm)).

Figure 1.13 : L'électrode statique d'un séparateur à tambour.

Figure 1.14 : Électrode cylindrique.

Figure 1.15 : Schéma du collecteur de particules à plusieurs compartiments.

Figure 1.16 : **a :** Electro-séparateur à courroie tournante.

b : Electro-séparateur à plan incliné .

Figure 1.17 : Schéma de principe d'un DBD simple .

Figure 1.18 : Principe de déroulement d'une DBD.

Figure 1.19 : Déplacement de l'onde mobile.

Figure 1.20 : Convoyeur à ondes mobiles biphasé.

Figure 1.21 : Section transversale d'un rideau électrique triphasé.

Figure 1.22 : Schématisation de l'onde mobile du convoyeur biphasé.
Particule repoussée par l'électrode négative et attirée par l'électrode positive.

Figure 1.23 : Force de coulomb entre deux particules sphériques chargées.

Figure 1.24 : Vue latérale de la force capillaire.

Figure 1.25 : Des interactions dipôle permanent - dipôle permanent.

Figure 1.26 : Des interactions dipôle permanent – dipôle induit.

Chapitre II

Figure 2.1 : Télévision à Tube Cathodique.

Figure 2.2 : Circuit imprimé.

Figure 2.3 : Circuit imprimé simple face.(La couche conductrice est visible par transparence.)

Figure 2.4 : Circuit imprimé double face.

Figure 2.5 : Circuit imprimé multicouches à quatre couches.

Figure 2.6 : Balance digitale GM-500.

Figure 2.7 : Amplificateur de tension (TREK, Modèle 2220).

Figure 2.8 : Générateur de fonction Siglent SDG 5122.

Figure 2.9 : Oscilloscope à mémoire.

Figure 2.10 : Transformateur HT à point milieu.

Figure 2.11 : Le Broyeur BM400.

Figure 2.12 : Photographie du tamiseur FRITSCH.

Figure 2.13 : Photographie du mélange granulaire.

Figure 2.14 : Comportement d'une particule électrique soumise à un champ électrique uniforme (a) et non uniforme (b).

Figure 2.15 : Dimensions des convoyeurs à ondes mobiles biphasé.

Figure 2.16 : Convoyeur à ondes mobiles triphasé.

Chapitre 3

Figure 3.1 : Dimensions des convoyeurs à ondes mobiles biphasé.

Figure 3.2 : Photographie du mélange granulaire.

Figure 3.3 : Formes du signal utilisé dans les essais.

Figure 3.4 : Les deux niveaux d'un signal carré.

Figure 3.5 : Convoyeur biphasé(a) Schéma descriptif de l'alimentation du convoyeur biphasé (b) Forme du signal appliqué aux électrodes (Déphasage de 180°).

Figure 3.6 : Variation de la récupération en fonction de la tension appliquée
($D=0,5$ g/s, $f= 50$ Hz et $d=1$ mm).

Figure 3.7 : Variation des masses de métal et plastique en fonction de la tension appliquée
($D=0,5$ g/s, $f= 50$ Hz et $d=1$ mm).

Figure 3.8: Variation de la récupération en fonction de la fréquence du signal
($D=0,5$ g/s, $U=2$ kV et $d=1$ mm).

Figure 3.9 : Variation des masses récupérées en fonction de la fréquence du signal.

Figure 3.10 : Configurations du convoyeur.

Figure 3.11 : Variation de la récupération du métal en fonction du déphasage de la tension
($D=0,5$ g/s, $U=2$ kV).

Figure 3.12 : Variation de la récupération du plastique en fonction du déphasage de la tension
($D=0,5$ g/s, $U=2$ kV).

Figure 3.13 : Variation des masses récupérées en fonction de la fréquence du signal.

Figure 3.14 : Variation de la masse récupération en fonction de la distance inter-électrode
($D=0,5$ g/s, $U=2$ kV, $f=200$ Hz).

Chapitre 4

Figure 4.1 : Schéma descriptif d'un convoyeur à trois phases avec la disposition des trois signaux appliqués aux électrodes.

Figure 4.2 : Convoyeur triphasé.

Figure 4.3 : Photographie du convoyeur triphasé.

Figure 4.4 : Photographie du mélange granulaire.

Figure 4.5 : Photographie du dispositif expérimental utilisé.

Figure 4.6 : Transfert de charge par collision entre deux particules de même nature.

Figure 4.7 : Transfert de charge par collision entre deux particules de différente nature.

Figure 4.8 : Transfert de charge par collision et frottement entre une particule et le film isolant du convoyeur.

Figure 4.9 : Photographie de la cage Faraday et l'électromètre 6514.

Figure 4.10 : Variation des masses de métal en fonction de la tension appliquée pour un convoyeur biphasé et triphasé.

Figure 4.11 : Variation des masses de métal en fonction de la tension appliquée pour un convoyeur biphasé et triphasé.

Figure 4.12 : Variation de la récupération du plastique en fonction de la fréquence du signal.

Figure 4.13 : Variation des masses récupérées du métal en fonction de la fréquence du signal.

Figure 4.14 : La récupération du plastique en fonction de l'humidité ambiante (convoyeur biphasé).

Figure 4.15 : La récupération du métal en fonction de l'humidité ambiante (convoyeur biphasé).

Figure 4.16 : La récupération du plastique en fonction de l'humidité ambiante (convoyeur triphasé).

Figure 4.17 : La récupération du métal en fonction de l'humidité ambiante (convoyeur triphasé).