

REPUBLIQUE ALGÉRIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBÈS

Faculté de Génie Électrique

*Département d'Électrotechnique*

Thèse présentée par

**LOUHADJ Soumia**

Pour l'obtention du diplôme de

**Doctorat en Électrotechnique**

*Spécialité : Réseaux Électriques*

Intitulé de la thèse

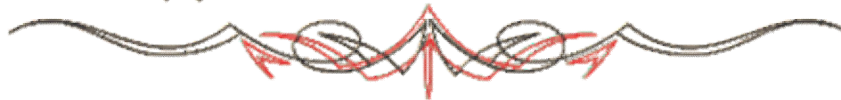
*Contribution à l'étude de la séparation de  
particules micronisées en utilisant des  
convoyeurs à ondes mobiles*

Présentée devant le jury composé de :

Président	Pr. MILOUA Farid	Prof.	Université Djillali Liabes
Encadreur	Dr. HAMMADI Nacéra	MCA	USTO-M.B
Co-encadreur	Pr. TILMATINE Amar	Prof.	Université Djillali Liabes
Examineurs	REZOUG Mohamed	MCA	Université Djillali Liabes
	BELARBI Ahmed Wahid	Prof.	USTO-M.B

Soutenue en 2021

# REMERCIEMENTS



*Je tiens tout d'abord à remercier ALLAH le clément et miséricordieux de m'avoir accordé des connaissances de la science, le courage, la patience et d'avoir guidé mes pas vers le chemin du savoir.*

*Je tiens à remercier vivement Docteur HAMMADI Nacéra, Maître de conférences classe A à l'université d'Oran, pour la confiance qu'elle m'a témoignée en acceptant la direction scientifique de mes travaux. Je lui suis reconnaissante de m'avoir fait bénéficier tout au long de ce travail de sa grande compétence.*

*Et je remercie mon co-encadreur, Professeur TILMATINE Amar, pour ses multiples conseils, suggestions et pour toutes les heures qu'il a consacrées à établir cette recherche. J'aimerais également lui dire à quel point j'ai apprécié sa grande générosité, disponibilité et ses qualités d'écoute et de compréhension.*

*J'adresse tous mes remerciements à Pr. MILOUA Farid pour avoir accepté de présider mon jury.*

*Mes remerciements vont également à Messieurs :*

*BELARBI Ahmed Wahid, Professeur à l'université d'Oran, pour l'honneur qu'il m'a fait pour sa participation à mon jury de thèse.*

*REZOUG Mohamed, Maître conférence classe A, d'avoir accepté de faire partie du jury de cette thèse.*

*Enfin je remercie tout la famille LOUHADJ, la famille BENMAÏSSA et la famille BOUMEDIENNE.*

# SOMMAIRE

## Sommaire

Introduction générale	01
<b>Chapitre 1 : État de l'art et généralités</b>	
1.1. Introduction	04
1.2. Ondes mobiles	05
1.2.1. Propagation de l'onde	05
1.2.2. Principe des convoyeurs à ondes mobiles	06
1.2.3. Applications de la technique des ondes mobiles	08
1.3. Forces agissant sur les particules	09
1.3.1. Équation du mouvement	10
1.3.2. Forces électrostatiques	10
(i) Force de Coulomb	10
(ii) Force d'image	11
1.3.3. Force gravitationnelle	12
1.3.4. Forces d'adhérence ou de collage	12
(i) Force capillaire	12
(ii) Force de Van Der Waals	13
1.3.5. Force diélectrophorétique	14
(i) diélectrophorèse (DEP)	14
(ii) force diélectrophorétique	14
(iii) Propriétés de la dielectrophorèse	15
1.4. Mouvements des particules	16
1.4.1. Mode de glissement (Surfing mode)	16
1.4.2. Mode sauts (Hopping mode)	16
1.4.3. Mode cycloïdal (Curtain mode)	17

1.5. Mécanismes de charge des particules	17
1.5.1. Charge " naturelle " par attachement des ions	18
1.5.2. Triboélectrisation	18
1.5.2.1. Charge par frottement	18
1.5.2.2. Charge par contact	18
1.5.3. Charge par charge d'espace ionique	18
1.5.3.1. Charge par champ	19
1.5.3.2. Charge par diffusion	20
1.5.3.3. Charge mixte	20
1.6. Généralités sur les décharges électriques à pression atmosphérique	20
1.6.1. Description phénoménologique de la décharge couronne	21
1.6.1.1. Effet couronne	22
1.6.1.2. Différents types de configurations	24
(i) Configuration fil-cylindre en tension négative	24
(ii) Configuration fil-cylindre en tension positive	25
(iii) Configuration pointe-plan	26
1.6.2. Décharges à barrière diélectrique (DBD)	27
1.6. Conclusion	29
<b>Chapitre 2 : Étude expérimentale avec le convoyeur à une seule face</b>	
2.1. Introduction	30
2.2. Convoyeurs à rideaux électriques	30
2.2.1. Généralités	30
2.2.2. Champ électrique généré par un rideau électrique	31
2.3. Montage expérimental utilisé	32
2.3.1. Convoyeur biphasé	32

2.3.2. Convoyeur triphasé	32
2.3.2.1. Dispositif expérimental	33
2.4. Matériels utilisés	34
2.4.1. Amplificateur haute tension	34
2.4.2. Générateur de fonction	35
2.4.3. Oscilloscope à mémoire	35
2.4.4. Générateur de haute tension continue	36
2.4.5. Transformateur HT à point milieu	36
2.4.6. Autotransformateur	36
2.4.7. Sonde Haute Tension	37
2.4.8. Balance utilisée	38
2.5. Pièces de métal utilisées	38
2.6. Procédure expérimentale	39
2.7. Résultats obtenus et discussion	40
2.7.1. Utilisation d'un convoyeur biphasé	40
2.7.1.1. Application d'une tension alternative carrée	40
2.7.1.2. Application d'une tension continue	43
a) Deux alimentations haute tension de polarités opposées	43
b) Une seule alimentation de haute tension	43
2.7.1.3. Application d'une haute tension alternative sinusoïdale ( $f=50$ Hz)	47
2.7.2. Utilisation d'un convoyeur triphasé	47
2.7.2.1. Influence de la taille des particules	48
2.7.2.2. Influence de la masse des pièces	48
2.7.2.3. Étude de la faisabilité de la séparation d'un mélange de particules métal/plastique	50

2.8. Conclusion	51
 <b>Chapitre 3 : Étude expérimentale avec le convoyeur biphasé à double face</b>	
3.1. Introduction	52
3.2. Convoyeur utilisé	52
3.3. Échantillons de particules utilisés	54
3.4. Montage expérimental	56
3.5. Procédure de déroulement des expériences	58
a. Expériences utilisant des pièces de métal de forme carrée	58
b. Expériences utilisant des mélanges de particules métal/plastique	58
3.6. Résultats et discussion	59
3.6.1. Étude de l'attachement des particules de métal et le déplacement des particules de plastique	59
3.6.1.1. Expériences utilisant des pièces de métal de forme carrée	59
3.6.1.2. Expériences utilisant des échantillons de brins de cuivre	64
3.6.1.3. Expériences utilisant des particules micrométriques et millimétriques	
(i) Particules de métal	65
(ii) Particules de plastique	66
3.6.2. Application à la séparation d'un mélange plastique/cuivre	67
3.7. Analyse numérique du champ électrique	69
3.8. Conclusion	71
 <b>Chapitre 4 : Étude expérimentale avec le convoyeur vibrant</b>	
4.1. Introduction	72
4.2. Choix de la forme du signal	72
4.2.1. Introduction	72
4.2.2. Pourquoi un signal carré ?	73
4.3. Description du dispositif expérimental	74
4.3.1. Convoyeur utilisé	75

## Sommaire

---

4.3.2. Vibreur électromagnétique	76
4.3.3. Système d'excitation électrique	77
4.4. Échantillons utilisés	78
a) Bronze	78
b) Polyamide (PA)	78
4.5. Procédure expérimentale	79
4.5.1. Protocole expérimental	79
4.5.2. Influence des facteurs sur la séparation des particules métal/plastique	80
4.5.2.1. Amplitude du signal haute tension	81
(i) Application d'une tension alternative de forme carrée	81
(ii) Application d'une tension continue	83
4.5.2.2. Fréquence du signal haute tension	85
4.5.2.3. Débit de la matière	87
4.5.2.4. Déphasage de la tension	89
4.6. Conclusion	91
<b>Conclusion générale</b>	
Conclusion générale	92
<b>Références bibliographiques</b>	
Références bibliographiques	95



Introduction

***GÉNÉRALE***

# Introduction générale

Depuis plusieurs décennies, la technologie moderne engendre une explosion de la consommation des Équipements Électriques et Électroniques (EEE) et des déchets qui y sont associés appelés DEEE (Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques). Les EEE regroupent les équipements fonctionnant grâce à un courant électrique ou à un champ électromagnétique [1-2].

Perceuses, réfrigérateurs, fers à repasser et aussi téléphones portables, ordinateurs, lave-vaisselles... sont des appareils électriques et électroniques de la vie quotidienne. Arrivés en fin de vie, ils deviennent des DEEE (Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques). Fonctionnant grâce à des courants électriques, ils sont reliés au secteur par des prises ou alimentés par des piles.

Dans un souci environnemental et pour limiter au mieux les pollutions de ces matériels lors de leur fin de vie, la récupération, la valorisation et le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) font l'objet de législations rigoureuses. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette thèse où le traitement des DEEE passe par leur valorisation. Cette démarche s'inscrit dans le respect strict des normes écologiques et environnementales. La valorisation comprend ainsi le démantèlement, la dépollution et la séparation des matériaux.

Ces équipements sont à la fois composés de métaux (parfois précieux) et de matériaux isolants (souvent issus de produits pétroliers). Leur recyclage est donc indispensable et nécessite une ou plusieurs étapes. La plupart des matériaux ne peuvent pas être recyclés en mélange. En effet, les caractéristiques physico-chimiques (mécanique, électrique, thermique...) des matériaux recyclés en mélange sont souvent inférieures que celles des matériaux d'origine. Une étape indispensable au recyclage est donc le tri en fractions séparées des éléments composant initialement le(s) déchet(s). De nombreuses solutions de tri existent au niveau industriel allant du tri optique au tri densimétrique en passant par le tri manuel ou le criblage. La plupart de ces installations sont gourmandes en énergie et ne permettent pas de séparer tous les types d'éléments composant les déchets.

La séparation électrostatique [3-11] est le terme générique pour une classe importante de technologies de traitement des matériaux, largement utilisée pour le tri sélectif des matériaux solides par des forces électriques [12] qui agissent sur les particules

chargées ou polarisées [13-15]. En outre, la séparation électrostatique est une technologie non-polluante, caractérisée par une faible consommation d'énergie et des coûts réduits d'exploitation et d'entretien.

Il existe plusieurs méthodes électrostatiques pour causer un mouvement de translation de petites particules qui peuvent être utilisées pour la manipulation et/ou la séparation de particules. L'une de ces méthodes est la diélectrophorèse [16-23], dont le principe est le déplacement par champ électrique de la matière polarisée.

L'objectif de ce travail de thèse est d'étudier le déplacement, l'attraction et la séparation des particules qui ont lieu dans un champ électrostatique non uniforme, et l'influence des différents facteurs sur la séparation en utilisant deux types de convoyeurs à une seule face et à double face. Ces convoyeurs comportent des électrodes parallèles alimentées par une tension polyphasée.

Un projet de recherche intitulé " Utilisation d'un convoyeur à ondes mobiles à champ électrique polyphasé pour le transport et la séparation des matériaux " a été lancé au niveau du laboratoire de recherche APELEC à l'université Djillali Liabès de Sidi-Bel Abbès, spécialisé dans les applications électrostatiques. Ce projet consiste à utiliser une nouvelle technique pour la séparation des poudres micronisées, basée sur les ondes mobiles. C'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail qui consiste à analyser une nouvelle technique de séparation de particules.

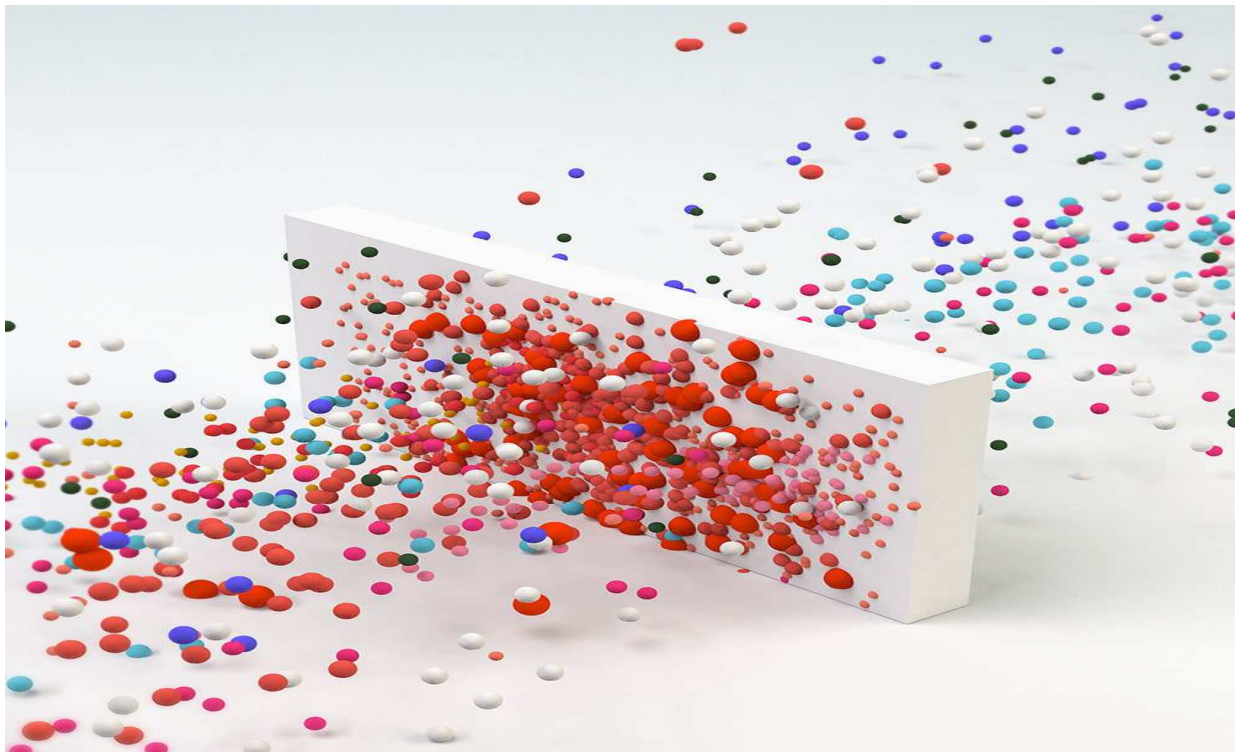
Le premier chapitre fait une synthèse de l'état de l'art relatif à la technique des ondes mobiles et leurs applications. Dans un premier temps, les mécanismes de génération de charges électriques qui conduisent aux phénomènes de l'électrostatique et, les forces électriques appliquées aux particules sont détaillés de manière générale. Le deuxième chapitre se concentre sur la présentation de la technique des ondes mobiles développée au cours de la thèse permettant la séparation. Dans un premier temps, nous avons étudié la force d'attraction appliquée par des convoyeurs multiphasés à une seule face avec des distances inter-électrodes différentes. Nous avons également décrit la majorité des équipements utilisés lors des expériences présentées dans cette thèse. La deuxième partie du chapitre est consacré à l'étude de l'influence de la forme de la tension appliquée aux rideaux électriques sur la force d'attraction exercée aux particules conductrices.

Le troisième chapitre est dédié à l'étude d'une nouvelle configuration d'un rideau électrique biphasé à double face fixé sur un plan à inclinaison variable. 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 est consacré à l'étude de le fonctionnement d'un convoyeur vibrant en utilisant un rideau électrique biphasé fixé sur un vibreur électromagnétique, dédié à la séparation. 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 le débit de matière sur la séparation d'un mélange granulaire " bronze/plastique ".

La conclusion résume l'apport de ce travail de thèse et propose des perspectives d'évolution tant au niveau théorique qu'applicatif.

# PREMIER CHAPITRE

## ÉTAT DE L'ART ET GÉNÉRALITÉS



# Chapitre 1

## État de l'art et généralités

### 1.1. Introduction

La technique des ondes mobiles est une technologie qui a été proposée pour la première fois par **Tatom et al.** [24] en **1967** pour le dépoussiérage électrique.

Pendant les années **1970**, **Masuda** et ses collègues ont effectué de nombreuses études sur une technique appelée "rideau électrique" pour le confinement et le transport d'aérosols chargés [25].

Le dispositif typique du rideau électrique comporte des séries d'électrodes rectilignes, parallèles, toutes placées dans un plan horizontal et noyées dans une couche plane d'isolant. **Mazumder et al.** [26] ont mis en avant le concept d'écran électrodynamique flexible (EED) basé sur la technologie de rideau électrique à ondes mobiles, et ont proposé la faisabilité de l'EED appliquée au système photovoltaïque en enlevant la poussière sur les panneaux solaires même dans l'environnement martien.

**Weiss et Thibodeaux** [27] ont proposé l'utilisation d'un rideau électrique pour le tri des graines à partir de sous-produits dans les procédés agricoles.

**Kawamoto** [28] décrit diverses technologies qui utilisent des rideaux électriques pour séparer des particules de différentes tailles, y compris un rideau électrique incliné, un rideau électrique en forme de tube incliné, un rideau électrique en spirale et un système de séparation à rouleaux. Il a observé que de grosses particules tombent au fond du rideau en raison de la gravité, mais que de plus petites particules sont transportées vers le haut du rideau électrique incliné.

## 1.2. 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".

### 1.2.1. 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 1-1 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.

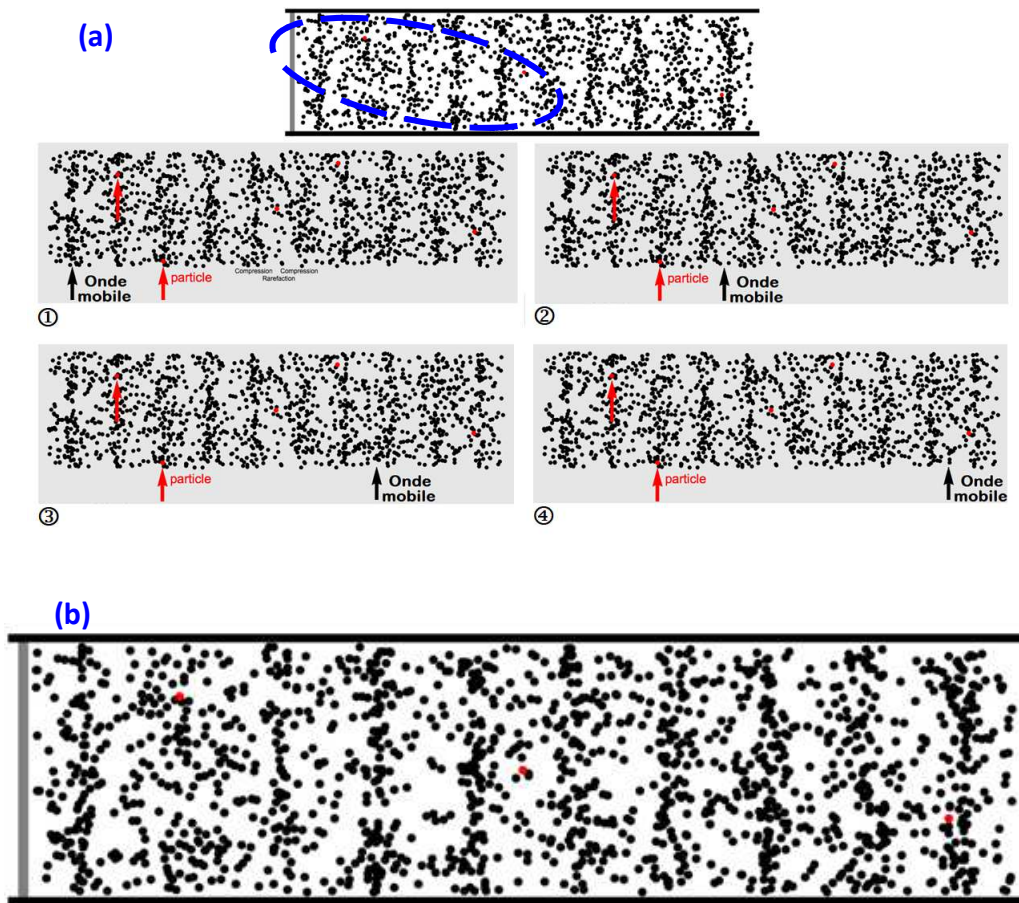


Figure 1-1 - Déplacement de l'onde mobile.

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

### 1.2.2. 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 (Fig.1-2).

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 [29] (Fig.1-3). 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.



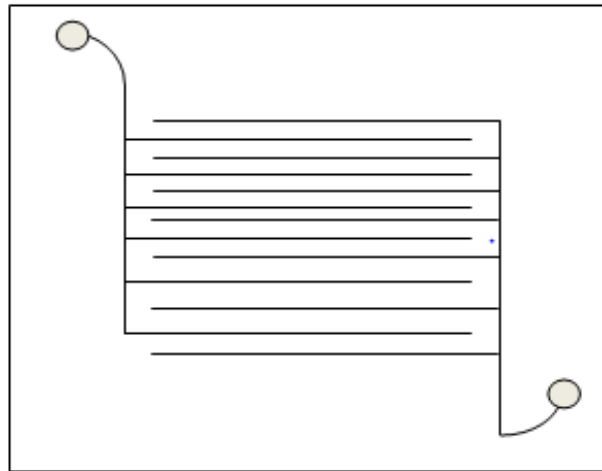


Figure 1-2 - Convoyeur à ondes mobiles biphasé.

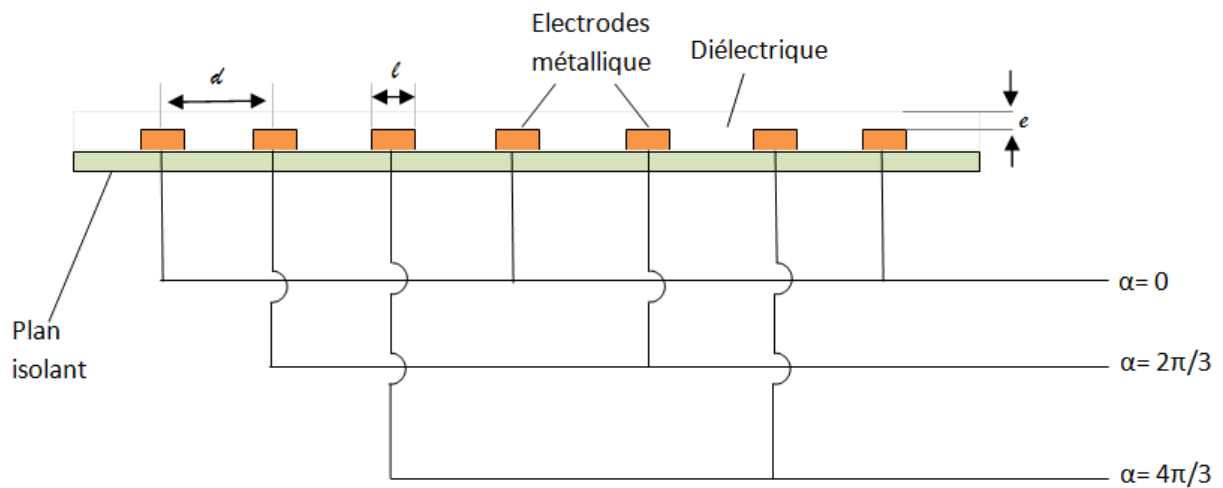


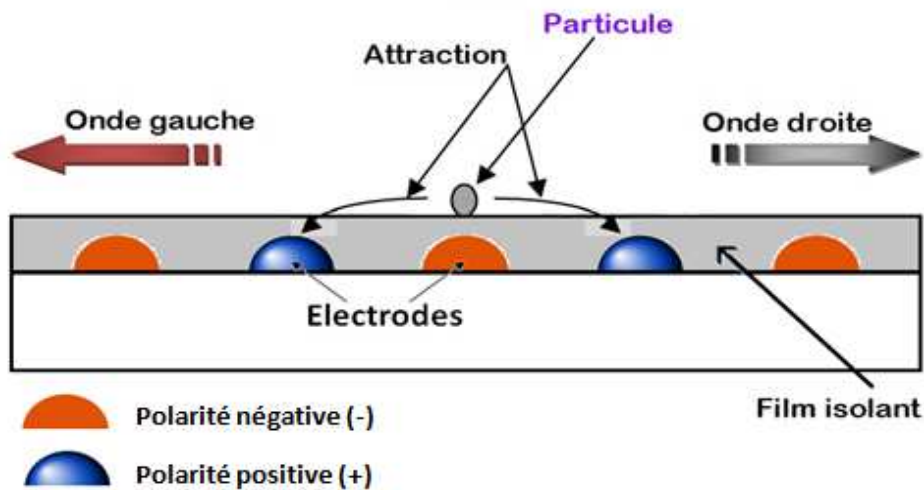
Figure 1-3 - Section transversale d'un rideau électrique triphasé.

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 [30].

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 [31]. L'exigence d'une isolation complète de la terre est garantie 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 [32-34]. 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  $n_e$  qui est négative est susceptible d'être attirée vers l'électrode de signe positive de gauche ( $n_e-1$ ) ou de droite ( $n_e+1$ ) (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  $n_e$  et ( $n_e-1$ ) alors elle suivra l'onde mobile gauche (Fig.1-4).



**Figure 1-4** - Schématisation de l'onde mobile du convoyeur biphasé. Particule repoussée par l'électrode négative et attirée par l'électrode positive.

### 1.2.3. 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 [35]. En 1970, *Masuda* et al. ont effectué des études sur les rideaux électriques pour le confinement et le transport d'aérosols chargés [25].

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 [36]; des études ont été effectuées sur les rideaux électriques à ondes mobiles dans le but de dépolluer 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 des différents types de particules submillimétriques. Étant donné que les cellules biologiques présentent des propriétés diélectriques [37] 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 [38].

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.

### 1.3. 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 µm** : le jet d'air forcé, les centrifugeuses et d'autres moyens mécaniques. Pour les particules allant de **1 à 10 µm**, 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 [39].

### 1.3.1. 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 [18] [28] [40-43]:

$$m_i \frac{d^2 x_i}{dt^2} + F_f = F_a + F_e + F_d + F_g \quad (1-1)$$

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  $F_e$ , la force diélectrophorétique  $F_d$  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 :

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

Où :  $\eta$  : Viscosité de l'air ,  $r$  : Rayon de la particule.

### 1.3.2. Forces électrostatiques

#### (i) 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 [17] (Fig.1-5).

$$F_e = q \cdot E \tag{1-3}$$

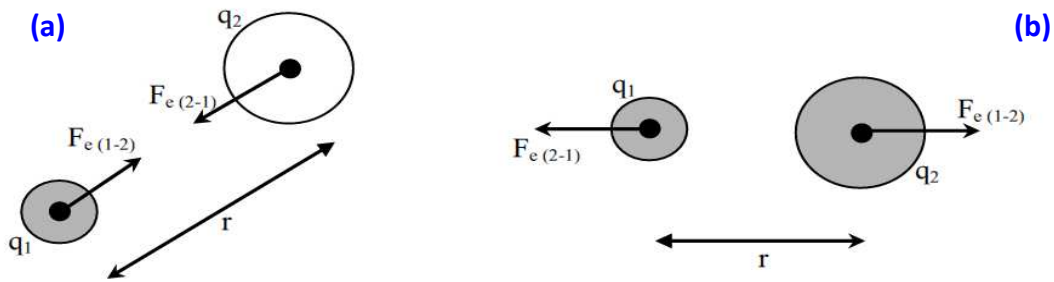


Figure 1-5 - Force de coulomb entre deux particules sphériques chargées.

(a) Attraction, charges de signes contraires ( $q_1 \cdot q_2 < 0$ );

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

L'expression scalaire de la loi de Coulomb en électrostatique est représentée par l'équation suivante [44]:

$$F_e = k \cdot \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2} \tag{1-4}$$

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 :  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2$  et  $\epsilon_0$  : Permittivité du vide.

### (ii) 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 [18] [28] [40-43]:

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

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.

### 1.3.3. 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 :

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

$g$  : étant la constante gravitationnelle.

### 1.3.4. 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 [45]. 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.

#### (i) 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.1-6).

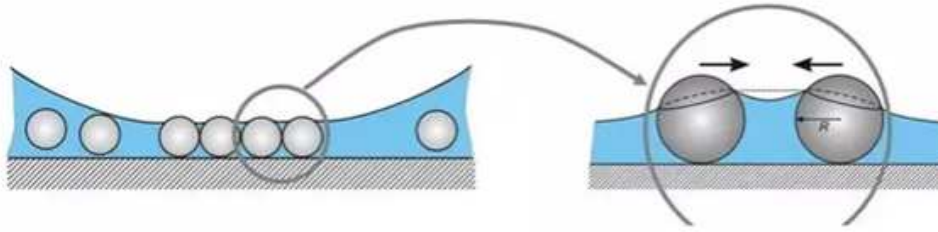


Figure 1-6 -Vue latérale de la force capillaire.

### (ii) 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.1-7).

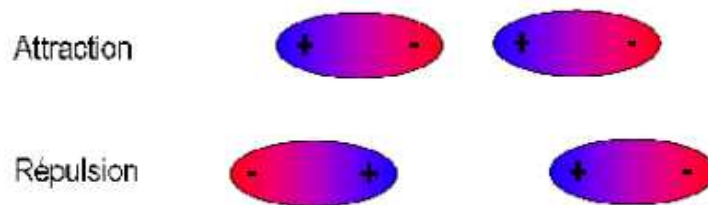


Figure1-7 - Des interactions dipôle permanent - dipôle permanent.

- 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.1-8).

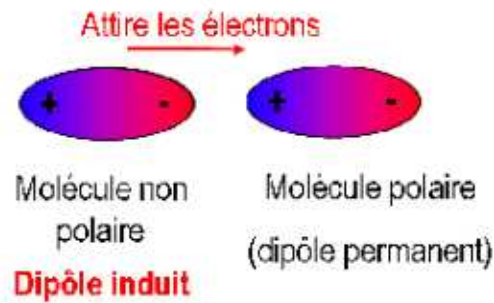


Figure 1-8 - Des interactions dipôle permanent – dipôle induit.

- 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.

### 1.3.5. Force diélectrophorétique

#### (i) 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 :

- i) elle concerne autant la matière neutre que chargée, solide ou liquide ;
- ii) 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).

#### (ii) 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 appliquée sur une particule sphérique est donnée par :

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

Où :

$r$  : Rayon de la particule

$\epsilon_m$  : Permittivité du milieu

$\operatorname{Re}[F_{cm}^*]$  : 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  $\epsilon_p^*$  et  $\epsilon_m^*$  sont la permittivité complexe de la particule et du milieu respectivement.

### (iii) Propriétés de la diélectrophorèse

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.

#### 1.4. Mouvements des particules

Cette section présente un intérêt particulier pour le déplacement des particules sur le convoyeur à ondes mobiles.

##### 1.4.1. Mode de glissement (Surfing mode)

Le mode surf se produit dans des champs électriques très forts ( $\geq 4$  kV/cm) sans provoquer d'ionisation de l'air. En l'absence de diffusion en surface, les particules se déplacent à tout moment en contact glissant avec la surface. En présence d'une diffusion de surface, les particules sont déviées à plusieurs reprises de la surface, mais l'onde les renvoie vers le convoyeur (La vitesse des particules est égale à la vitesse de l'onde) (Fig.1-9).

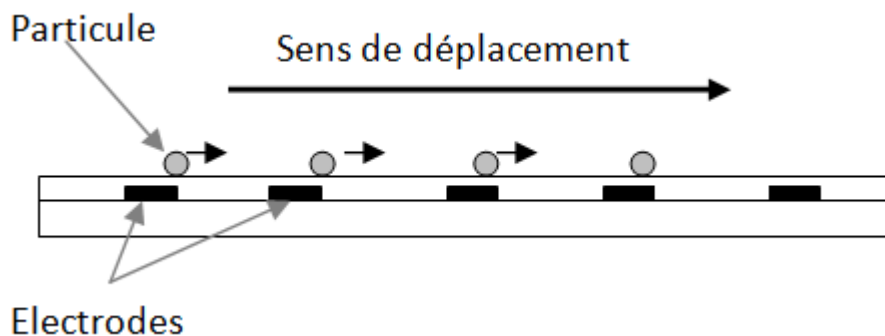


Figure 1-9 - Représentation schématique du mode glissement.

##### 1.4.2. Mode sauts (Hopping mode)

Pendant le mode "sauts", les particules sont soulevées de la surface de transport par le champ électrique de l'onde et propulsé vers l'avant (Fig.1-10). En frappant la surface de transport, le mouvement de la particule est arrêté, jusqu'à ce que la vague la rattrape et déclenche le saut suivant. La vitesse moyenne des particules est égale à la vitesse de l'onde à des fréquences suffisamment basses, bien qu'un mode de saut asynchrone plus lent soit possible à des fréquences plus élevées.

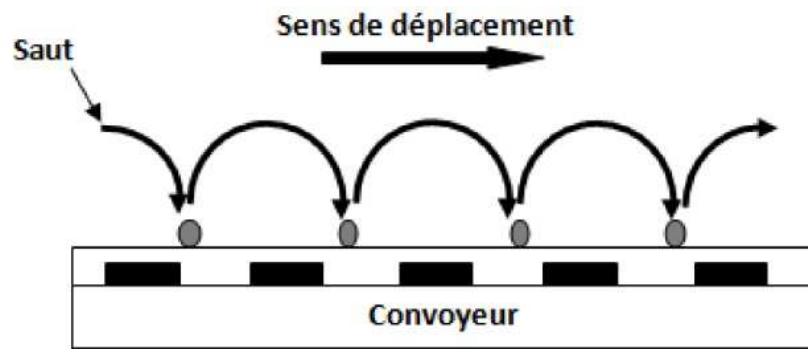


Figure 1-10 - Représentation schématique du mode sauts.

### 1.4.3. Mode cycloïdal (Curtain mode)

Le mode rideau se produit lorsque le mouvement est asynchrone. Le mouvement des particules est beaucoup plus lent que l'onde tout en étant continuellement repoussé de la surface de l'électrode (Fig.1-11). La différence entre la force de répulsion et d'attraction équilibre la gravité et entraîne une lévitation continue. Ainsi, le mode rideau nécessite la gravité.

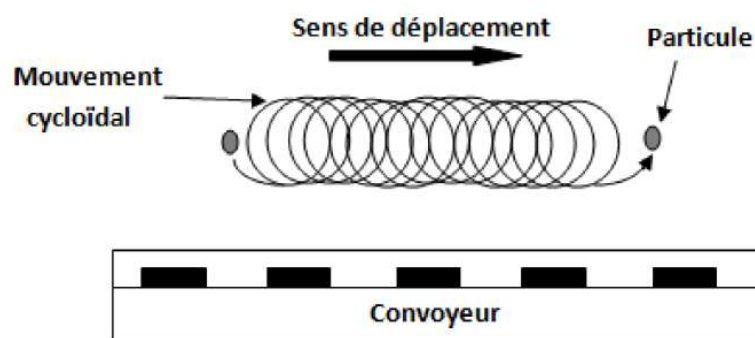


Figure 1-11 - Représentation schématique du mode cycloïdal.

### 1.5. Mécanismes de charge des particules

Les fines particules en suspension dans l'air peuvent recueillir des charges électriques grâce à plusieurs mécanismes qui sont :

- ✓ la charge " naturelle " par attachement des ions existant dans l'atmosphère,
- ✓ la triboélectrisation (regroupant la charge par contact et la charge par frottement).
- ✓ la charge par charge d'espace ionique (regroupant la charge par champ et la charge par diffusion).

### 1.5.1. Charge " naturelle " par attachement des ions

Dans l'atmosphère terrestre, il existe des ions positifs et des ions négatifs générés sans interruption par l'action des radiations cosmiques et des gaz radioactifs émanant du sol. Les particules d'aérosol qui sont initialement neutres, peuvent acquérir une charge par collision (due à leur mouvement thermique aléatoire) avec des ions. Les particules chargées vont avoir tendance à perdre leur charge lentement en attirant des ions de signe opposée. Donc, ce processus tend vers un état d'équilibre appelé "distribution de charge en équilibre de Boltzmann"[39].

### 1.5.2. Triboélectrisation

La triboélectrisation regroupe deux causes d'électrisation : le frottement et le contact.

#### 1.5.2.1. Charge par frottement

Certains corps frottés acquièrent la propriété d'attirer les corps légers. On dit qu'ils sont électrisés par frottement. Dans certains matériaux, l'électrisation peut se répartir en tous leurs points, ce sont les conducteurs (l'électrisation n'apparaît que si le corps frotté est tenu par l'intermédiaire d'un manche isolant), Dans d'autres, elle ne se manifeste que sur la partie frottée, autrement dit l'électricité reste localisé là où elle s'est développée ; ce sont les isolants. Dans tous les cas, l'électrisation représente un phénomène de transfert de charges.

#### 1.5.2.2. Charge par contact

La charge par contact se produit pendant le contact de particules sèches et non conductrices de surfaces solides [46-47][30]. Dans ce processus, quand une particule touche une surface, des charges sont transférées, si bien que la particule acquiert une charge nette positive ou négative quand elle se sépare de la surface. La polarité de la particule chargée et le nombre de charges sur celle-ci dépendent des matériaux et de leurs positions relatives dans les séries triboélectriques [46]. Le frottement augmente le nombre de charges acquises. Parce qu'il requiert des surfaces sèches, le phénomène de charge par contact devient inefficace en conditions d'humidité relative plus grande que **65%** environ.

### 1.5.3. Charge par charge d'espace ionique

La force de Coulomb qui s'exerce principalement sur les particules chargées, est la principale cause de mise en mouvement des particules. **P. Atten** explique [48] que cela peut être provoqué par une forte densité d'ions due à une décharge couronne dans l'espace inter-électrodes.

Le processus de charge dépend alors de plusieurs facteurs parmi lesquels les plus importants sont la densité de charge ionique, l'intensité du champ électrique local, ainsi que la taille des particules. De nombreuses études [46][49-51] ont montré que le procédé de charge peut être principalement attribué à deux mécanismes :

- la charge par champ.
- la charge par diffusion.

Quel que soit le mécanisme, la charge électrique acquise par une particule est le résultat des interactions entre celle-ci et les ions résultant de la décharge couronne. Les deux mécanismes de charge interviennent ensemble et leur importance relative est déterminée principalement par les dimensions des particules et l'intensité du champ électrique.

#### 1.5.3.1. Charge par champ

Une première théorie concernant la charge par champ a été développée en 1923 par **Rohmann** cité par [50] et elle a été complétée par **Pauthenier** [52-53] en 1932.

Comme le suggère son nom, ce mécanisme de charge est relié à l'action du champ électrique. Les particules sont chargées dans une densité d'ions avec un champ électrique appliqué. Dans le cas des décharges électriques, le champ électrique sert également à créer la densité d'ions. La particule déforme le champ dans lequel elle est plongée, une partie des lignes de champ aboutissent alors sur la particule.

Dans ce cas, les ions présents dans le gaz qui se déplacent le long des lignes de champ électrique, peuvent atteindre la surface de la particule. Chaque ion qui atteint la particule change la distribution locale du champ électrique. Tant que le champ électrique créé par la charge de la particule est inférieur au champ électrique maximum qui existe à la surface de la particule lorsqu'elle n'est pas chargée, les ions continuent d'atteindre la surface de celle-ci. Lorsque la charge acquise est suffisante, les lignes de champ contournent la particule ; on dit que la particule a acquis la charge de saturation par champ [49].

### 1.5.3.2. Charge par diffusion

On parle de la charge par diffusion quand le champ électrique appliqué est faible ou même nul et lorsque la taille des particules est suffisamment petite. Il est alors nécessaire de prendre en compte le phénomène de diffusion des ions dans le processus de charge [49-50]. Ce mécanisme met en jeu la probabilité de collision entre les particules et les ions animés d'un mouvement aléatoire d'agitation thermique.

Dans une zone où le champ électrique appliqué est nul, les ions ont une répartition uniforme autour des particules. Dans ces conditions, tous les éléments de surface d'une particule ont la même probabilité de choc avec les ions et la particule peut accumuler une certaine charge électrique.

Ce mécanisme de charge par diffusion a une importance plus grande pour les particules très fines, d'un diamètre inférieur à **0,5  $\mu\text{m}$**  [49] [51]. Dans la charge par diffusion, la quantité de charge accumulée dépend de la taille des particules, de la densité des ions, de la vitesse moyenne d'agitation thermique des ions, de la constante diélectrique de la particule, de la température absolue du gaz, du temps de présence des particules au sein du champ.

La charge par champ est le mécanisme dominant pour les particules plus grandes que **1  $\mu\text{m}$** , et la charge par diffusion est le mécanisme dominant pour les particules plus petites que **0,1  $\mu\text{m}$** , même en présence d'un champ électrique [39].

### 1.5.3.3. Charge mixte

Pratiquement, pour les particules de taille comprise entre **0,5** et **1  $\mu\text{m}$** , les deux mécanismes fonctionnent en même temps et la situation est beaucoup plus compliquée. Cependant, la charge totale acquise par une particule n'est pas simplement la somme de la charge par champ et de la charge par diffusion. Les deux mécanismes interagissent et plusieurs traitements approchés ont été proposés pour résoudre ce problème très complexe [54-55].

## 1.6. Généralités sur les décharges électriques à pression atmosphérique

Les décharges électriques sont une des principales technologies pour générer des plasmas à pression atmosphérique, plasmas non-thermiques ou plasmas froids.

Thermodynamiquement, un plasma froid est un processus hors-équilibre, c'est-à-dire que l'énergie est prioritairement transférée aux électrons, alors que la température des

espèces lourdes (ions, molécules neutres, etc.) et donc du gaz ambiant reste relativement faible. Ces plasmas permettent de produire des espèces hautement réactives à faible coût énergétique.

La décharge couronne (**DC**) et la décharge à barrière diélectrique (**DBD**) sont les deux décharges électriques les plus souvent rencontrées du fait de leur simplicité de mise en œuvre [56].

### 1.6.1. Description phénoménologique de la décharge couronne

La décharge couronne est créée entre deux électrodes fortement dissymétriques par application d'une haute tension (continue, alternative ou pulsée) à l'électrode ayant le plus petit rayon de courbure. Cette forte courbure provoque un champ électrique intense autour de l'électrode qui décroît très rapidement au fur et à mesure que l'on s'en éloigne.

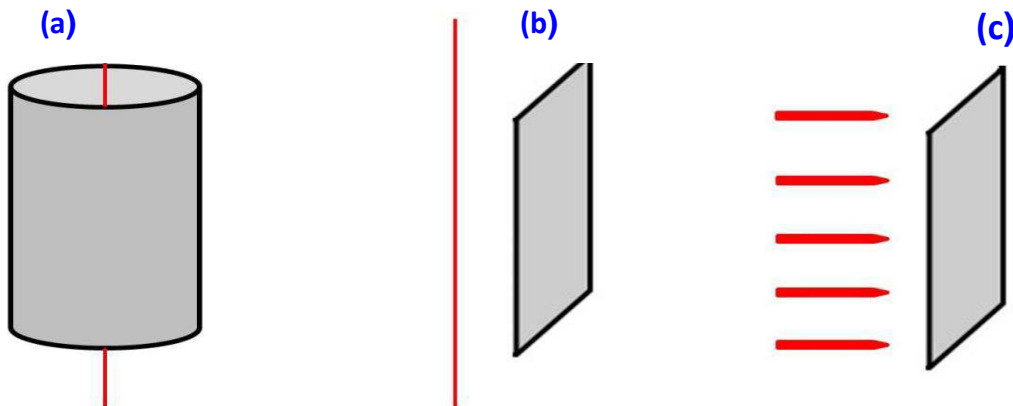
La décharge couronne apparaît si le champ électrique est suffisant pour ioniser le gaz. Dans de l'air sec à pression atmosphérique, la valeur du champ disruptif est de l'ordre de **30 kV.cm<sup>-1</sup>**. Sa valeur dépend du rayon de courbure de l'électrode, de la température et de la pression [56].

L'une des difficultés principales rencontrées avec la décharge couronne est la transition à l'arc électrique [57], qui est une décharge électrique autonome transportant un fort courant sous une faible différence de potentiel. Concrètement, une augmentation de la densité de courant se traduit par une augmentation de la surface occupée par la décharge sur les électrodes. Lorsque la décharge occupe la totalité de la surface, l'augmentation de la densité de courant jusqu'à une valeur critique peut susciter la transition à l'arc électrique [58], ce qui est simultanément accompagné d'une hausse de la température du gaz.

Dans ce cas, le plasma généré est proche de l'équilibre thermodynamique et la puissance injectée dans le gaz est majoritairement dissipée par effet Joule [59]. Par conséquent, l'énergie cinétique des électrons est insuffisante pour permettre d'ioniser et de décomposer des molécules du milieu.

C'est pour cette raison que dans la plupart des applications de la décharge couronne, ce phénomène de transition à l'arc électrique doit être évité, soit par abaissement de la tension pour arrêter la propagation de la décharge avant qu'elle n'atteigne la contre électrode [60], soit par application d'une tension impulsionnelle répétitive dont la durée doit être inférieure à quelques centaines de nanosecondes.

Les géométries les plus courantes pour obtenir la décharge couronne sont le fil-cylindre, le fil-plaque et la pointe-plaque (Fig.1-12).



**Figure 1-12** - Configurations classiques de la décharge couronne :  
(a) fil-cylindre, (b) fil-plaque et (c) pointe-plaque [56].

#### 1.6.1.1. Effet couronne

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 (Fig.1-13).

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

L'avalanche électronique (Fig.1-14) 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 la même polarité qu'elle [61-62].



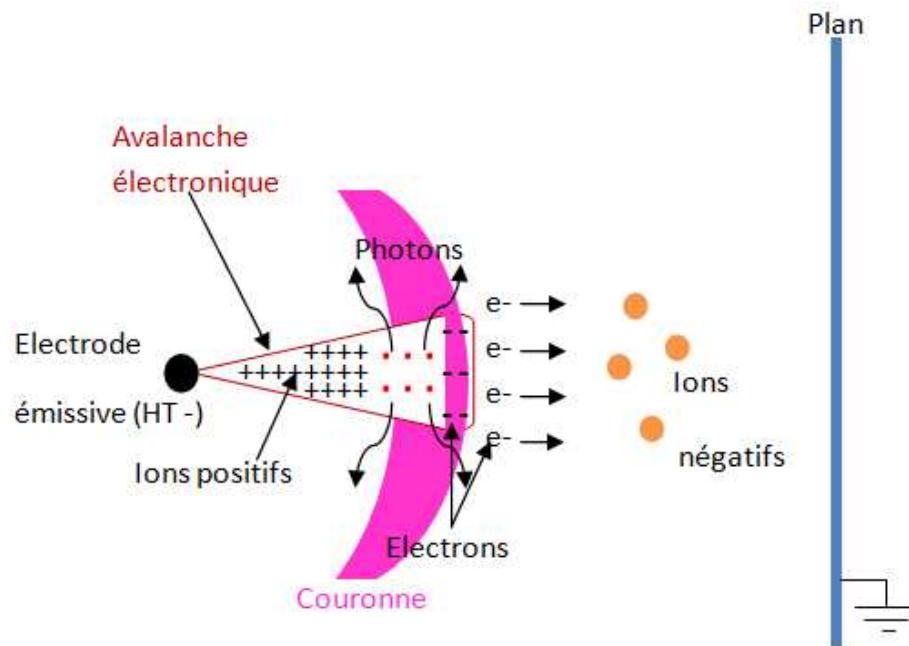


Figure 1-13 -Représentation schématique d'une décharge couronne : avalanche électronique et formation de la couronne lumineuse.

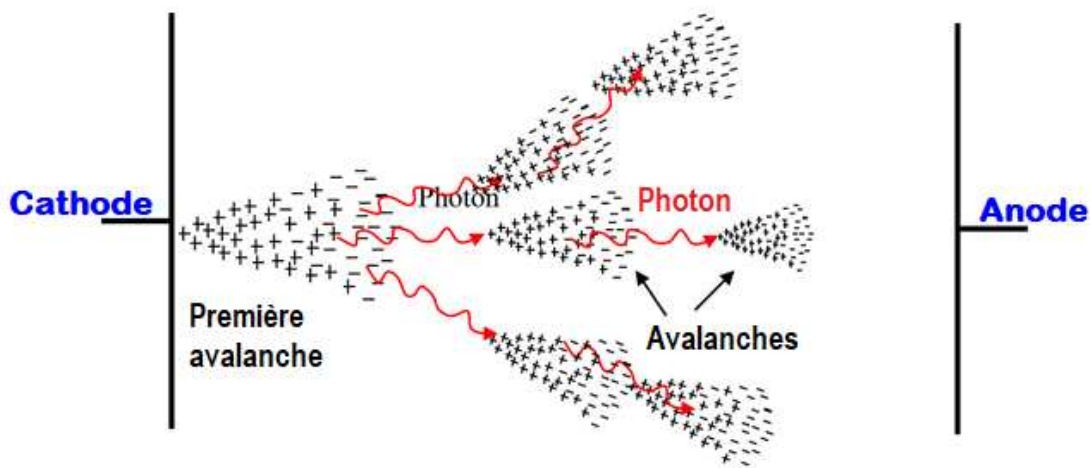


Figure 1-14 - Développement d'une avalanche électronique.

Les phénomènes d'ionisation qui ont lieu dans la couronne lumineuse et qui génèrent les électrons libres, donnent aussi naissance à une forte densité d'ions positifs. Sous l'action du champ électrique, ces ions se déplacent vers le fil (ou vers la pointe) et en raison de leur mobilité bien plus petite que celle des électrons, une charge d'espace ionique se forme dans cette zone.

### 1.6.1.2. Différents types de configurations

La haute tension appliquée à l'électrode peut être négative ou positive menant à des comportements différents comme schématisés sur la Figure 1-15.

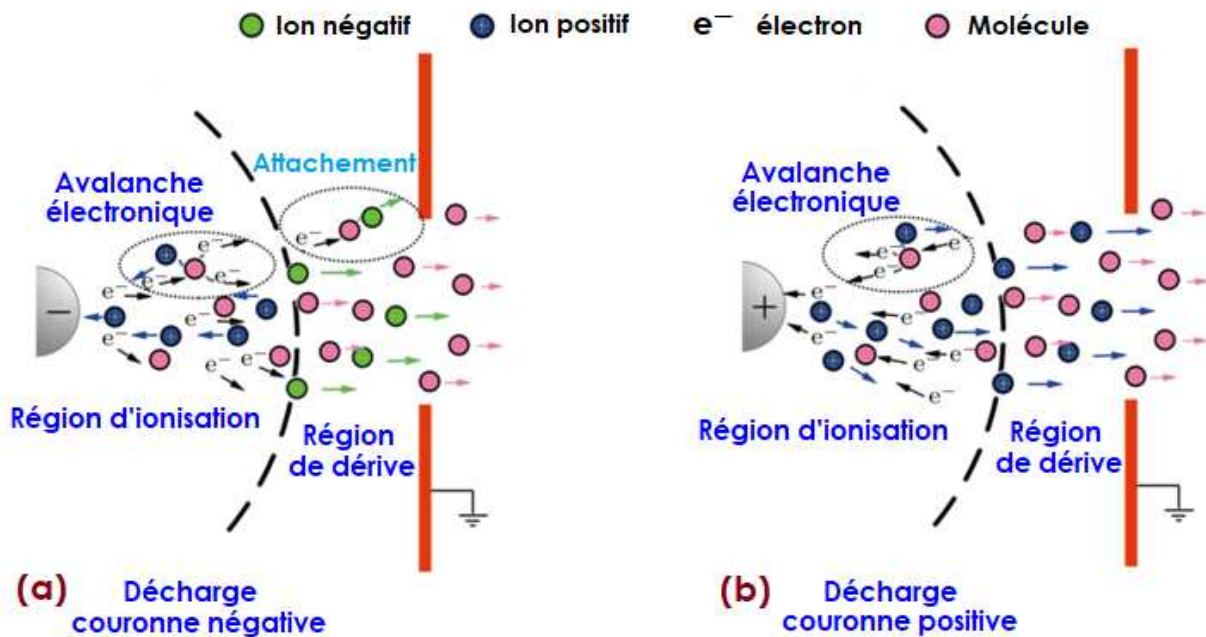


Figure 1-15 -Électrode haute tension en polarité (a) négative; (b) positive.

### (i) Configuration fil-cylindre en tension négative

Lors de l'amorçage de la décharge couronne, les électrons primaires présents naturellement dans l'air sont accélérés au voisinage de l'électrode émissive sous l'effet du champ électrique.

En tension négative (Fig.1-16), ils se propagent de la cathode (électrode de faible rayon de courbure) vers l'anode (électrode périphérique reliée à la masse). Ils acquièrent alors assez d'énergie cinétique pour rentrer en collision inélastique avec les espèces neutres, leur arracher un électron et former de nouveaux électrons libres ainsi que des ions positifs. Les ions positifs, quant-à-eux, migrent vers la cathode ; ils forment une forte charge espace qui perturbe le champ électrique global.

Comme les électrons ont un rapport charge/masse beaucoup plus élevé, ils sont accélérés à une vitesse nettement supérieure à celle des ions. Ces nouveaux électrons rentrent, à leur tour, en collision avec d'autres atomes, créant plus de paires électron-ion. De cette manière, chaque collision provoque un processus de réaction en chaîne appelé avalanche électronique qui entraîne une augmentation exponentielle du nombre d'électrons.

En tension négative, l'avalanche prend donc naissance au voisinage de la cathode et se propage vers l'anode. Au cours de la migration du nuage électronique, l'intensité du champ électrique diminue rapidement [56].

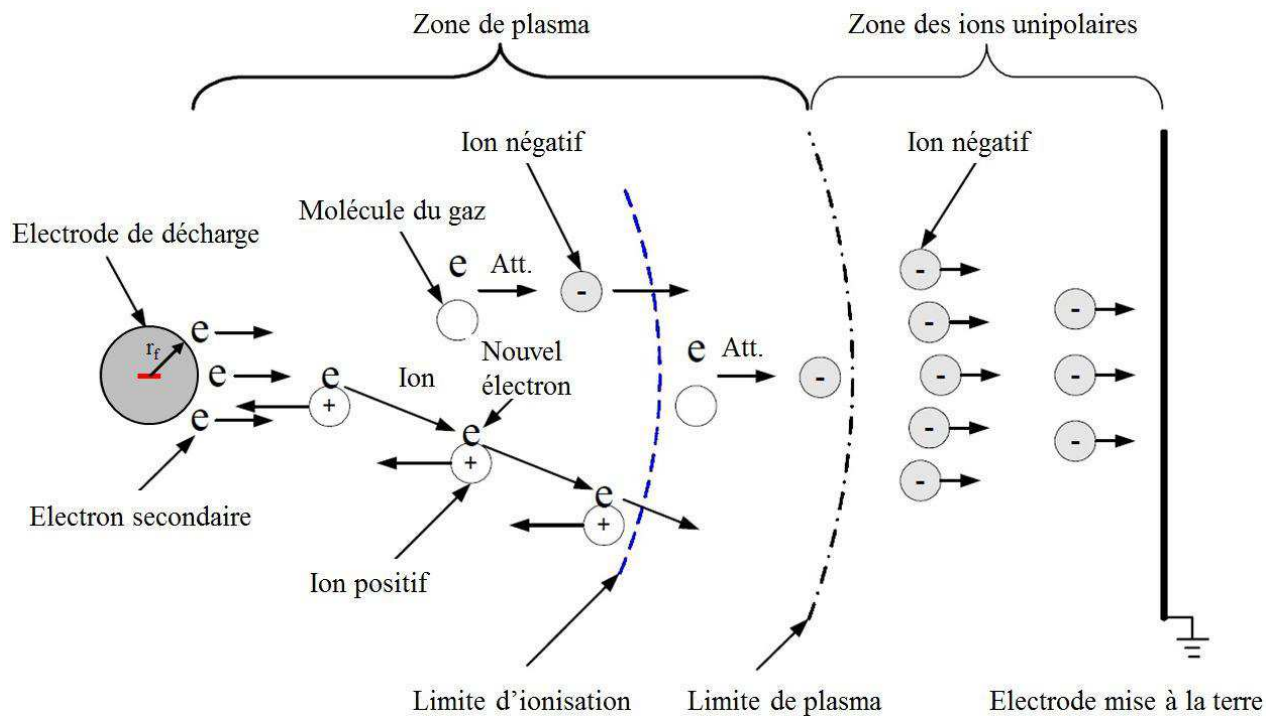


Figure 1-16 -Représentation schématique d'une décharge couronne en tension négative [63].

### (ii) Configuration fil-cylindre en tension positive

En tension positive (Fig.1-17), les électrons sont accélérés vers l'anode centrale sous l'effet du champ électrique alors que les ions positifs migrent vers la cathode périphérique. Dans ce cas, les électrons secondaires sont principalement créés par photo-ionisation durant les réactions de désexcitation radiative par collision avec les métastables.

En revanche, le processus d'avalanche électronique est moins efficace qu'en tension négative car les électrons secondaires proviennent du gaz neutre dans le milieu inter-électrodes et non pas de l'électrode émissive ; les électrons secondaires sont donc accélérés sur une plus courte distance.

En tension positive, on suppose que la limite d'ionisation se confond avec celle du plasma, Au-delà de cette limite, c'est la zone de dérive des ions positifs [56].

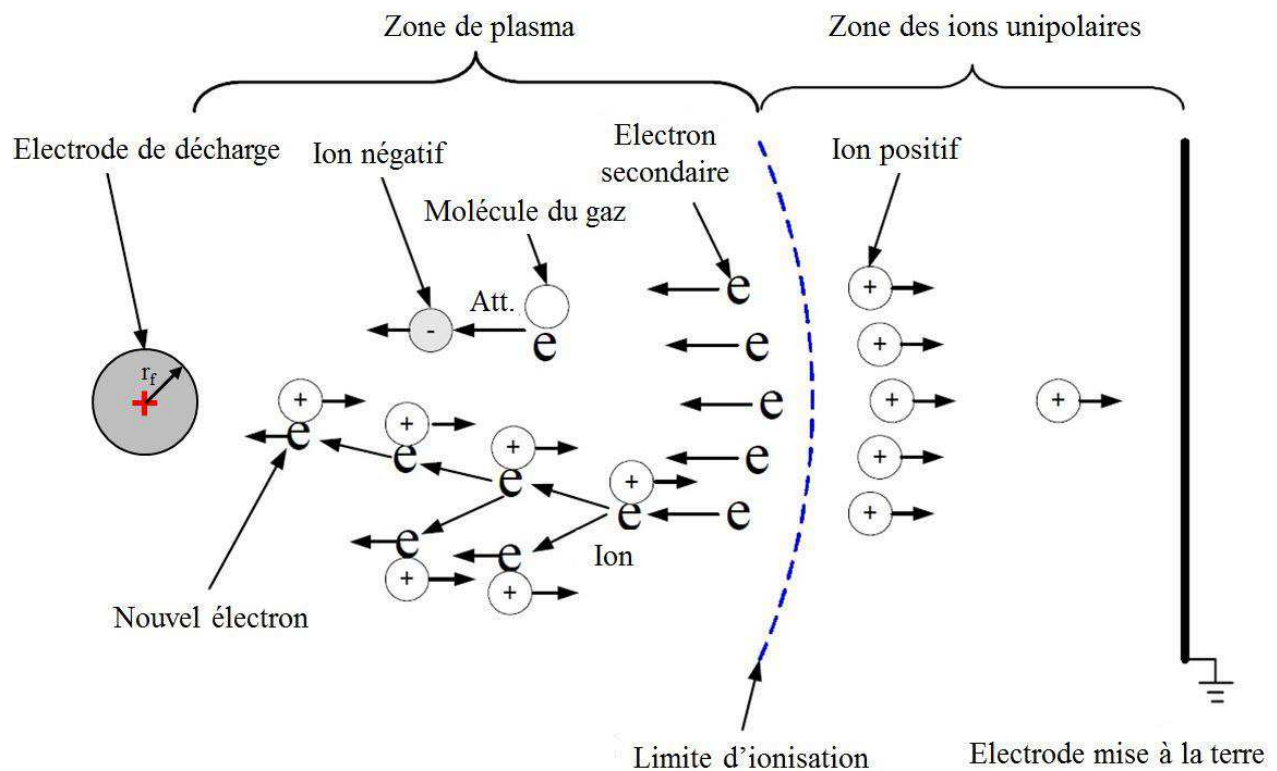


Figure 1-17 -Représentation schématique d'une décharge couronne en tension positive [63].

### (iii) Configuration pointe-plan

La configuration pointe-plaque est constituée de plusieurs aiguilles métalliques et d'une électrode plane. Les mécanismes sont identiques à ceux décrits en configuration fil-cylindre mais dans ce cas la décharge couronne apparaît comme une lueur lumineuse localisée dans un volume autour de la pointe des aiguilles (Fig.1-18) : c'est la zone d'ionisation. Au-delà, le champ électrique est faible, les électrons rentrent en collision avec les espèces neutres pour former des ions qui dérivent sous l'effet du champ : c'est la zone de dérive [56].

Comme pour la configuration fil-cylindre, le mécanisme de formation de la décharge couronne dépend de la polarité de la décharge. Dans les mêmes conditions, la zone de plasma pour la décharge en tension positive apparaît également inférieure à celle en tension négative, en raison du nombre plus faible d'électrons libres, comme présenté dans la description de la configuration fil-cylindre.

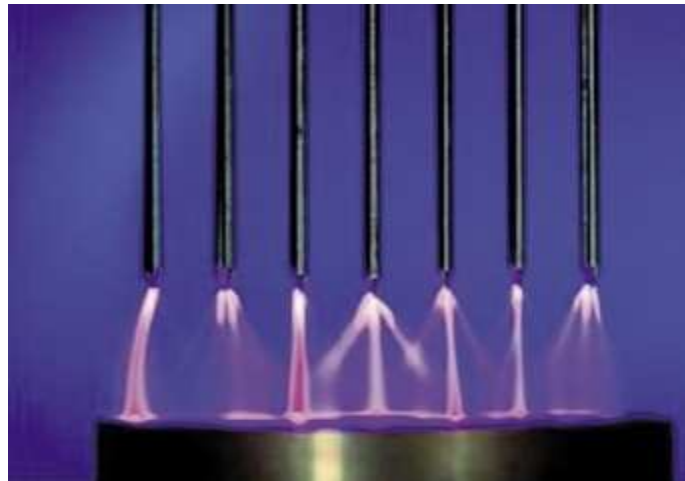


Figure 1-18 -Décharge corona pulsée avec plusieurs électrodes à aiguilles [64].

### 1.6.2. 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.1-19).

Lorsque la tension appliquée atteint la tension d'amorçage, une micro-décharge s'établit entre l'électrode et le diélectrique (Fig.1-20(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 (Fig.1-20(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.1-20(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 [56].

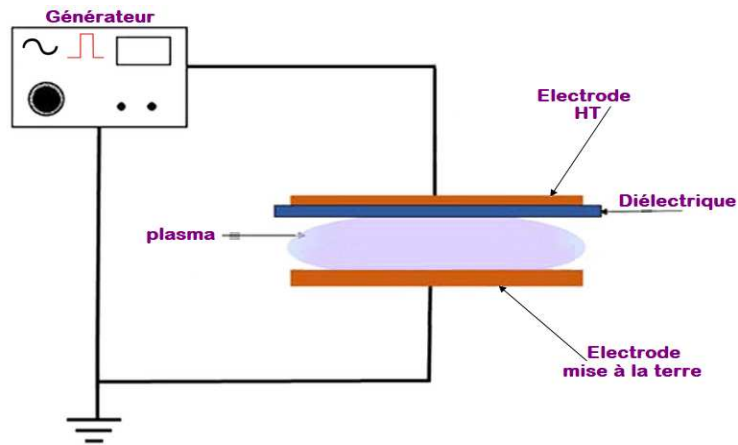


Figure 1-19 -Schéma de principe d'un DBD simple.

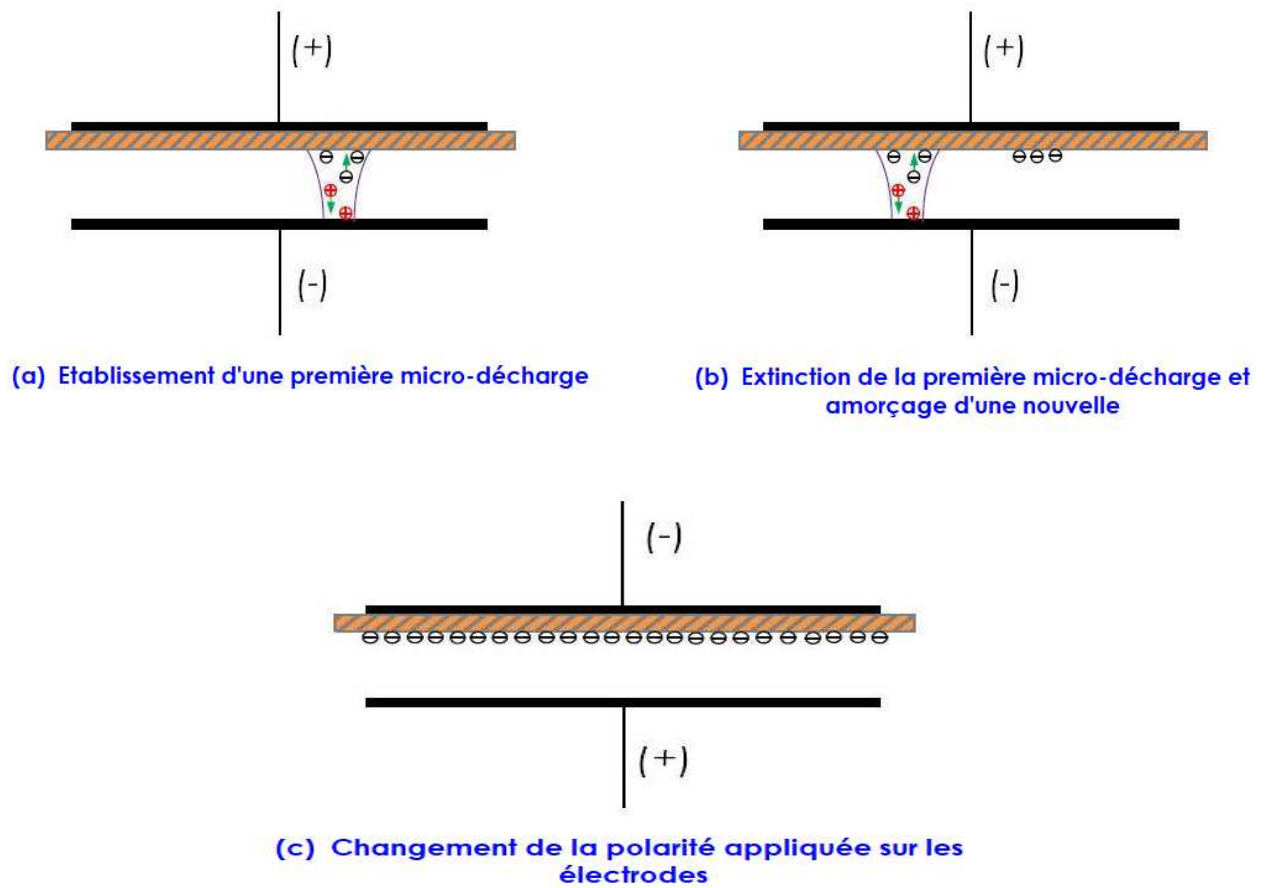


Figure 1-20 -Principe de déroulement d'une DBD [65].

## 1.6. Conclusion

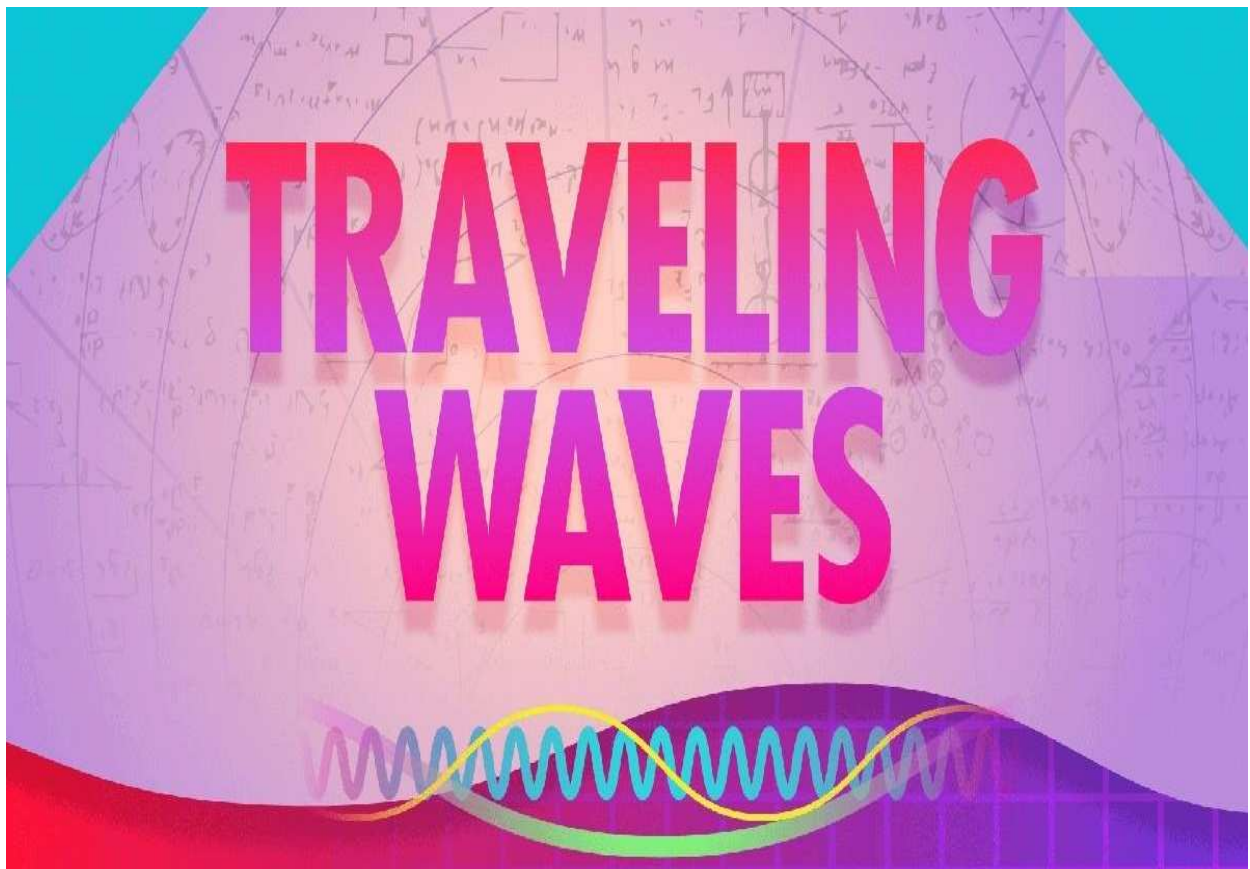
Nous avons présenté dans ce chapitre les notions principales des rideaux électriques. L'effet des ondes mobiles est généré par un réseau d'électrodes disposées en peigne sur la surface et recouvertes d'une fine couche d'isolant. La première condition de mise en mouvement des particules est l'acquisition 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 une étude expérimentale effectuée avec un convoyeur à ondes mobiles à une seule face.

# DEUXIÈME CHAPITRE

Étude expérimentale

avec le convoyeur à une seule face





## Chapitre 2

### Étude expérimentale avec le convoyeur à une seule face

#### 2.1. Introduction

Il existe plusieurs méthodes électrostatiques pour l'induction du mouvement de translation de petites particules qui peuvent être utilisées pour la manipulation et/ou la séparation de particules. L'une de ces méthodes est la diélectrophorèse par l'utilisation de la technique du rideau électrique. Il existe de nombreuses méthodes de séparation des particules basées sur la diélectrophorèse dans la littérature, chacune avec ses propres avantages et limites [66-67].

La plupart des techniques fonctionnent en exerçant simultanément des forces de signes opposés sur des particules de types différents, ce qui les amène à être attirées ou repoussées d'un endroit particulier [68-69].

La technologie des rideaux électriques présente une approche alternative intéressante pour la séparation des particules chargées, car la méthode de transport des particules est directement liée à la charge de particules [70].

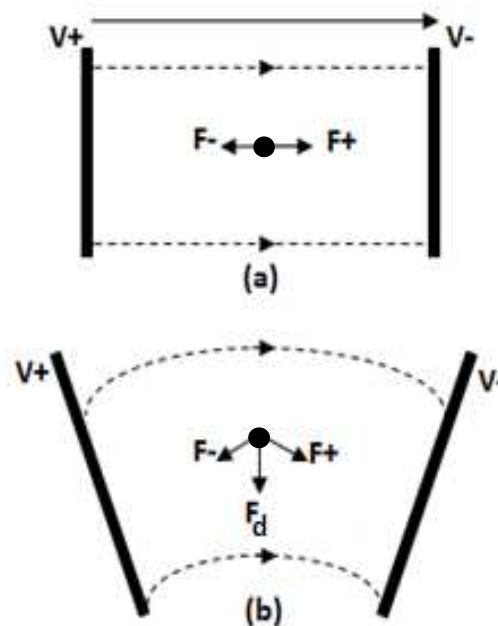
#### 2.2. Convoyeurs à ondes mobiles

##### 2.2.1. Généralités

Le rideau électrique est composé d'une série d'électrodes parallèles alternées, et décalées par un certain déphasage. Il en y a deux catégories : l'une est le rideau électrique à ondes stationnaires qui est connecté à une alimentation électrique alternative monophasée, et l'autre est le rideau électrique à ondes mobiles, qui est connecté à une alimentation polyphasée en courant alternatif [71-72].

### 2.2.2. Champ électrique généré par un rideau électrique

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. L'anisotropie du champ électrique est donc une condition nécessaire à la manipulation des particules (Fig.2-1).



**Figure 2-1-** 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 diélectrophorèse 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 [73]. 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.

Un film de ruban adhésif isolant recouvre le convoyeur afin de minimiser le risque de rupture d'étincelles entre les électrodes.

### 2.3. Montage expérimental utilisé

Le dispositif expérimental utilisé dans ces expériences est constitué de deux convoyeurs : un convoyeur biphasé et un autre triphasé, à deux et à trois phases respectivement. En plus, un système qui permet son inclinaison jusqu'à un angle de  $180^\circ$  a été réalisé pour étudier l'effet de la force d'attraction appliquée sur les particules de métal. Ces convoyeurs sont décrits ci-dessous.

#### 2.3.1. Convoyeur biphasé

Deux convoyeurs biphasés ont été réalisés à l'aide d'une plaque en Plexiglas avec les dimensions  $120 \times 140 \text{ mm}^2$  sur lesquels sont placés des fils en cuivre séparés par un intervalle  $d$  égal à  $1 \text{ mm}$  pour le 1<sup>er</sup> convoyeur et égal à  $2 \text{ mm}$  pour le 2<sup>ème</sup> convoyeur (Fig.2-2).

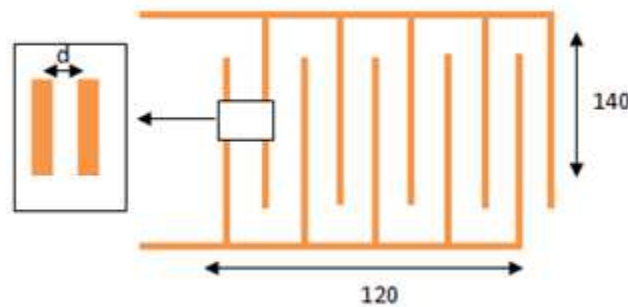
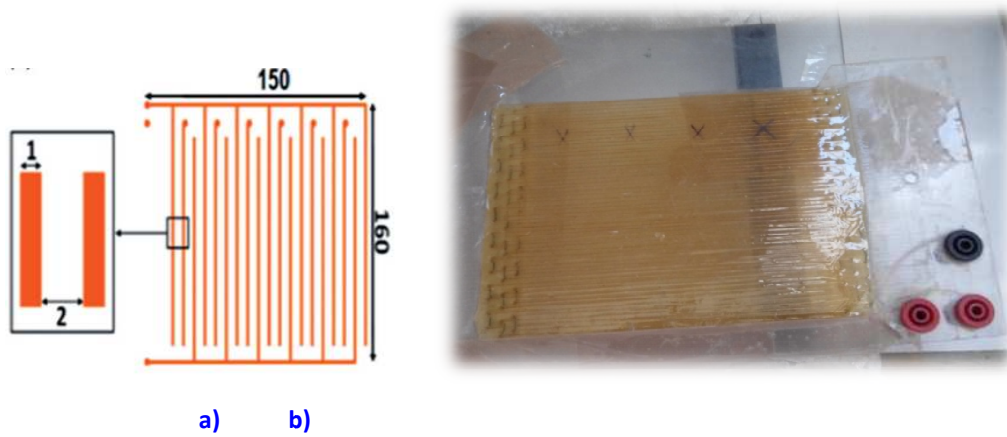


Figure 2-2-Dimensions des convoyeurs à ondes mobiles biphasés  
(Dimensions indiquées en mm).

#### 2.3.2. Convoyeur triphasé

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



**Figure 2-3-** Convoyeur à ondes mobiles triphasé

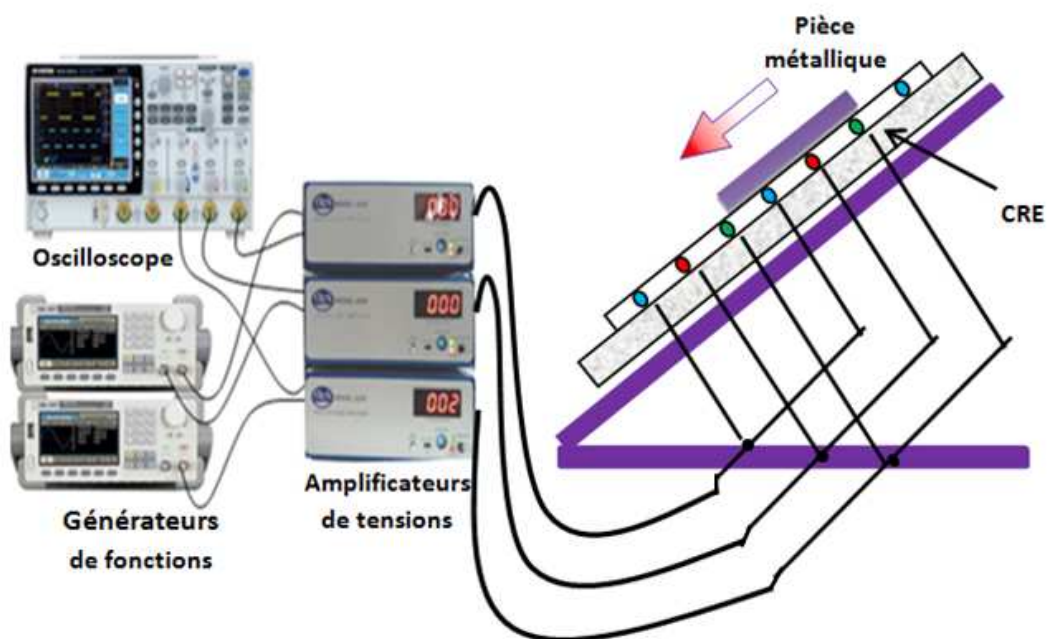
a) Dimensions du convoyeur à ondes mobiles (en mm)

b) Photographie du convoyeur triphasé

Les électrodes de la même phase sont connectées ensemble. Les phases sont alimentées par des tensions alternatives de signal de forme carrée, ayant un déphasage de  $120^\circ$  entre elles.

### 2.3.2.1. Dispositif expérimental

Le schéma descriptif de la Figure 2-4 représente le dispositif expérimental avec les connexions du convoyeur au système d'alimentation. Le déphasage est illustré sur la Figure 2-5.



**Figure 2-4-** Schéma descriptif du montage expérimental.

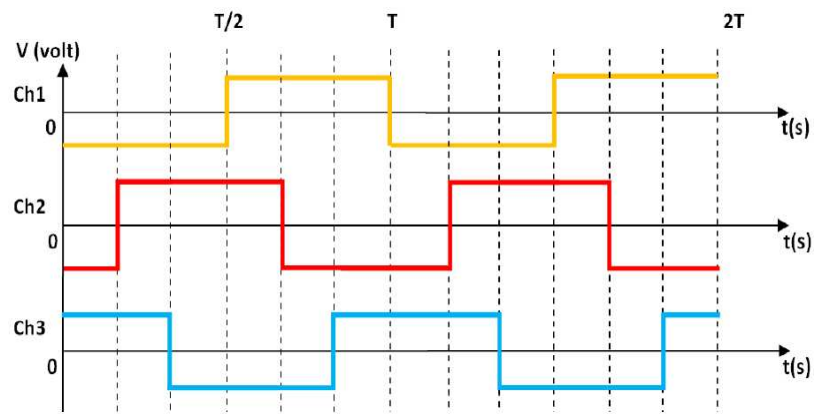


Figure 2-5 -Formes du signal triphasé appliqué aux électrodes.

Dans le but de déterminer l'angle de décrochage à partir duquel les pièces métalliques se détachent de la surface du convoyeur, un dispositif mécanique a été réalisé sur lequel le convoyeur à ondes mobiles (COM) est fixé. Ce dispositif permet de faire incliner le convoyeur manuellement d'un angle initial de  $0^\circ$  jusqu'à un angle de  $180^\circ$  (Fig. 2-6).

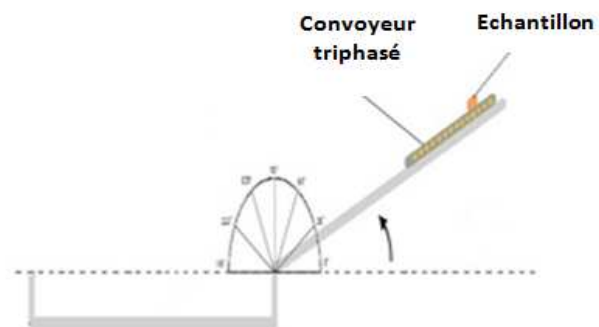
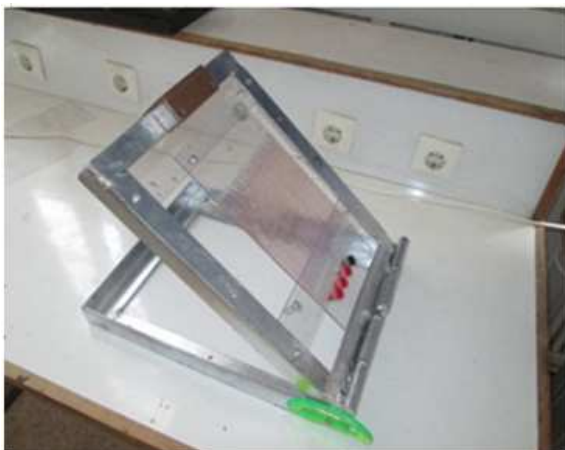


Figure 2-6-Dispositif mécanique utilisé.

## 2.4. Matériels utilisés

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

### 2.4.1. 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  $\pm 2$  kV CC** ou crête AC avec une plage de courant de sortie de **0 à  $\pm 20$  mA** crête AC et une large bande passante DC à **7,5 kHz ( $-3$  dB)**.



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

### 2.4.2. 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**.

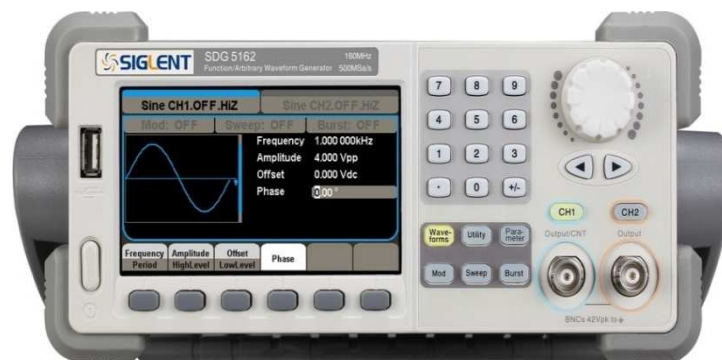


Figure 2-8 - Générateur de fonction Siglent SDG 5122.

### 2.4.3. 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.

#### 2.4.4. Générateur de haute tension continue

L'alimentation haute tension utilisée délivre une tension continue de **30 kV** avec un courant de **9 mA** (Spellman, **30 kV, 9 mA**). Elle a été utilisée pour alimenter le convoyeur avec une tension continue pour une comparaison avec une tension alternative de forme carrée.

#### 2.4.5. Transformateur HT à point milieu

On utilise un transformateur à point milieu représenté par la Figure 2-9. Ce transformateur permet d'avoir une tension "symétrique". La Figure 2-9(a) montre que dans un transformateur à point milieu, la tension maximale se forme dans chaque moitié du transformateur en se servant du point milieu comme point neutre et qui sert aussi, de masse.

Le transformateur haute tension à point milieu (ZM 20/14, Siemens) utilisé, de fréquence **50 Hz**, comprend deux enroulements HT secondaires qui délivre chacun une tension maximale de **7 kV** avec un courant de **20 mA** (Fig.2-9(b)). Les deux tensions sinusoïdales ont même amplitude et sont déphasées par un angle de **180°**.

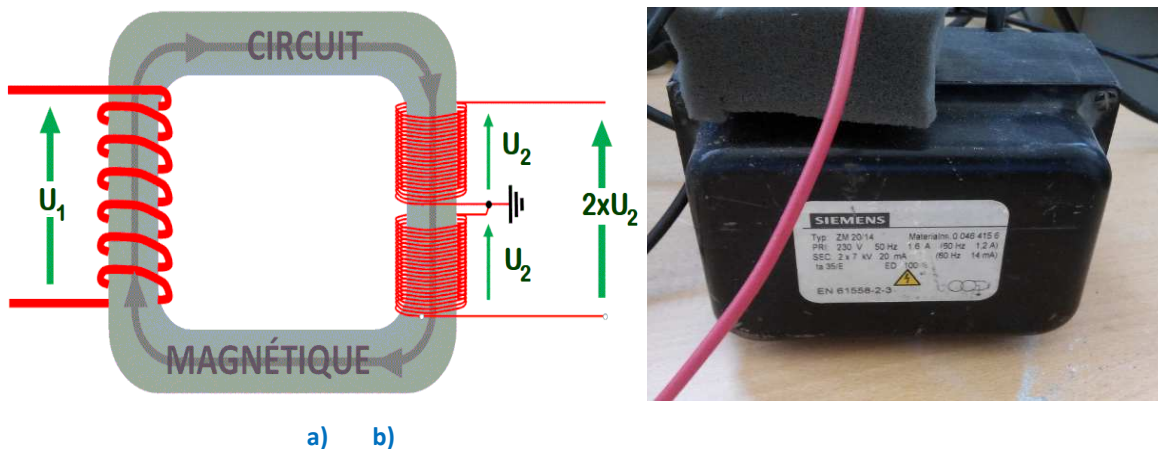


Figure 2-9– Transformateur à point milieu utilisé : a) schéma descriptif ;b) photographie.

#### 2.4.6. Autotransformateur

Le bobinage primaire du transformateur haute tension à point milieu a été alimenté par un autotransformateur (Fig.2-10). Ce dernier permet de faire varier des tensions alternatives de zéro à la valeur maximale avec une capacité constante en courant.

Les caractéristiques principales de l'autotransformateur utilisé sont regroupées dans le tableau 2-1.

Tableau 2-1 – Caractéristiques de l'autotransformateur

Référence	Puissance [kVA]	Primaire [V]	Secondaire [V]	Secondaire [A]	Poids [kg]	Dimensions
ALT7-PE	1,890	220/240	0 - 260	7	7,9	230x140x250

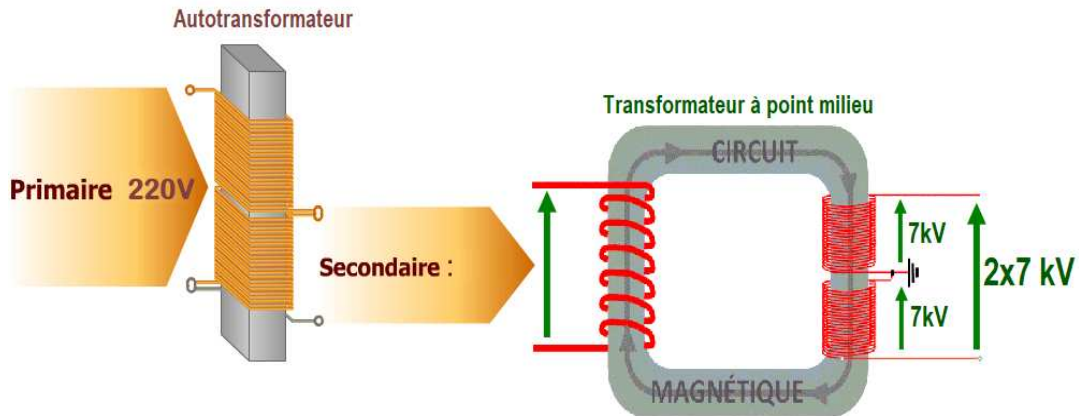


Figure 2-10- Autotransformateur alimentant le transformateur à point milieu.

#### 2.4.7. Sonde Haute Tension

Les mesures de la haute tension ont des exigences différentes de la mesure en basse tension ; les sondes utilisées dans notre travail (série PVM) sont bien conçues pour la plupart de ces exigences. Les sondes PVM sont conçues pour une large bande passante et une facilité de portabilité là où une variété de mesures doit être effectuée.

La tension inter-électrodes est mesurée par l'intermédiaire d'une sonde haute-tension (Tektronix modèle P6015 A, ayant un rapport de conversion de **1** pour **1000**, tension maximale **40kV**, impédance de **100 MΩ**: (Fig.2-11)). La sonde connectée à la voie **1** de l'oscilloscope est disposée entre la sortie du transformateur haute-tension et la terre.



Figure 2-11– Sonde haute tension utilisée.

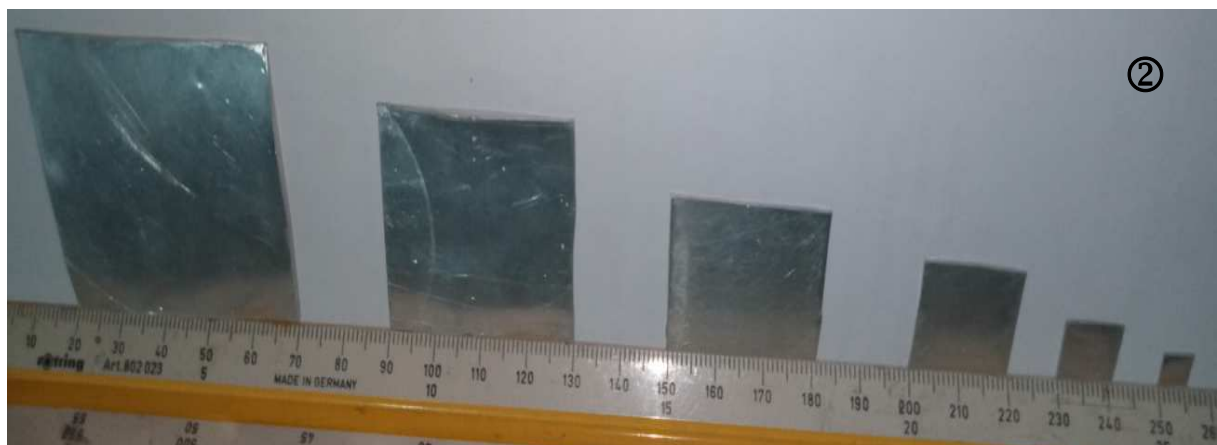


### 2.4.8. Balance utilisée

La balance utilisée est de marque OHAUS AX423 et a une portée de 420g et une précision de 1 mg.

### 2.5. Pièces de métal utilisées











Les expériences ont été effectuées en utilisant des pièces d'aluminium de forme carrée de différentes dimensions, des pièces de cuivre de forme rectangulaire d'une surface de  $13 \times 7 \text{ mm}^2$  (Fig.2-12), et des brins de fil de cuivre de diamètre  $0,31 \text{ mm}$  et de plusieurs longueurs différentes variant de  $1$  à  $10 \text{ mm}$  (Tableau 2-2).



**Figure 2-12**—Pièces de métal utilisées

- ① - Pièces de cuivre de dimensions  $13 \times 7 \text{ mm}^2$  ;
- ② - Pièces carrées d'aluminium de différentes dimensions.

Tableau 2-2-Brins de fil de cuivre de tailles différentes.

Taille (mm)	1	2	3	4	5
Cuivre					
Taille (mm)	6	7	8	9	10
Cuivre					

## 2.6. 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 en utilisant des pièces de cuivre et d'aluminium. 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 et la forme de la tension, 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 continue générée par un générateur de haute tension continue de **30 kV**.
- Une tension alternative sinusoïdale qui est délivrée par un transformateur à point milieu d'amplitude **7kV**.

Pour chaque expérience, trois pièces identiques du même métal ont été placées dans une zone bien définie sur 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 jusqu'à ce que les pièces se détachent l'une après l'autre de la surface du convoyeur.

Pour les pièces de cuivre rectangulaire de dimension **13x7 mm<sup>2</sup>**, La valeur de l'angle mesurée pour chaque pièces est alors la valeur pour laquelle la pièce se détache de la

surface du convoyeur. La valeur de  $\alpha = 180^\circ$  correspond au cas où la pièce reste attachée au convoyeur après une inclinaison du convoyeur d'un angle de  $180^\circ$ .

Notons que chaque expérience a été répétée deux fois et la valeur moyenne a été utilisée pour tracer les courbes.

Pour les pièces d'aluminium de forme carrée, la valeur de l'angle mesurée est alors la valeur pour laquelle les 3 pièces se détachent de la surface du convoyeur. La valeur de  $\alpha = 180^\circ$  correspond alors au cas où les 3 pièces restent attachées au convoyeur après un retournement du convoyeur d'un angle de  $180^\circ$ . La valeur moyenne des angles de chute des trois échantillons identiques a été prise en compte pour le tracé des courbes.

## 2.7. Résultats obtenus et discussion

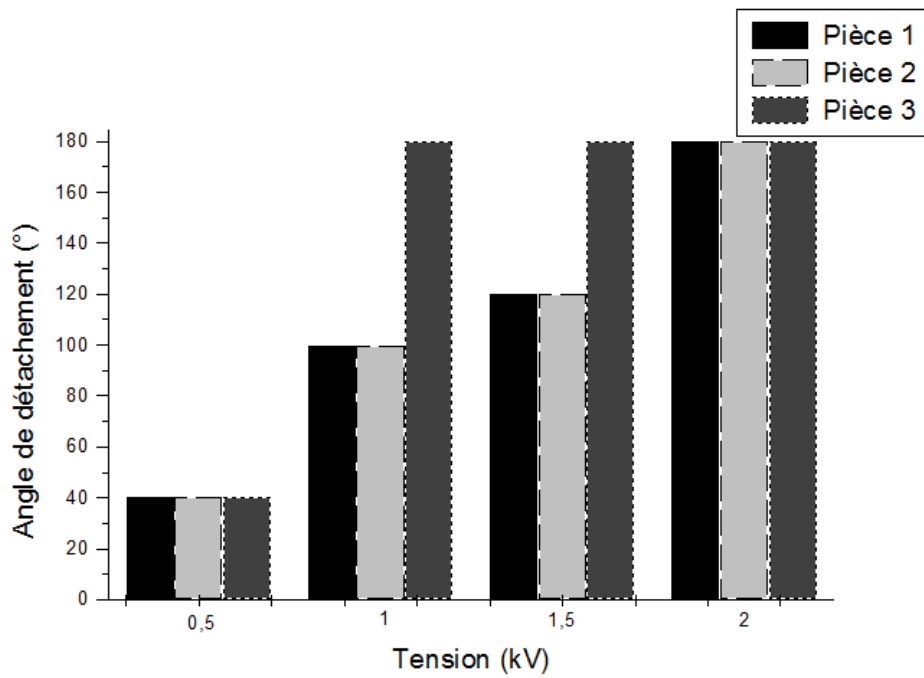
Cette partie est consacrée à la présentation et la discussion des résultats obtenus avec les convoyeurs à 2 phases et à 3 phases.

### 2.7.1. Utilisation d'un convoyeur biphase

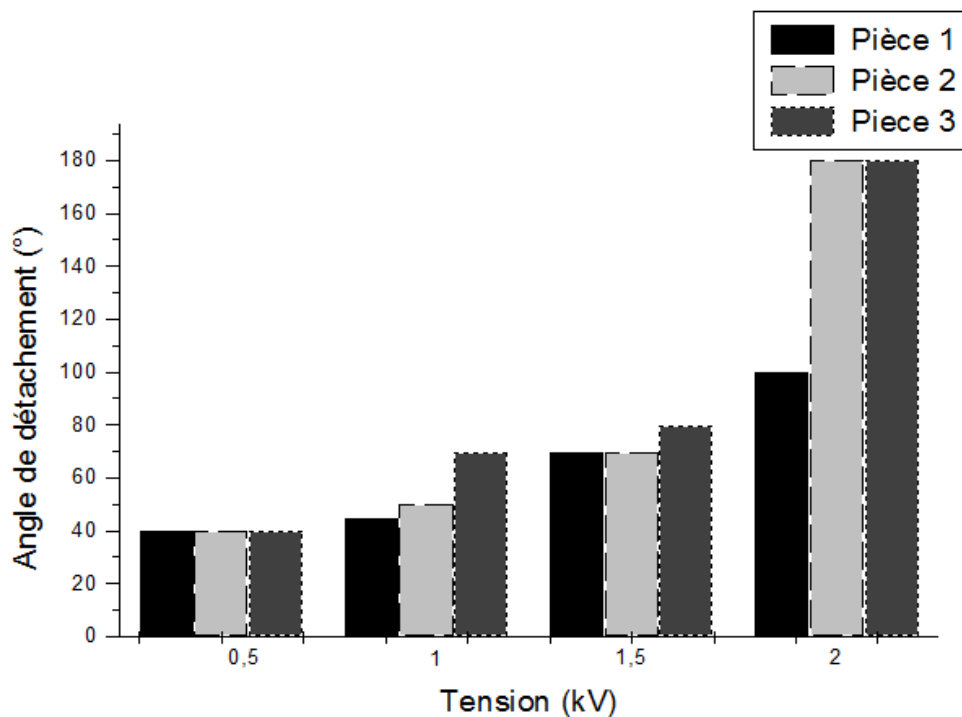
#### 2.7.1.1. Application d'une tension alternative carrée

Nous présentons ici les résultats obtenus avec une tension de forme de signal carrée. La Figure 2-13 représente la variation de l'angle de détachement  $\alpha$  des pièces de cuivre rectangulaire de dimension  $13 \times 7 \text{ mm}^2$  en fonction de la tension appliquée pour une fréquence  $f = 100 \text{ Hz}$ , pour deux valeurs différentes de la distance inter-électrodes ( $d = 1 \text{ mm}$  et  $d = 2 \text{ mm}$ ).

Pour  $d = 1 \text{ mm}$ , à  $U = 2 \text{ kV}$  toutes les pièces métalliques sont attachées la surface du convoyeur après renversement total du convoyeur, c'est-à-dire une inclinaison  $\alpha = 180^\circ$ .



(a)



(b)

**Figure 2-13-** Variation de l'angle de détachement des pièces de cuivre rectangulaire de dimensions  $13 \times 7$  mm<sup>2</sup> en fonction de la tension appliquée ( $f=100$  Hz).

a)  $d=1$  mm et b)  $d=2$  mm.

Les résultats obtenus à la Figure 2-13 montrent qu'il y a bien une force d'attraction appliquée sur les pièces de cuivre, force qui augmente avec la tension et qui est plus grande pour une plus petite valeur de la distance inter-électrodes  $d$ . Cette force est en effet plus

grande lorsque le champ électrique est élevé lequel cause l'apparition d'une charge d'induction sur les pièces de métal. Le champ électrique augmente pour de grandes valeurs de la tension et pour des petites valeurs de la distance  $d$ . En effet, la force d'attraction est proportionnelle avec l'amplitude de la tension appliquée et inversement proportionnelle avec l'écart inter-électrode.

La Figure 2-14 représente la variation de l'angle de détachement  $\alpha$  des pièces d'aluminium de forme carrée en fonction de la valeur de côté du carré, pour une tension appliquée  $U=2\text{ kV}$  et une fréquence égale à  $f=100\text{Hz}$  avec l'utilisation d'un rideau électrique où la distance inter-électrodes  $d=1\text{ mm}$ .

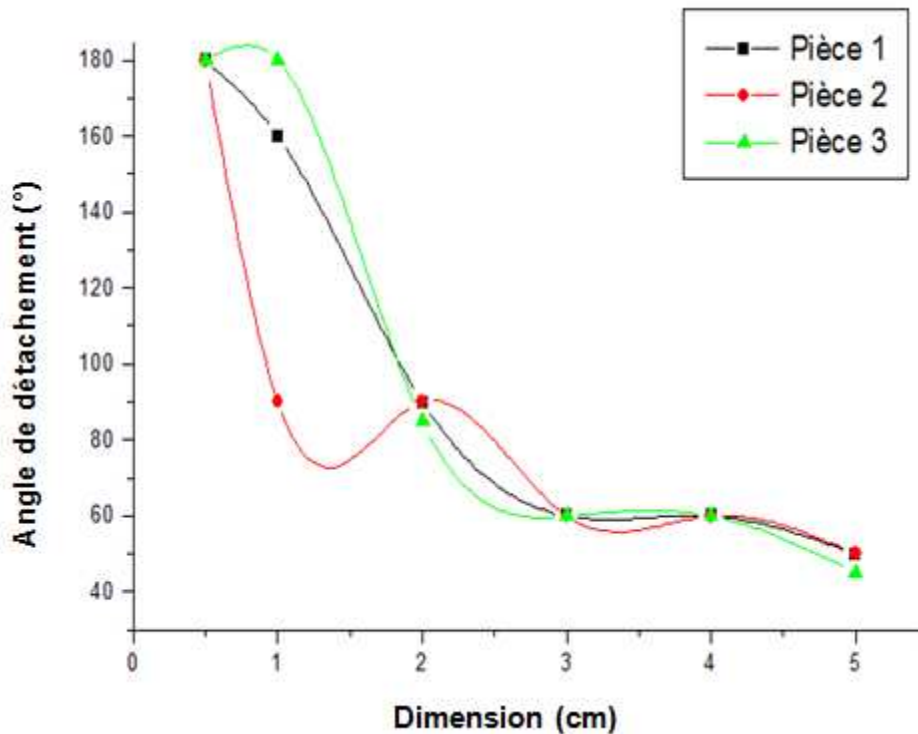


Figure2-14-Variation de l'angle de détachement des pièces métalliques de forme carrée en fonction de leur taille ( $U=2\text{kV}$ ,  $f=100\text{Hz}$ ,  $d=1\text{mm}$ ).

Les pièces d'aluminium de forme carrée de dimensions  $0,5 \times 0,5\text{ cm}^2$  sont toutes attachées à la surface du rideau électrique jusqu'à une valeur d'angle  $\alpha=180^\circ$ . Par contre, quand la taille des pièces augmente, elles sont détachées de la surface du rideau électrique car la masse de la pièce augmente et la force d'attraction devient inférieure à la force de gravitation. Pour des dimensions supérieures, l'attachement devient plus difficile, les pièces commencent à glisser à partir d'un angle de  $60^\circ$ .

### 2.7.1.2. Application d'une tension continue

Nous présentons dans cette partie les résultats obtenus avec une haute tension continue, en utilisant une première fois deux alimentations différentes de polarités opposées et une autre fois une seule alimentation.

#### a) Deux alimentations haute tension de polarités opposées

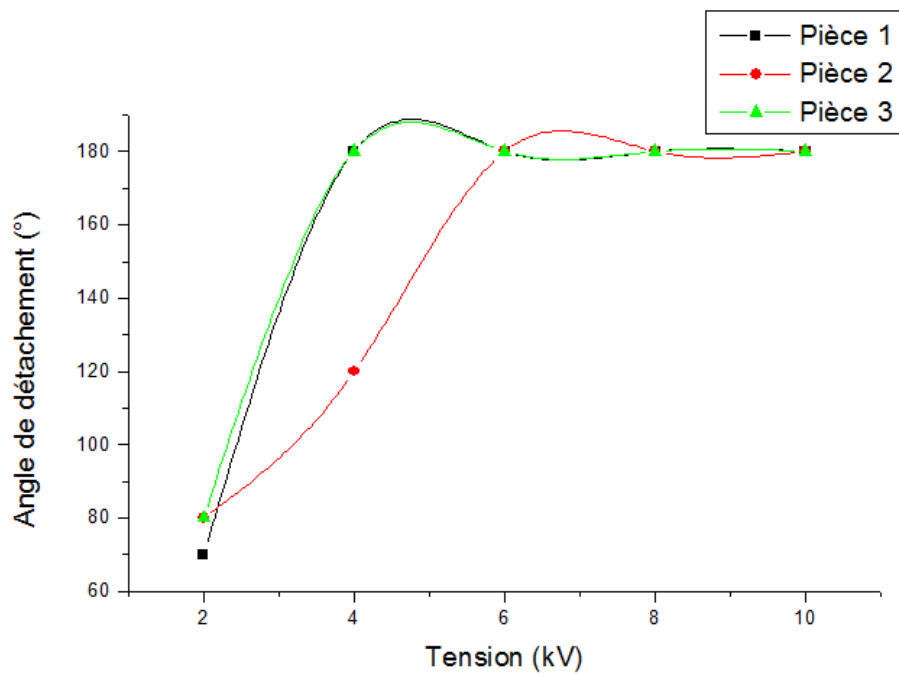
Pour ces expériences, une tension continue a été appliquée au convoyeur biphasé, une phase a été alimentée par une tension négative et l'autre phase par une tension positive. Le même dispositif à plan incliné a été utilisé pour déterminer l'angle de détachement des pièces de métal.

La Figure 2-15 représente la variation de l'angle de détachement des pièces de cuivre rectangulaires de dimension  $13 \times 7 \text{ mm}^2$  en fonction de la tension appliquée pour deux valeurs de la distance inter-électrode ( $d=1 \text{ mm}$  et  $d=2 \text{ mm}$ ).

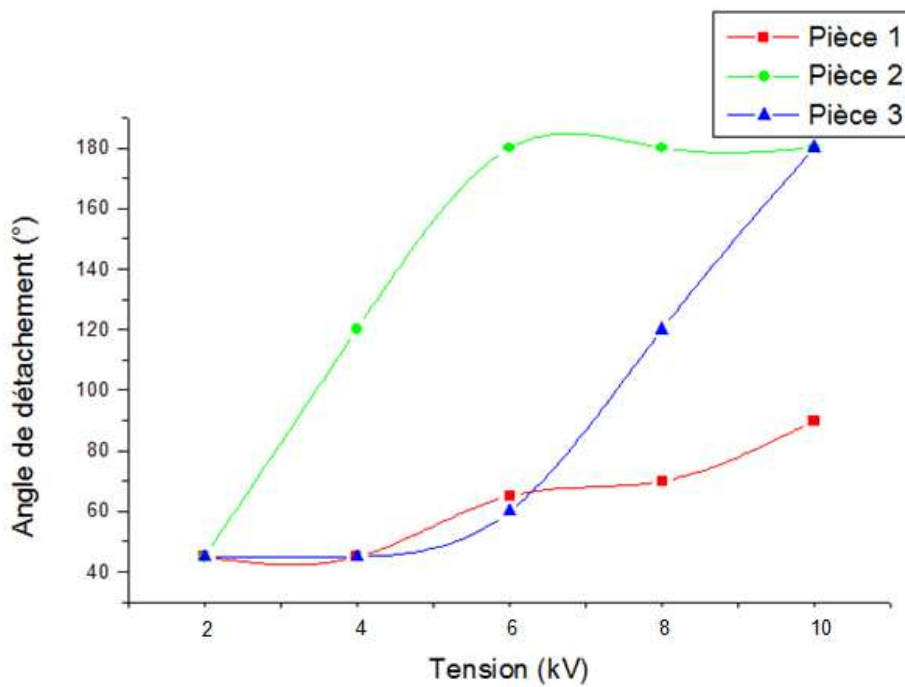
D'après les résultats obtenus, nous remarquons que l'attachement des pièces de métal est aussi possible avec une tension continue mais que l'attachement est moins important en comparaison avec la tension AC de signal carré. Pour  $d=1 \text{ mm}$ , à partir de  $U=6 \text{ kV}$ , toutes les pièces de cuivre ont été attachées à la surface malgré l'inclinaison du convoyeur  $\alpha=180^\circ$ . Par contre lorsqu'on a utilisé le deuxième convoyeur ( $d=2 \text{ mm}$ ) avec une tension  $U=10 \text{ kV}$ , l'attachement a été peu significatif (juste deux pièces de cuivre ont été attachées à la surface).

#### b) Une seule alimentation de haute tension

Pour ces expériences, une tension continue a été appliquée au convoyeur biphasé en utilisant une seule alimentation haute tension continue positive ; une phase a été alimentée par la tension positive et l'autre phase mise à la terre. Le même dispositif à plan incliné a été utilisé pour mesurer l'angle de détachement des pièces de métal.



(a)



(b)

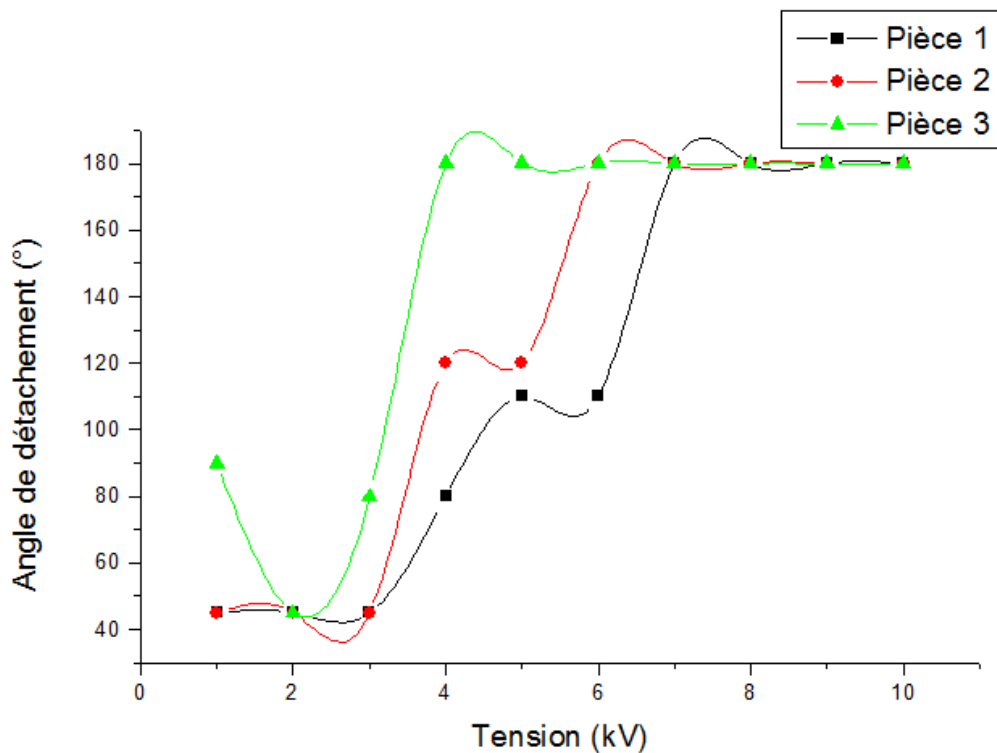
**Figure 2-15** -Variation de l'angle de détachement des pièces de cuivre rectangulaire de dimension  $13 \times 7 \text{ mm}^2$  en fonction de la tension appliquée (deux alimentations HT).

a)  $d=1 \text{ mm}$  et b)  $d=2 \text{ mm}$ .

Comme indiqué à la Figure 2-16, en utilisant un convoyeur avec  $d=1 \text{ mm}$ , les pièces métalliques ont été attachées à la surface du convoyeur à partir d'une tension de **6 kV**,

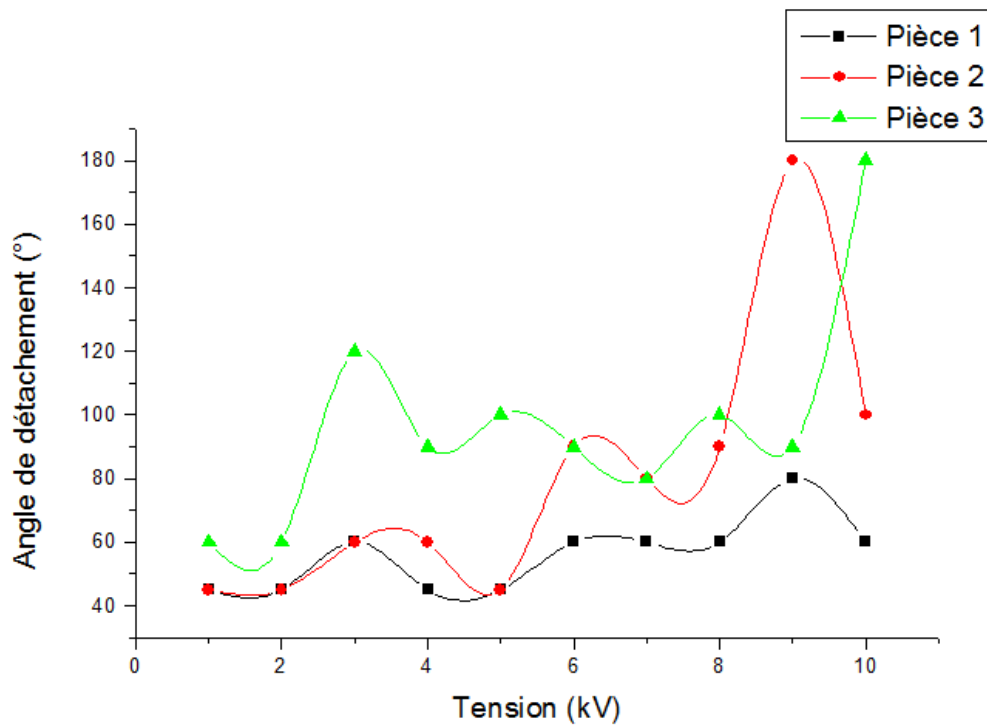
l'attachement est plus fort à partir de  $U=7$  kV. En revanche, en utilisant le convoyeur avec une distance  $d=2$  mm, l'attachement est beaucoup plus faible. Les pièces chutent même pour une tension aussi grande que 10 kV. Dans l'ensemble, ces résultats sont pratiquement concordants avec le cas de l'utilisation de deux alimentations de polarités opposées. En fait, c'est la même tension qui est appliquée dans les deux cas. Cependant, on peut affirmer que la force d'attraction est beaucoup plus grande en utilisant une tension AC de signal carré.

La Figure 2-17 représente la variation de l'angle de détachement des pièces d'aluminium de forme carrée de différentes dimensions en fonction de la tension continue appliquée. Les pièces chutent même pour une tension aussi grande que 10 kV sauf les pièces des dimensions  $0,5 \times 0,5$  cm<sup>2</sup> ont été attachés à la surface du convoyeur à partir d'une tension de 10 kV.



(a)





(b)

Figure 2-16 -Variation de l'angle de détachement des pièces de cuivre rectangulaire de dimension  $13 \times 7 \text{ mm}^2$  en fonction de la tension appliquée (une seule alimentation HT).

a)  $d=1 \text{ mm}$  et b)  $d=2 \text{ mm}$ .

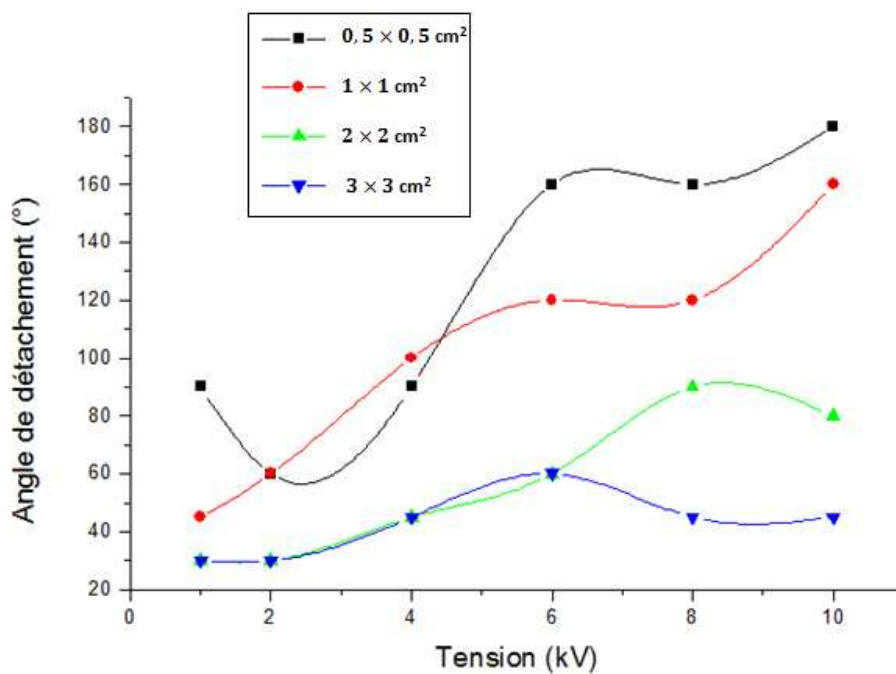


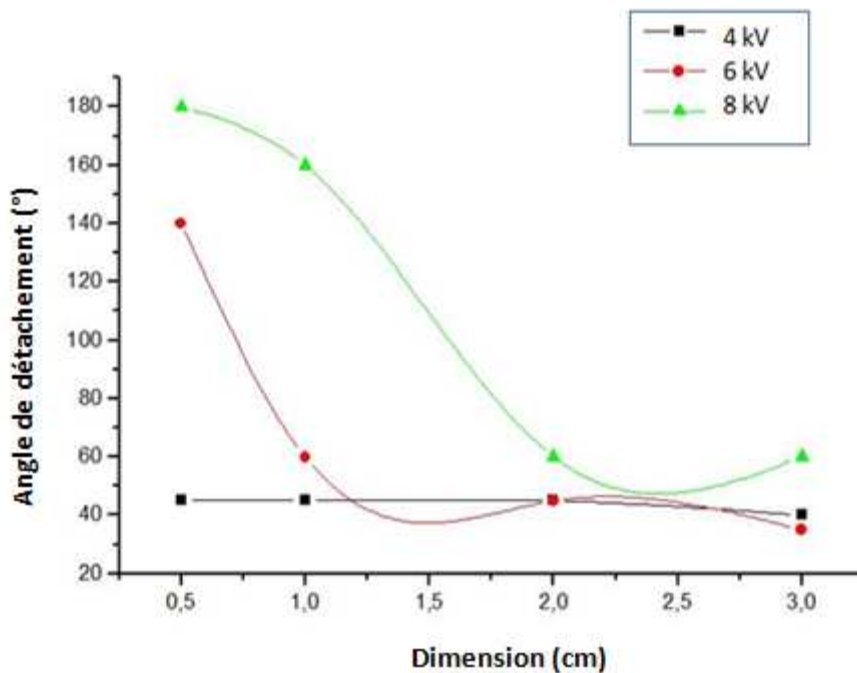
Figure 2-17-Variation de l'angle de détachement des pièces d'aluminium carrées de différentes dimensions en fonction de la tension appliquée (une seule alimentation HT,  $d=1 \text{ mm}$ ).

### 2.7.1.3. Application d'une haute tension alternative sinusoïdale( $f=50$ Hz)

Pour ces expériences, un transformateur de haute tension à point milieu a été utilisé qui délivre une tension de **7 kV** maximum en opposition de phase. La tension maximale que peut délivrer ce transformateur est donc égale à **14 kV** avec un courant maximal de **20 mA**.

Dans la figure 2-18, est représentée la variation de l'angle de détachement  $\alpha$  des pièces d'aluminium de forme carrée en fonction de la valeur de côté du carré, pour différentes valeurs de la tension appliquée. La tension a été variée jusqu'à **8 kV** maximum car au-delà il y a claquage entre les électrodes. À noter que les valeurs indiquées de la tension **U** correspondent aux valeurs crête à crête.

Selon les résultats obtenus, juste les pièces des dimensions **0,5×0,5 cm<sup>2</sup>** qui ont été attachées à la surface du convoyeur pour une tension égale à **8 kV**.



**Figure 2-18** - Variation de l'angle de détachement des pièces métalliques carrées en fonction de la dimension de la pièce pour différentes valeurs de tension appliquée,  $d=1\text{mm}$  (transformateur à point milieu).

### 2.7.2. Utilisation d'un convoyeur triphasé

Dans ce cas, nous avons utilisé le système d'alimentation utilisant les trois amplificateurs de haute tension TREK délivrant une tension de signal de forme carrée pour alimenter un convoyeur à trois phases.

### 2.7.2.1. Influence de taille des particules

Dans la Figure 2-19, est représentée la variation de l'angle de détachement  $\alpha$  des pièces d'aluminium de forme carrée en fonction de la valeur de côté du carré, pour une tension appliquée  $U= 1,8kV$  car au-delà il y a claquage entre les électrodes, et une fréquence  $f=100$  Hz.

Les résultats obtenus montrent que dans ce cas, la force d'attraction a un effet significatif sur l'attachement des pièces de métal, des pièces qui s'attachent à la surface du convoyeur jusqu'à des dimensions de  $3 \times 3 \text{ cm}^2$ .

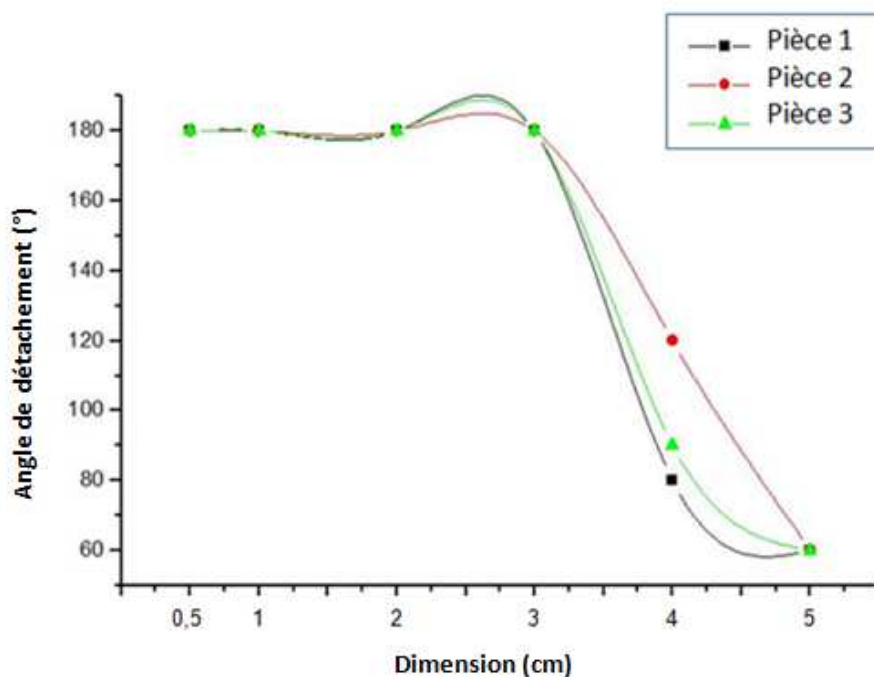


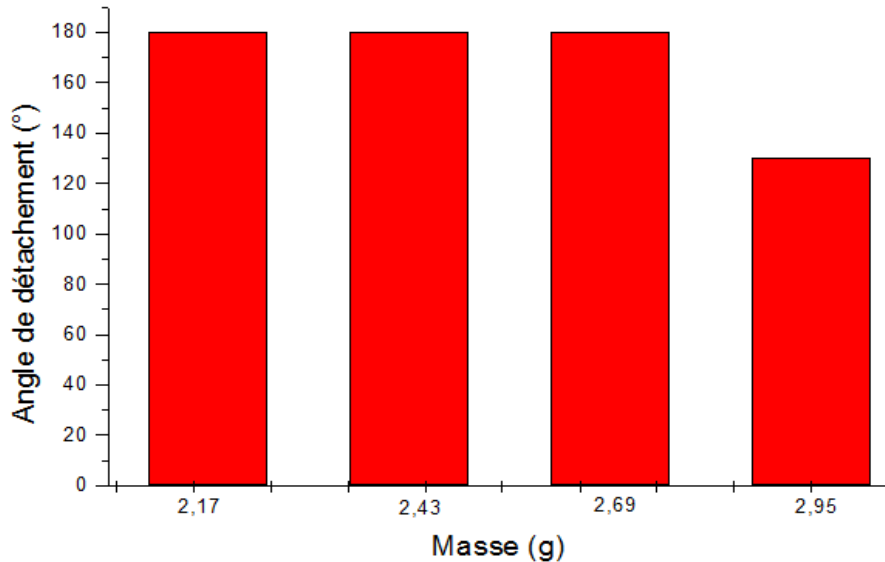
Figure2-19 -Variation de l'angle de détachement des pièces métalliques de forme carrée en fonction de la dimension de la pièce ( $U= 1,8kV$ ,  $f=100Hz$ ).

### 2.7.2.2. Influence de la masse des pièces

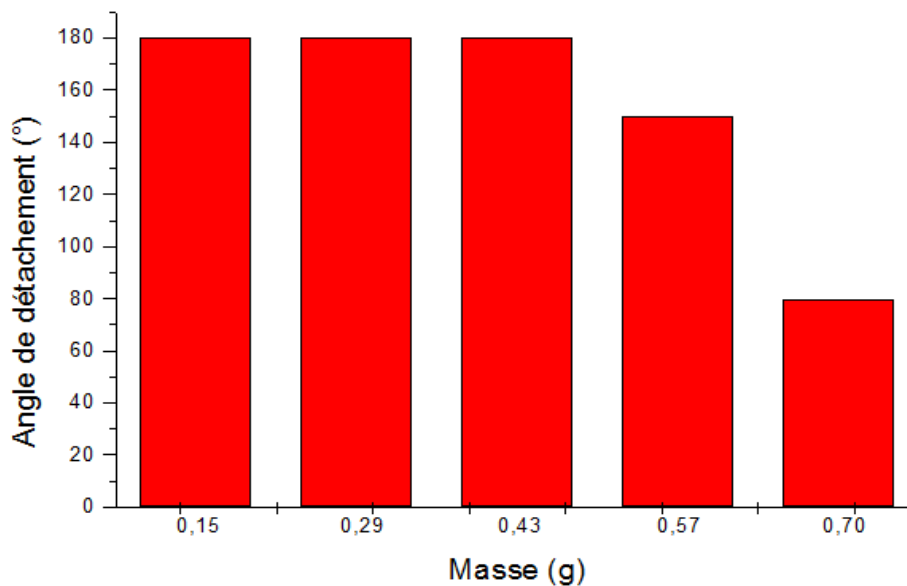
Les expériences suivantes ont été effectuées en utilisant des pièces de métal de forme carrée de mêmes dimensions de  $4 \text{ cm}$  de côté mais de masses différentes. À chaque fois, des masses supplémentaires représentées par des pièces en plastique qui ont été déposées sur les pièces de métal.

Selon les résultats obtenus à la Figure 2-20, nous avons remarqué que le convoyeur permet l'attachement de pièces jusqu'à une masse de  $2,7 \text{ g}$ . Ceci représente un résultat intéressant, car le convoyeur peut être utilisé pour attacher des pièces équivalentes à ces masses pour un éventuel transport en ascension, dans la robotique par exemple.

La Figure 2-21 représente la variation de l'angle de détachement des pièces d'aluminium de formes carrées de dimensions  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  en fonction de leur masse. À chaque fois, des masses supplémentaires représentées par des pièces de même matériau, de même forme de mêmes dimensions qui ont été déposées sur les pièces de métal. Dans ce cas aussi, cette force d'attraction peut être mise à profit pour transporter des pièces qui restent attachées, pour d'éventuelles applications en robotique par exemple.



**Figure 2-20-** Variation de l'angle de détachement des pièces métalliques carrées de dimensions  $4 \times 4 \text{ cm}^2$  en fonction de leur masse ( $U=1,8 \text{ kV}$ ,  $f=100 \text{ Hz}$ ).



**Figure 2-21-** Variation de l'angle de détachement des pièces métalliques en fonction de leur masse ( $U=1,8 \text{ kV}$ ,  $f=100 \text{ Hz}$ ).

### 2.7.2.3. Étude de la faisabilité de la séparation d'un mélange de particules métal/plastique

Pour ces expériences, une tentative d'attachement des particules de cuivre a été effectuée pour voir si le convoyeur agit sur les granules de métal. Un échantillon de particules de métal (qui est constitué par des brins de fil de cuivre de diamètre **0,31 mm**) de masse égale à **1 g** a été déposé en monocouche sur la surface du convoyeur triphasé.

Après avoir été alimenté, le convoyeur à trois phases a ensuite été lentement incliné jusqu'à  $\alpha=180^\circ$ . À la fin de chaque expérience, la masse des particules restant à la surface du convoyeur a été pesée à l'aide d'une balance de précision 1mg (OHAUS AX423).

Les résultats obtenus qui sont tracés à la Figure 2-22 montrent la variation de la masse en pourcentage des particules de cuivre restant collée à la surface du convoyeur après une inclinaison  $\alpha=180^\circ$ , en fonction de la longueur des particules.

Les masses en pourcents ont été estimées à l'aide des formules suivantes :

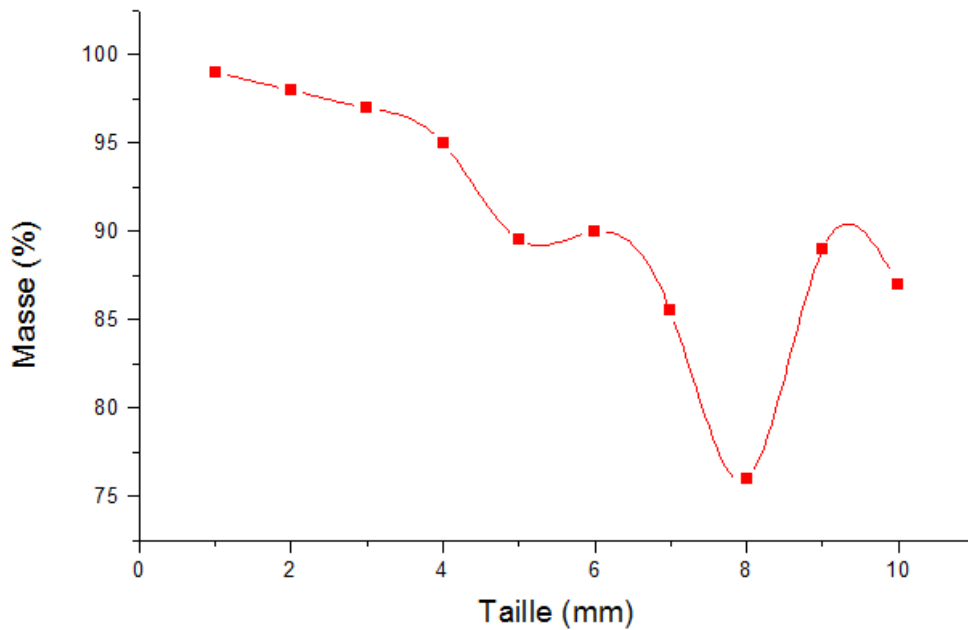
$$M(\%) = \frac{m_a}{m_T} \times 100 \quad (2.1)$$

Où :

$m_a$  : Masse des particules restant attachées à la surface du convoyeur.

$m_T$  : Masse totale des particules déposées à la surface du convoyeur.

Les résultats montrent que la force d'attraction exercée par ce convoyeur triphasé est suffisante pour des tailles inférieures ou égales à **4 mm**. En effet, plus de **95%** de la masse reste attachée à la surface. Au-delà, pour des dimensions plus grandes, le rendement diminue et chute légèrement pour des valeurs de l'ordre du cm.



**Figure 2-22**-Variation de la masse des particules de cuivre restant collée à la surface du convoyeur après une inclinaison  $\alpha=180^\circ$ , en fonction de la longueur des particules ( $U=1,8\text{kV}$ ,  $f=100\text{Hz}$ ).

## 2.7. Conclusion

Nous avons étudié dans ce chapitre la force d'attraction appliquée par les rideaux électriques biphasé et triphasé avec des espaces inter-électrodes différents ( $d=1\text{ mm}$ ,  $d=2\text{ mm}$ ). D'autre part, une analyse a été effectuée pour étudier l'influence de la forme de la tension appliquée aux électrodes du convoyeur sur l'intensité de cette force.

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) Plus la distance inter-électrodes diminue, plus la force d'attraction augmente.
- (3) Le champ électrique appliqué par un signal de forme carrée génère une force d'attraction plus grande que les autres formes de tension.

Le chapitre suivant 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.

# TROISIÈME CHAPITRE

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE  
AVEC LE CONVOYEUR  
BIPHASÉ

**DOUBLE**  
*face*

## Chapitre 3

### Étude expérimentale avec le convoyeur biphasé à double face

#### 3.1. Introduction

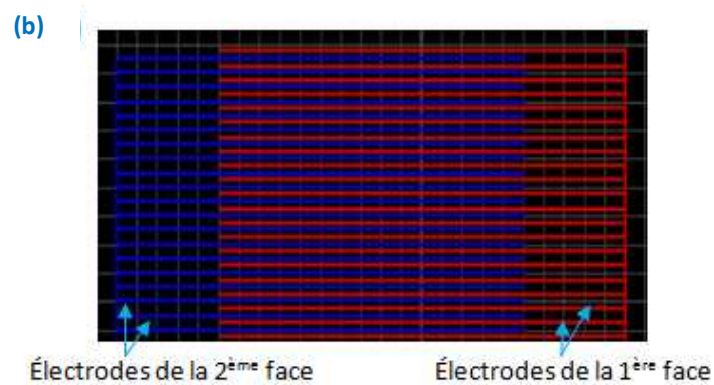
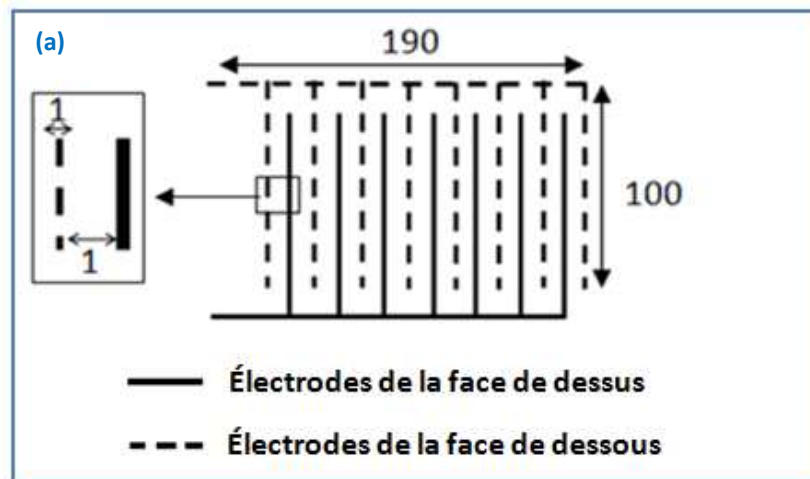
Une nouvelle configuration d'un convoyeur à ondes mobiles à double face (CRED), (en anglais : ElectricalCurtain Board) qui permet d'étudier la force d'attraction appliquée sur les particules métalliques a été développée et expérimentalement analysée dans ce chapitre. La nouvelle configuration du CRE 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 [16-20][22-23][74], 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  $\mu\text{m}$  et du  $\text{mm}$ , 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 **200x165 mm<sup>2</sup>**, sur laquelle ont été réalisées des électrodes de cuivre parallèles de **1 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(a)). Le traçage des électrodes a été effectué avec le logiciel de routage électronique "ISIS Ares"(Fig.3-1(b)). Une couche de vernis acrylique isolant recouvre la surface du circuit imprimé pour protéger les électrodes du convoyeur.

Une photographie du convoyeur utilisé est illustrée sur la figure 3-1 (c).





**Figure 3-1** –Convoyeur à double face utilisé  
(a)Schéma descriptif du convoyeur avec les dimensions en mm,  
(b)Convoyeur simulé par logiciel " ISIS Ares ",  
(c)Photographie du convoyeur à double face.

### 3.3. Échantillons de particules utilisés

Après avoir décrit le convoyeur CRED, nous allons nous intéresser aux différents échantillons utilisés. Ils sont composés de deux éléments distincts :

- Particules de métal ;
- Particule de plastique.

Quatre types de particules métalliques (cuivre, bronze, acier et aluminium) et un seul type de particules de plastique PVC (Chlorure de polyvinyle) ont été utilisés dans cette étude. Les valeurs de la conductivité et de la densité volumique des métaux utilisés sont résumées dans le tableau 3-1.

**Tableau 3-1** - Caractéristiques des métaux utilisés

Métal	Cuivre	Aluminium	Bronze	Acier
Conductivité $S.m^{-1}$	$58,7.10^6$	$36,9.10^6$	$7,4.10^6$	$5,9.10^6$
Densité $g/cm^3$	8,96	2,7-2,9	8,8	7,5-8

Des échantillons de granules de métal et de plastique de différentes tailles granulométriques ont été préparés à l'aide d'une machine à tamis vibrant (Fritsch). Le tamiseur possède une large gamme de tamis de mailles de tailles différentes (Fig. 3-2).



**Figure 3-2** - Photographie du tamiseur à vibrations FRITSCH.

Les aspects des particules et les valeurs des dimensions granulométriques sont reportés dans le tableau 3-2(a).

Les échantillons de particules utilisées dans ce travail sont de tailles différentes ( $250\mu m$ - $350\mu m$  –  $500\mu m$  –  $700\mu m$  –  $1mm$ -  $1,4mm$ -  $2mm$  et  $2,8mm$ ).





















Par ailleurs, les valeurs de la masse de chaque type de particule ont été pesées pour chaque taille, avec l'utilisation d'une balance électronique de précision **0,001 g**. Ces valeurs sont reportées dans le tableau 3-3.

**Tableau 3-2-** Aspects des particules et leurs tailles granulométriques.

(a) Tailles variant de **0,25 mm** jusqu'à **0,70 mm**.

(b) Tailles variant de **1 mm** jusqu'à **2,80 mm**.

(a)

Taille ( $\mu\text{m}$ )	250	350	500	700
Acier				
Bronze				
Aluminium				
Cuivre				
Plastique				

(b)

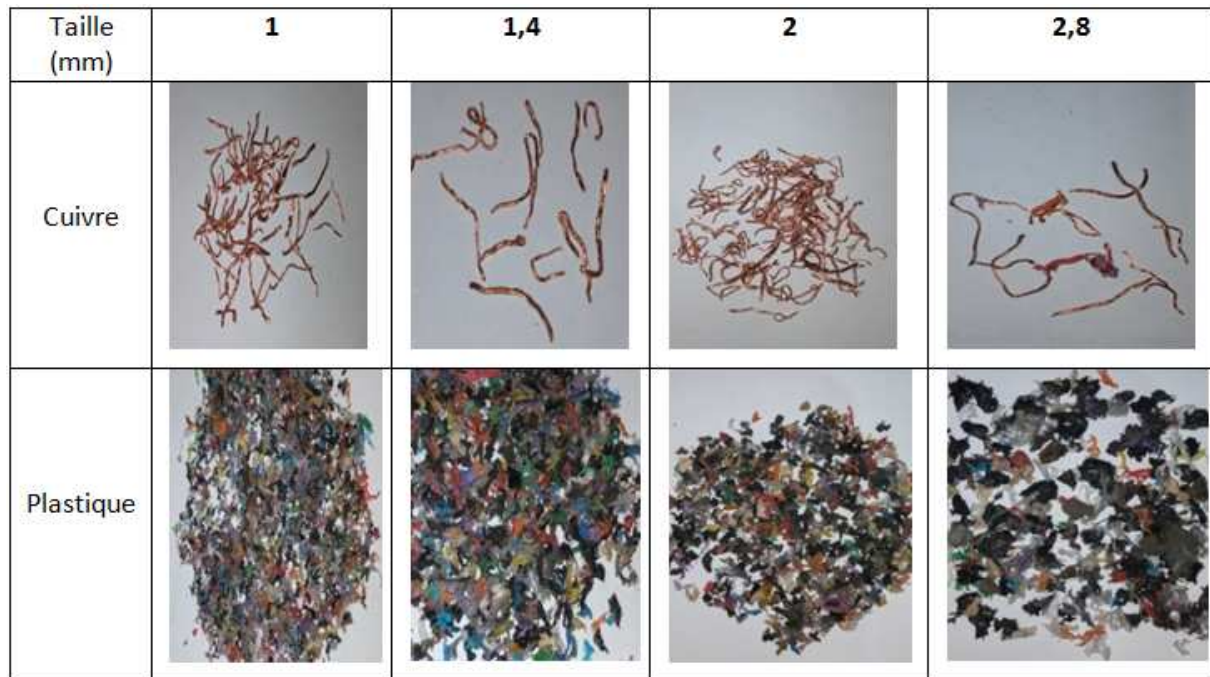
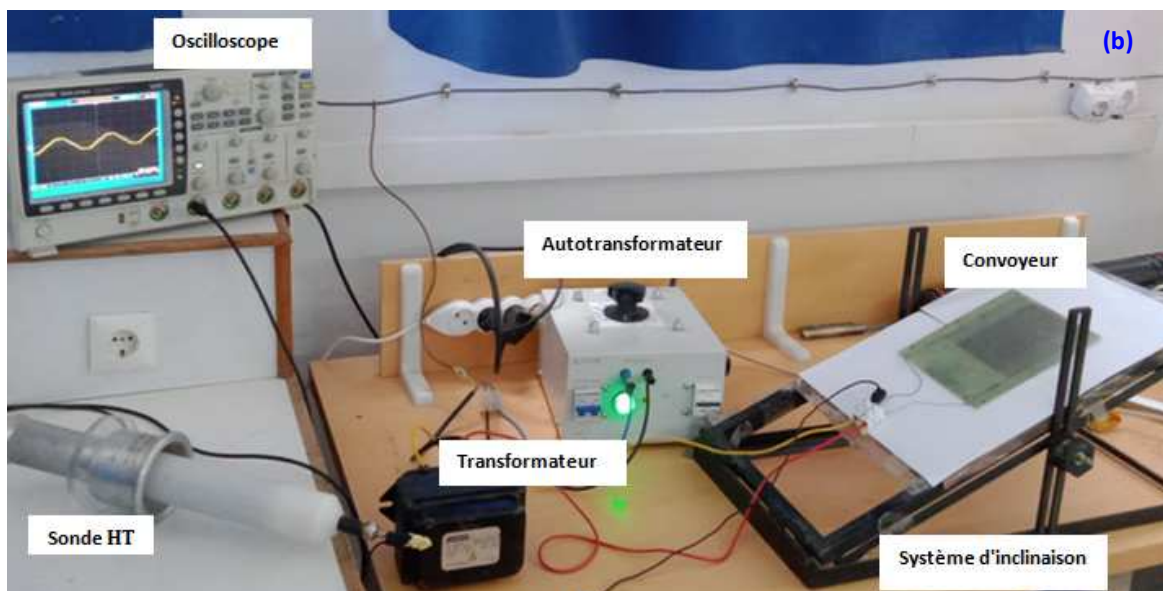
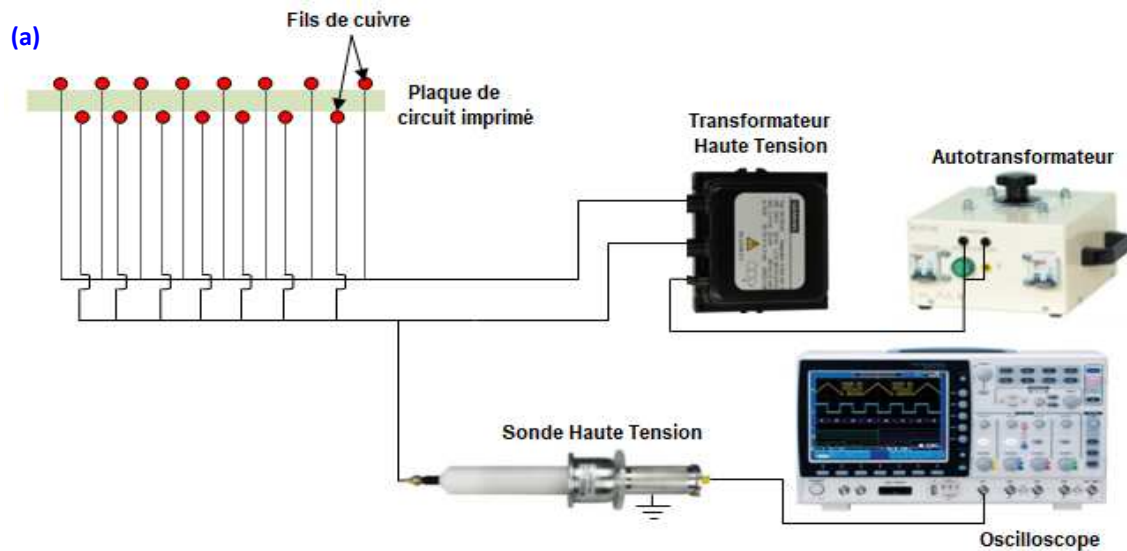


Tableau 3-3 -Valeurs moyennes de la masse d'une seule particule (en mg)

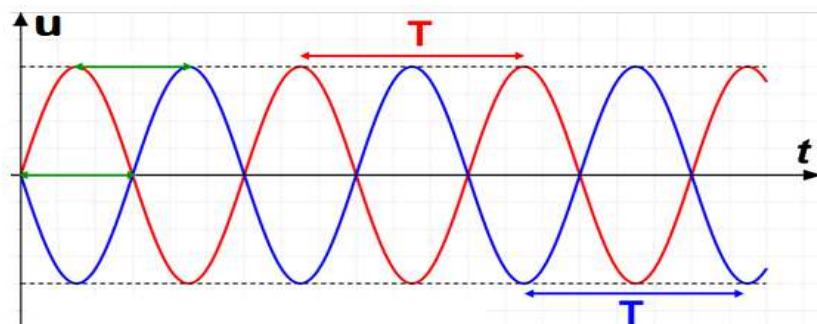
Taille ( $\mu\text{m}$ )	250	350	500	700
Acier	0,01	0,078	0,2	1
Bronze	0,15	0,40	0,8	1
Aluminium	0,085	0,12	0,06	0,17
Cuivre	Poudre	0,4	1,6	6,9
Plastique	Poudre	0,014	0,021	0,08

### 3.4. Montage expérimental

Le montage expérimental utilisé est montré sur la Figure 3-3. Il comprend un convoyeur "CRED" biphasé à double face, un simple transformateur de haute tension à point milieu de fréquence **50 Hz (7 kV, 20 mA)** contrôlé par un autotransformateur de **0-250 V** alimentant le bobinage primaire du transformateur. Le signal sinusoïdal de la tension alternative appliquée aux électrodes du convoyeur est visualisé à l'aide d'un oscilloscope numérique à mémoire vive (Gwinstek GDS-3154), par l'intermédiaire d'une sonde haute-tension (Tektronix modèle P6015 A) (Fig. 3-4).



**Figure 3-3** – Dispositif expérimental utilisé  
 (a) Schéma descriptif du dispositif expérimental utilisé,  
 (b) Photo du dispositif expérimental.



**Figure 3-4** - Forme de la tension produite par le transformateur à point milieu, appliquée aux électrodes (Déphasage de  $180^\circ$ ).

### 3.5. Procédure de déroulement des expériences

Un dispositif expérimental à inclinaison variable a été développé pour analyser à la fois la force d'attraction appliquée aux particules métalliques et la force diélectrophorétique appliquée aux particules de plastique. Le convoyeur a été fixé sur un dispositif mécanique permettant son inclinaison manuelle de  $0^\circ$  (conditions initiales, c'est-à-dire le plan horizontal) jusqu'à un angle de  $180^\circ$ . C'est le même dispositif que celui qui a été utilisé dans le chapitre 2.

Deux séries d'expériences ont été réalisées :

#### a. Expériences utilisant des pièces de métal de forme carrée

Les expériences ont été effectuées en utilisant des pièces d'aluminium de forme carrée de différentes tailles. Il s'agit des mêmes pièces que celles qui ont été déjà utilisées dans le chapitre 2. Pour chaque expérience, trois pièces identiques de la même taille ont été placées dans une zone bien définie sur 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 jusqu'à ce que les pièces se détachent l'une après l'autre de la surface du convoyeur. La valeur de l'angle mesurée est alors la valeur pour laquelle les 3 pièces se détachent de la surface du convoyeur. La valeur de  $\alpha=180^\circ$  correspond au cas où les 3 pièces restent attachées au convoyeur après un retournement du convoyeur d'un angle de  $180^\circ$ . La valeur moyenne des angles de chute des trois échantillons identiques a été prise en compte pour le tracé des courbes.

#### b. Expériences utilisant des mélanges de particules métal/plastique

Un échantillon de mélange de particules " métal/plastique " de même masse totale égale à **2 g**, comprenant **75 %** de métal et **25 %** de plastique, a été déposé en monocouche sur une même portion rectangulaire définie en amont du convoyeur CRED. Après avoir été alimenté, le CRED a ensuite été lentement incliné jusqu'à un angle  $\alpha=180^\circ$ .

À la fin de chaque expérience, la masse des particules chutant de la surface du convoyeur et celles restant attachée au CRED étaient pesées à l'aide d'une balance électronique de précision **1 mg**.

### 3.6. Résultats et discussion

L'efficacité de séparation des particules par le convoyeur a été estimée en mesurant les taux de pureté et de récupération des produits récupérés. La récupération et la pureté ont été calculées à l'aide des formules suivantes :

✓ Pour le produit métallique

$$\text{Réc}_m(\%) = \frac{m_a}{m_{T_1}} \times 100 \quad (3-1)$$

$$\text{Pur}_m(\%) = \frac{m_a}{m_{in}} \times 100 \quad (3-2)$$

Où :

$m_a$  : Masse des particules métalliques restant attachées à la surface du CRED.

$m_{T_1}$  : Masse totale des particules métalliques déposées à la surface du CRED.

$m_{in}$  : Masse totale des particules qui reste sur la surface du CRED.

✓ Pour le produit plastique

$$\text{Réc}_p(\%) = \frac{m_0}{m_{T_2}} \times 100 \quad (3-3)$$

$$\text{Pur}_p(\%) = \frac{m_0}{m_{out}} \times 100 \quad (3-4)$$

Où :

$m_0$  : Masse des particules de plastique quittant la surface du CRED.

$m_{T_2}$  : Masse totale des particules de plastique déposées à la surface du CRED.

$m_{out}$  : Masse totale des particules qui a chuté du CRED.

Toutes les expériences ont été réalisées dans des conditions stables de température (20-25 °C) et d'humidité (50-55%) ; en outre, chaque expérience a été répétée deux fois et la valeur moyenne a été utilisée pour le tracé.

#### 3.6.1. Étude de l'attachement des particules de métal et le déplacement des particules de plastique

##### 3.6.1.1. Expériences utilisant des pièces de métal de forme carrée

Dans la Figure 3-5, est représentée la variation de l'angle de détachement  $\alpha$  des pièces d'aluminium de forme carrée en fonction de leurs dimensions, pour différentes valeurs de la haute tension alternative appliquée. À noter que les valeurs indiquées de la tension  $U$  correspondent aux valeurs crête à crête.

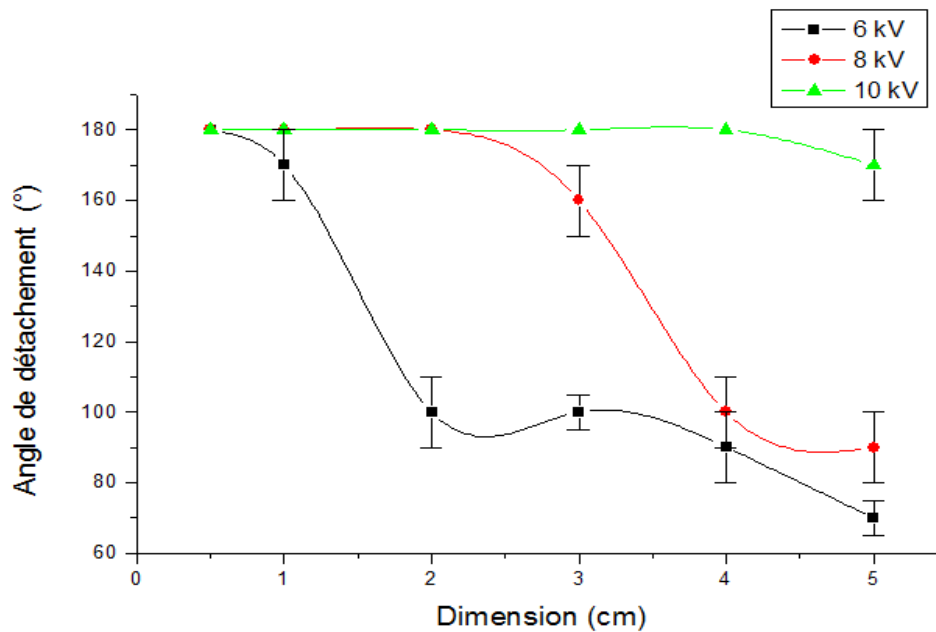


Figure 3-5 - Variation de l'angle de détachement des pièces métalliques de forme carrée en fonction de la dimension de la pièce pour différentes valeurs de la tension appliquée, ( $\alpha = 180^\circ$  : les pièces restent attachées à la surface de la CRED).

Comme montré à la Figure 3-5, la force d'attraction appliquée sur les particules d'aluminium dépend de la valeur de la tension appliquée. Notons que pour  $U=10 \text{ kV}$ , les pièces d'aluminium de dimensions  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  restent attachées à la surface du CRED.

L'origine de cette force n'est pas due seulement au champ électrique ; en effet, suite à l'application d'une tension continue ( $U_c=20 \text{ kV}$ ), au lieu d'une tension alternative, toutes les particules sont tombées du CRED. Une analyse numérique du champ électrique est développée à la fin de ce chapitre.

Le CRED a produit une force d'attraction qui a agi sur les pièces métalliques. Cette force d'attraction a fait que les pièces métalliques se sont "attachées" à la surface du convoyeur.

En plus de la force d'attraction, deux autres forces s'exercent sur la particule : la gravitation (son poids) et la réaction du sol.

1) On peut décomposer le poids en :

- Une **composante perpendiculaire** au sol, qui tend à "enfonce" la particule perpendiculairement dans le sol;
- Une **composante tangentielle**, qui tend à faire glisser la particule le long de la pente.

2) La réaction du sol a également deux composantes actives :



- La **composante normale** est exactement opposée à la composante normale du poids et empêche l'enfoncement de la particule, comme dans le cas sans frottement;
- La **composante parallèle** au sol, due au frottement, s'oppose au mouvement parallèle à la pente.

Le frottement peut

- soit empêcher complètement le mouvement (frottement statique supérieur à la composante tangentielle du poids);
- soit le ralentir (frottement cinétique).

Dans le cas présent, le frottement (statique ou cinétique) compense exactement la composante tangentielle du poids : il n'y a pas d'accélération (vitesse constante de glissade, éventuellement nulle). Ceci se manifeste par le fait que le centre de gravité de la particule est situé exactement à la verticale du point de contact avec le sol.

La force de frottement s'oppose au mouvement et agit dans le sens contraire à un éventuel mouvement qui pourrait se produire. Une force est nécessaire pour vaincre le frottement statique et pour initier le mouvement.

Sur les surfaces horizontales, cette force normale s'oppose à la force de la pesanteur. Sur un plan incliné, la force normale s'oppose à la force de la pesanteur agissant sur le plan :  $mg \cos \alpha$  où  $\alpha$  est l'angle entre le plan incliné et l'horizontale.

La force de frottement pour un plan incliné normal est définie comme suit (Figure 3-6) [75] :

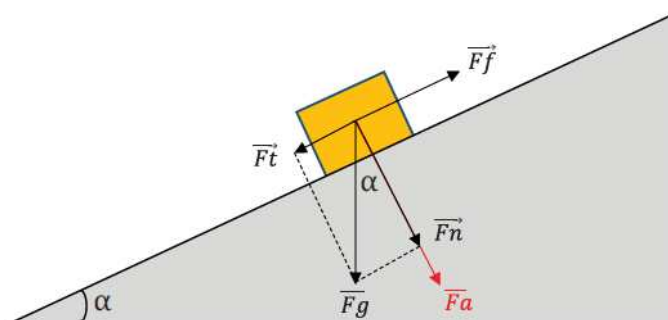


Figure 3-6 - Forces appliquées sur une pièce métallique.

La force de gravitationnelle  $\vec{F}_g$  agit strictement vers le bas, mais par rapport au plan incliné, elle a deux composantes :

- ➔  $F_t = F_g \times \sin(\alpha)$  : parallèle au plan ;
- ➔  $F_n = F_g \times \cos(\alpha)$  : perpendiculaire au plan

$$F_f = \mu \cdot F_n = \mu \cdot F_g \cdot \cos\alpha_0 \quad (3-5)$$

où  $\mu$  représente le coefficient de frottement.

Avant de glisser, la force de frottement est représentée par l'équation :

$$F_f = F_t = F_g \cdot \sin\alpha_0 \quad (3-6)$$

À partir des équations (3-5) et (3-6), le coefficient de frottement peut être défini comme :

$$\mu = \tan\alpha_0 \quad (3-7)$$

Avec la force d'attraction supplémentaire, la force de frottement devient :

$$F_f = \mu \cdot (F_a + F_n) = \mu \cdot (F_a + F_g \cdot \cos\alpha) \quad (3-8)$$

À partir des équations (3-6) et (3-8), la force d'attraction peut être définie comme suit :

$$\begin{aligned} \mu \cdot (F_a + F_g \cdot \cos\alpha) &= F_g \cdot \sin\alpha \Rightarrow F_a = \frac{F_g \cdot \sin\alpha - \mu \cdot F_g \cdot \cos\alpha}{\mu} \\ &\Rightarrow F_a = F_g \cdot \frac{\sin\alpha - \mu \cdot \cos\alpha}{\mu} \\ &\Rightarrow F_a = F_g \cdot \frac{\sin\alpha - \tan\alpha_0 \cdot \cos\alpha}{\tan\alpha_0} \quad (3-9) \end{aligned}$$

En position verticale pour  $\alpha=180^\circ$ , on obtient :  $F_a = F_g = m \times g$

Où :

$F_g$  : Force gravitationnelle ;  $F_f$  : Force de frottement ;  $F_n$  : Composante normale au plan de la force gravitationnelle ;  $F_t$  : Composante tangentielle au plan de la force gravitationnelle ;  $F_a$  : Force d'attraction ;

$m$  : Masse de la pièce ;  $g$  : Accélération gravitationnelle ;

$\mu$  : Coefficient de friction ;

$\alpha_0$  : Angle du plan à l'équilibre juste avant le glissement (pas de force d'attraction).

$\alpha$  : Angle du plan à l'équilibre juste avant le glissement (avec force d'attraction).

La courbe tracée à la Figure 3-7 représente la variation de l'angle de détachement en fonction de la masse de pièces identiques d'aluminium de forme carrée ( $1 \times 1 \text{ cm}^2$ ) ; la masse a été variée en collant plusieurs pièces d'aluminium de  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  les unes sur les autres.

Comme tracé sur cette figure, la force d'attraction permet l'attachement de particules d'une masse pouvant aller jusqu'à plus de  $0,5 \text{ g}$ . Cette force, nouvellement observée sur les convoyeurs à ondes mobiles, permet d'imaginer par la suite certaines applications qui nécessitent l'attachement de pièces sur des supports puis leur détachement.

Un simple calcul permet d'estimer cette force d'attraction, comme suit :

La force électro-adhésive [75-84]:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \epsilon \cdot A \left(\frac{U}{l}\right)^2 \quad (3-10)$$

Où  $\epsilon$  est la permittivité absolue du milieu,  $A$  est la surface de l'électrode, et  $U$ ,  $l$  sont la différence de tension et l'écart équivalent entre les électrodes.

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \quad (3-11)$$

$\epsilon_0$  : permittivité de vide ( $8,85 \times 10^{-12}$ )

$\epsilon_r$  : permittivité relative (résine d'époxyde  $\epsilon=3,4$  à  $3,7$ )

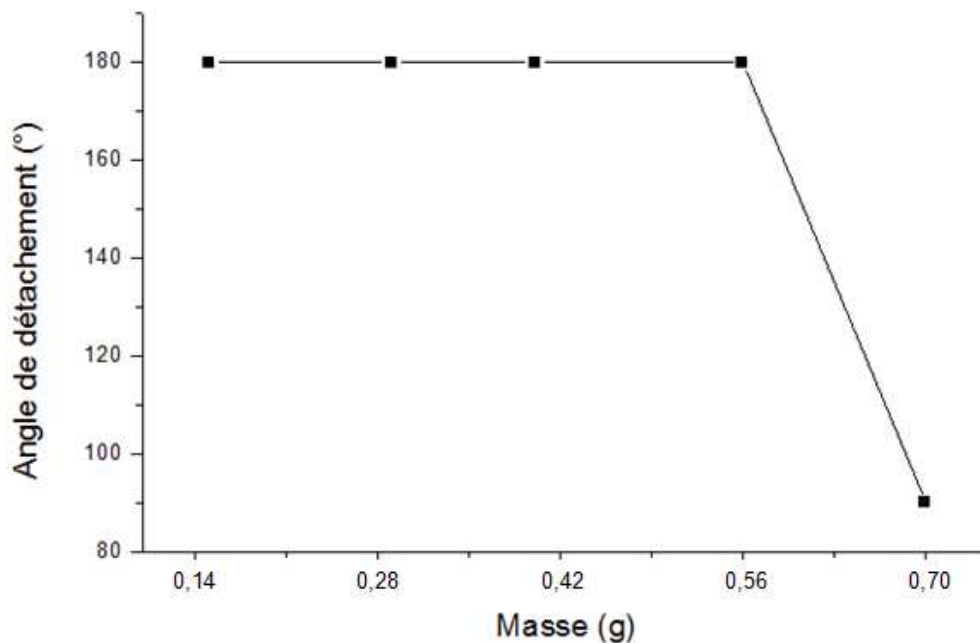


Figure 3-7 - Variation de l'angle de détachement  $\alpha$  en fonction de la masse ( $U=10$  kV).

La masse a été variée en collant plusieurs pièces d'Aluminium de  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  les unes sur les autres.

(Pour  $\alpha = 180^\circ$ , l'ensemble des pièces reste collé sur la surface du CRED).

Tableau 3-4- Force gravitationnelle en fonction des masses suivant les dimensions des granules.

Dimension (cm)	1	1	1	1	1	2	3	4	5
m (g)	0,14	0,28	0,42	0,56	0,70	0,53	1,23	2,12	3,47
P (N) $\times 10^{-3}$	1,373	2,746	4,120	5,493	6,867	5,199	12,066	20,797	34,04

### 3.6.1.2. Expériences utilisant des échantillons de brins de cuivre

Pour ces expériences, nous avons utilisé des brins de fil de cuivre de diamètre **0,31 mm** avec plusieurs longueurs différentes variant de **1 à 10 mm**. Des échantillons d'une même masse égale à **1 g** ont été utilisés, et une tension appliquée de **10 kV**.

Les résultats de la Figure 3-8 représentent la variation de la masse de particules de cuivre restant attachées à la surface du convoyeur après une inclinaison  $\alpha=180^\circ$ , en fonction de la longueur des particules.

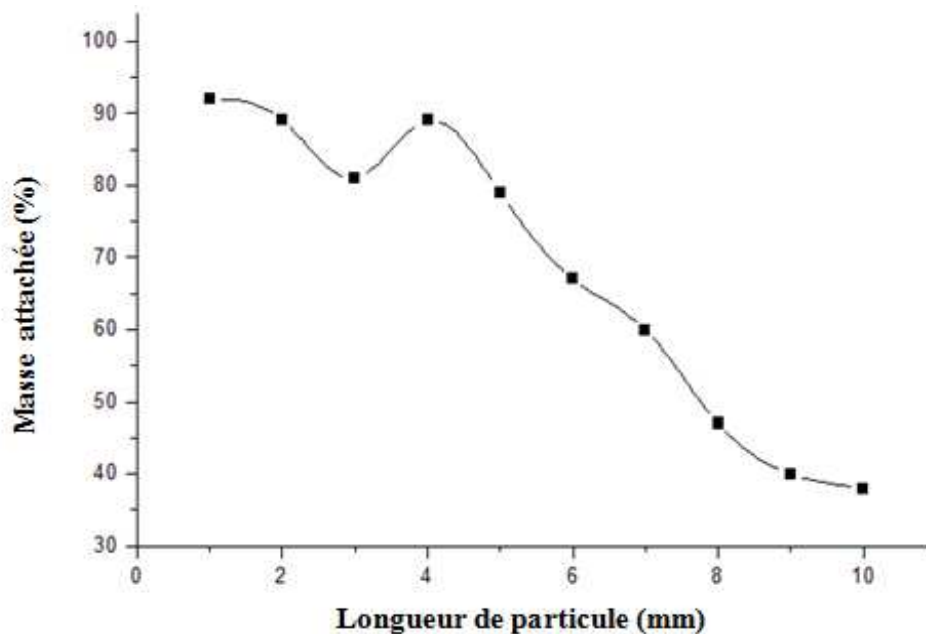
La masse en pourcent a été estimée à l'aide de la formule suivante :

$$M (\%) = \frac{m_a}{m_T} \times 100 \quad (3-12)$$

Où :

$m_a$  : Masse des brins de fil de cuivre restant attachées à la surface du CRED.

$m_T$  : Masse totale des brins de fil de cuivre déposées à la surface du CRED ( $m_T = 1 \text{ g}$ ).



**Figure 3-8** - Variation de la masse des particules de cuivre restant attachées à la surface du convoyeur après une inclinaison  $\alpha=180^\circ$  en fonction de la longueur des particules ( $m=1\text{g}$ ,  $U=10 \text{ kV}$ ).

Les résultats obtenus montrent que ce convoyeur exerce bien une force d'attraction sur des particules de brin de cuivre, en particulier pour les longueurs comprises entre **1 et 4 mm**, pour lesquelles **80 à 90 %** de la masse totale reste attachée. Ces tailles granulométriques sont similaires à celles obtenues après broyage des déchets d'équipements électroniques et électriques (DEEE) avant le traitement par processus de séparation. On peut donc déduire que

cette méthode utilisant le CRED pourrait être utilisée comme une technique de séparation des particules métal/plastique.

**Tableau 3-5**-Valeurs moyennes de la masse d'une particule de cuivre en fonction de sa longueur

Longueur de particule (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masse d'une particule (mg)	2,9	5	6,5	9	11	14	16	19	21	25

Selon le **tableau 3-5**, qui représente les valeurs moyennes de la masse d'une seule particule de cuivre en fonction de sa longueur, des valeurs de masse beaucoup plus élevées ont été obtenues pour les pièces métalliques carrées de  $1 \times 1 \text{ cm}^2$ , comme indiqué par les résultats obtenus à la Figure 3-7; cela est dû au fait que la surface de contact avec les électrodes est plus importante pour les pièces métalliques.

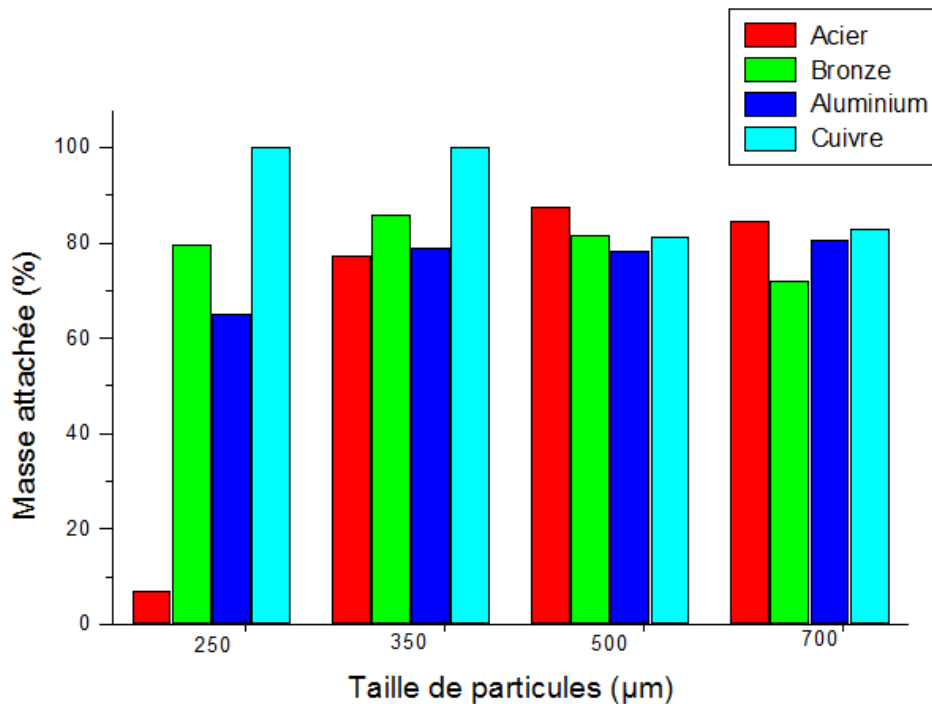
### 3.6.1.3. Expériences utilisant des particules micrométriques et millimétriques

#### (i) Particules de métal

Pour ces expériences, nous avons utilisé 4 types de métal, qui sont l'Acier, le Bronze, l'Aluminium et le Cuivre, de différentes tailles granulométriques égales à **250  $\mu\text{m}$** , **350  $\mu\text{m}$** , **500  $\mu\text{m}$**  et **700  $\mu\text{m}$** . L'expérience a été effectuée en utilisant des échantillons d'une même masse égale à **1 g** pour l'Acier, le Bronze et l'Aluminium et une masse égale à **1,5 g** pour le cuivre, avec une tension appliquée de **10 kV**.

Les résultats tracés à la Figure 3-9 représentent la masse des particules de métal en pourcentage qui reste attachée à la surface du CRED en fonction de la taille granulométrique, pour différents types de métal (**U= 10 kV**).

Quel que soit le type du métal, ferreux ou non ferreux, et indépendamment de la conductivité de celui-ci, il apparaît que la force d'attraction agit presque avec la même intensité. Nous remarquons qu'en moyenne, **70 % à 90 %** de la masse totale des particules restent attachées à la surface du convoyeur.

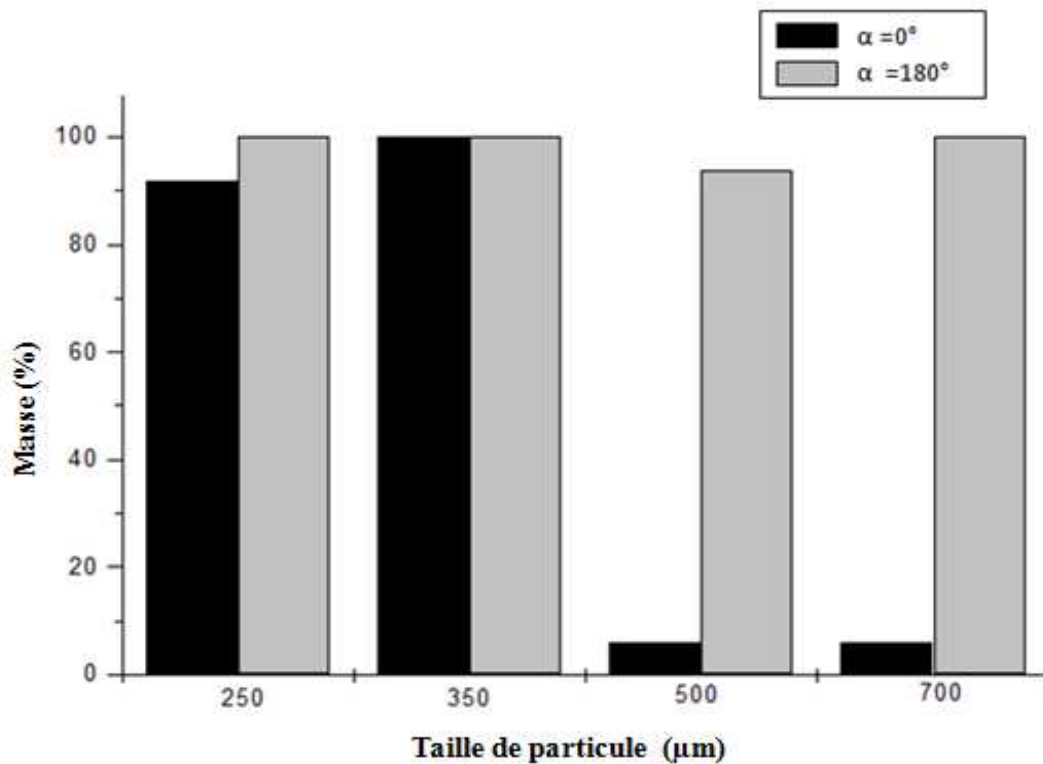


**Figure 3-9** - Masse en pourcentage des particules de métal restant collées sur le CRED après une inclinaison  $\alpha = 180^\circ$ , pour plusieurs valeurs de la taille granulométrique moyenne des particules ( $U = 10$  kV).

### (ii) Particules de plastique

Pour les expériences qui suivent, nous avons utilisé du plastique granulaire de différentes tailles granulométriques égales à **250, 350, 500 et 700 µm**, avec une tension appliquée de **10 kV**. Des échantillons d'une même masse égale à **1 g** pour les tailles granulométriques égales à **500 et 700 µm** et d'une même masse égale à **0,5 g** pour les tailles granulométriques égales à **250 et 350 µm** ont été utilisés, pour assurer une monocouche pour tous les essais. Contrairement au métal, dès l'application d'une tension, et avant l'inclinaison du CRED, une certaine quantité de granules de plastique se déplace sous l'action de la force diélectrophorétique.

Les résultats de la Figure 3-10 représentent la masse estimée en pourcentage des particules de plastique quittant la CRED par déplacement ( $\alpha = 0^\circ$ ) et par chute gravitationnelle après inclinaison ( $\alpha = 180^\circ$ ), pour plusieurs valeurs de la taille moyenne des particules ( $U = 10$  kV).



**Figure 3-10** - Masse en pourcentage des particules de plastique quittant le CRED par déplacement ( $\alpha = 0^\circ$ ) et par chute due à la gravité après inclinaison ( $\alpha = 180^\circ$ ), pour plusieurs valeurs de la taille granulométrique moyenne des particules ( $U = 10$  kV).

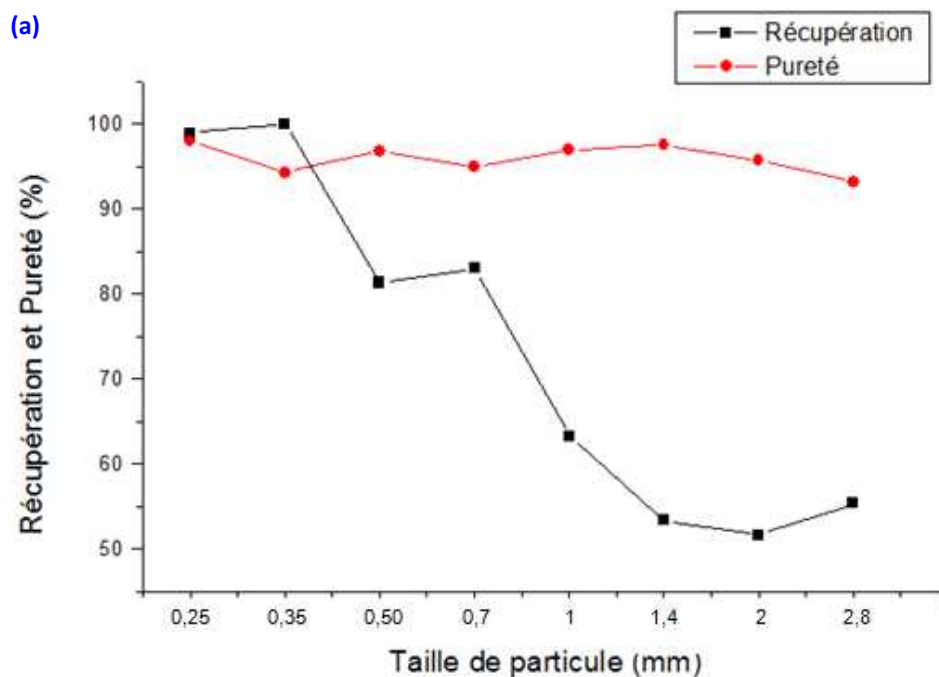
Comme prévu, le comportement des particules isolantes est tout à fait différent ; les particules de dimensions **250** et **350 μm** se sont déplacées sous l'effet de la force diélectrophorétique; cette force n'a pas d'effet significatif sur les particules de dimensions plus grandes de **500** et **700 μm** à cause de leur masse plus élevée. D'un autre côté, en inclinant le CRED d'un angle  $\alpha = 180^\circ$ , comme attendu la quasi-totalité des granules qui restent encore sur le convoyeur (cas des tailles **500** et **700 μm**) chutent toutes sous l'effet de la force de pesanteur. Contrairement aux particules de métal, toutes les particules de plastique tombent sous l'action de leur poids.

### 3.6.2. Application à la séparation d'un mélange plastique/cuivre

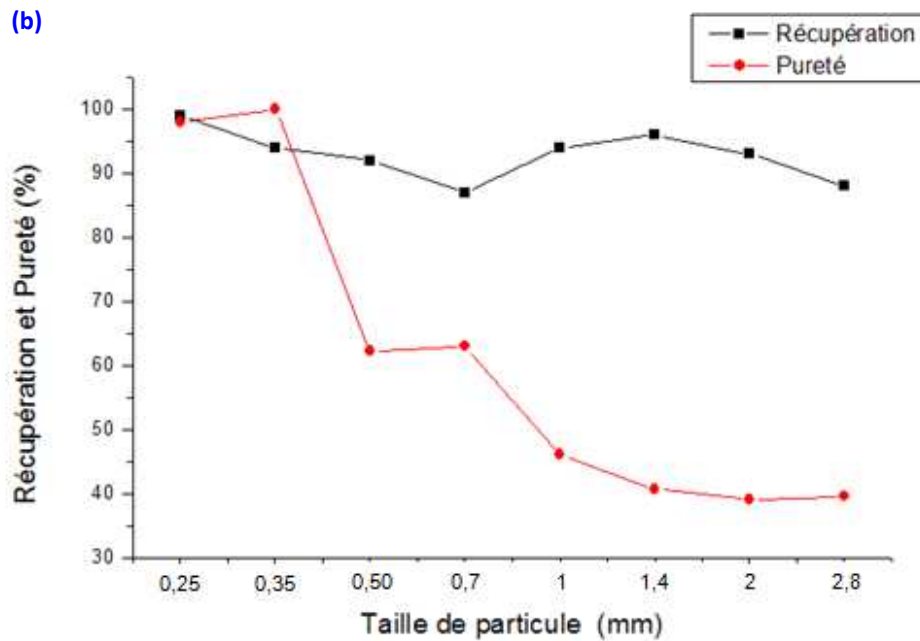
Des expériences de séparation ont été effectuées avec ce dispositif à plan incliné pour étudier la faisabilité de la séparation en utilisant ce type de convoyeur. L'idée étant ensuite, dans le cas où on veut utiliser ce procédé dans l'industrie, est de remplacer ce dispositif de séparation par un tapis ou un cylindre rotatif. Cette étude a été réalisée avec un échantillon granulaire issu des déchets de câbles électriques mis à notre disposition par l'entreprise ENR (Entreprise Nationale de Récupération), Oran-Algérie-. Chaque échantillon utilisé a une masse

totale de **2g** comprenant **25%** de particules de plastique et **75 %** de particules de cuivre, avec plusieurs tailles granulométriques variant de **0,25 mm** à **2,8 mm**.

Les résultats obtenus reportés à la Figure 3-11 montrent effectivement qu'il est faisable d'envisager une nouvelle technique de séparation de granules en utilisant un CRE à double face. Pour les tailles granulométriques inférieures à **0,5 mm**, l'efficacité de la séparation est optimale, vu que près de **100%** de la masse est récupérée avec des valeurs de pureté élevées. Dans ce cas, les particules de plastique sont éjectées dès qu'elles sont déposées sur la surface laissant les granules de cuivre sur le CRE. Par contre, pour des tailles plus grandes que **0,5 mm**, la performance de la séparation n'est plus aussi élevée ; les granules de métal s'attachent moins et les particules de plastique ne sont pas déplacées par la force diélectrophorétique à cause de la force de pesanteur plus grande. Néanmoins, notons que la pureté du produit métallique reste élevée, car après une inclinaison de **180°** toutes les particules de plastique tombent de la surface du CRE. Il serait intéressant d'augmenter la force d'attraction par l'utilisation d'une tension plus grande et d'une plaque diélectrique d'épaisseur plus fine.





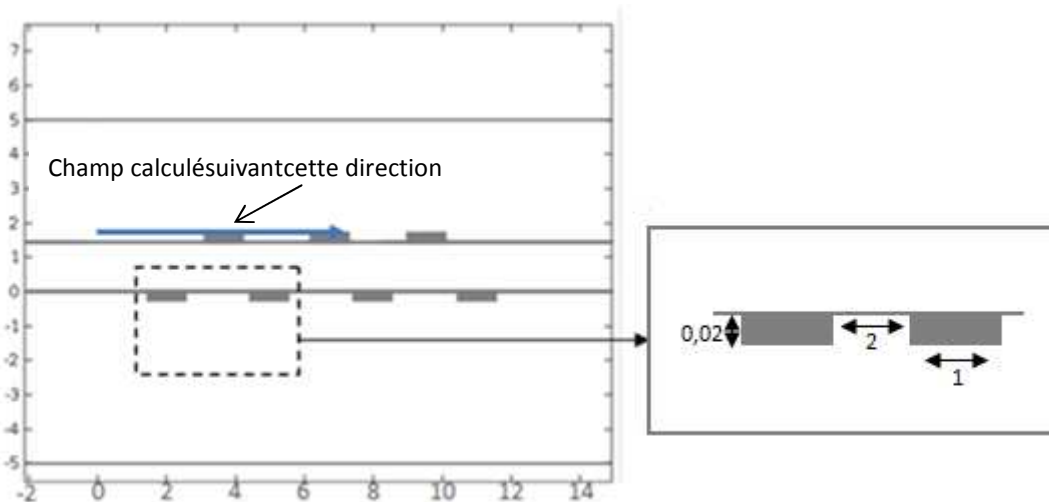


**Figure 3-11** - Variation de la récupération et de la pureté des particules de cuivre et de plastique en fonction de la taille des particules après inclinaison du CRED ( $\alpha = 180^\circ$ ,  $U = 10 \text{ kV}$ )

(a) Particules de cuivre ; (b) Particules de plastique.

### 3.7. Analyse numérique du champ électrique

Une analyse numérique du champ électrique a été réalisée à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics. La simulation a été réalisée selon la configuration géométrique tracée à la figure 3-12, pour une tension appliquée  $U = 10 \text{ kV}$ . La Figure 3-13 représente la distribution du champ électrique calculée dans le sens horizontal de la surface du convoyeur.



**Figure 3-12** – Géométrie utilisée pour l'analyse numérique du champ électrique (dimensions en mm).

Comme le montre la Figure 3-13, le champ électrique est plus élevé aux extrémités des électrodes; nous avons en effet observé au cours des expériences la tendance des particules métalliques à s'aligner perpendiculairement aux fils des électrodes (Fig.3-14).

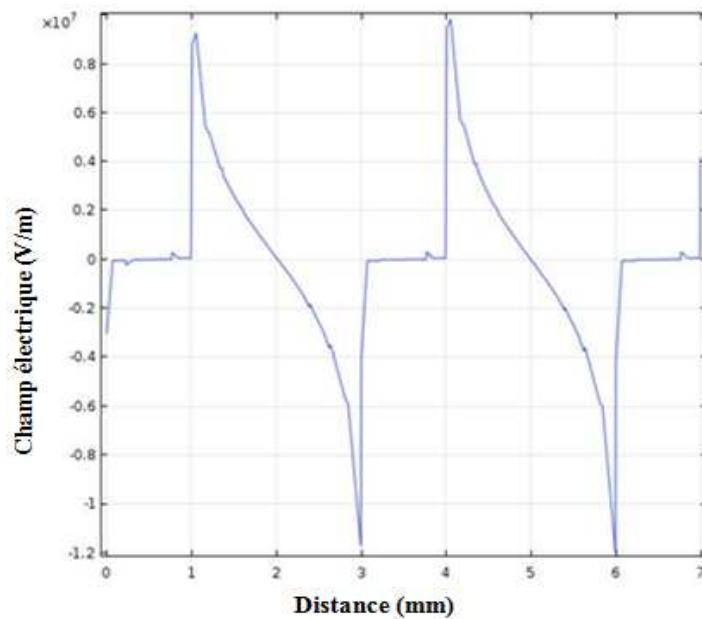


Figure 3-13 -Distribution du champ électrique estimée selon la direction horizontale à la surface du CRED.

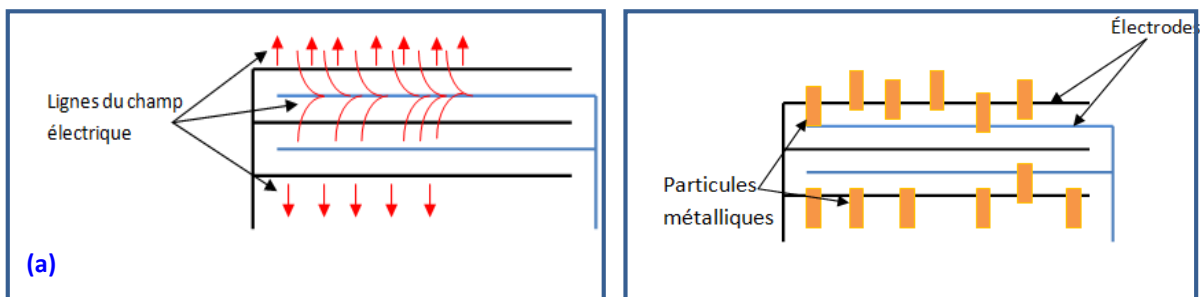


Figure 3-14 – (a) Dessin explicatif des lignes du champ électrique, (b) Photographie illustrant les lignes du champ électrique.

### 3.8. Conclusion

La force diélectrophorétique appliquée sur les particules micronisées isolantes est bien connue depuis longtemps dans les rideaux électriques. Dans le présent travail, une force d'attraction nouvellement observée appliquée sur des pièces d'aluminium de la taille de l'ordre du cm et des particules de cuivre de la taille de l'ordre du  $\mu\text{m}/\text{mm}$  a été analysée. LeCREDA a été fixé sur un dispositif mécanique qui permettait son inclinaison manuelle de  $0^\circ$  à  $180^\circ$ .

Les résultats obtenus ont révélé d'une part l'existence d'une force d'attraction appliquée sur les particules métalliques qui dépend principalement de l'amplitude de la tension appliquée et d'autre part la faisabilité de la séparation des particules métal/plastique. Une alternative intéressante consiste à augmenter la force d'attraction en utilisant une tension plus élevée et une plaque diélectrique plus fine. De plus, pour une application industrielle, il serait intéressant de remplacer le dispositif incliné du convoyeur par une courroie tournante.

Après l'étude de la séparation avec un convoyeur à double face fixé sur un plan incliné, certaines particules de plastique restent attachées à la surface du CRED. Pour éliminer l'influence de ces forces, le convoyeur a été fixé sur un vibreur électromagnétique, en utilisant un convoyeur biphasé à simple face pour séparer un mélange de particules (polyamide (PA) /bronze). Ce travail fait l'objet du chapitre suivant.

# QUATRIÈME CHAPITRE



## ÉTUDE EXPÉRIMENTALE AVEC LE CONVOYEUR VIBRANT



## Chapitre 4

### Étude expérimentale avec le convoyeur vibrant

#### 4.1. Introduction

Ce chapitre décrit la réalisation d'un convoyeur à ondes mobiles biphasé, alimenté par des amplificateurs de haute tension. Une étude expérimentale a été menée pour étudier l'influence de plusieurs facteurs tels que l'amplitude, la fréquence et le déphasage de la tension appliquée sur la force d'attraction exercée par ce convoyeur qui a été fixé sur un vibreur électromagnétique.

De plus, une nouvelle méthode de séparation a été testée pour le tri des mélanges de particules Métal/ Plastique en utilisant la technique des ondes mobiles.

Toutes les méthodes utilisant des champs électriques intenses doivent tenir compte de l'humidité ambiante omniprésente. L'humidité varie au cours de la journée et réduit considérablement l'effet du champ électrique en recouvrant les surfaces d'une couche de fine pellicule d'humidité.

#### 4.2. Choix de la forme du signal

##### 4.2.1. Introduction

Un signal est la variation d'une grandeur électrique qui peut être soit une tension soit un courant. Ce signal transporte une information et est dit périodique si les variations de son amplitude se reproduisent régulièrement selon une période  $T$ .

Un signal est défini par plusieurs critères dont la qualification nécessite la visualisation sur un oscilloscope. Les formes de signaux conventionnels sont représentées sur la Figure 4-1.

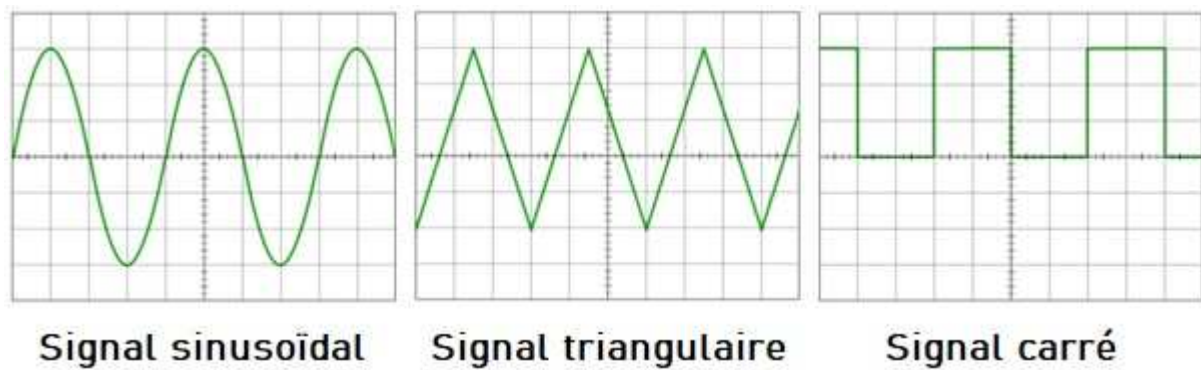


Figure 4-1—Formes de signaux conventionnels.

#### 4.2.2. Pourquoi un signal carré ?

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.4-2) et c'est exactement ce qui se passe dans les signaux numériques binaires.

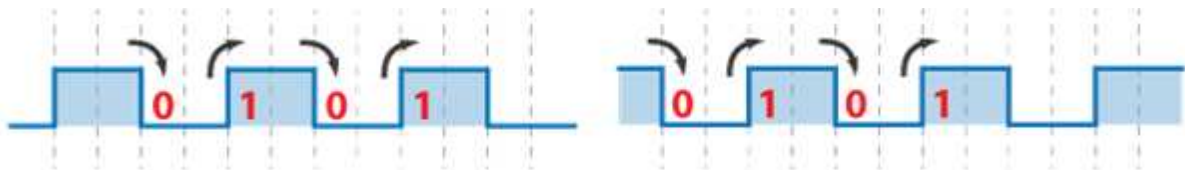


Figure 4-2 – Les deux niveaux d'un signal carré.

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.

### 4.3. Description du dispositif expérimental

La Figure 4-3 représente une photographie globale du dispositif expérimental.

Il est constitué de quatre parties principales :

- Le convoyeur à ondes mobiles biphase avec vibreur.
- Le système d'excitation électrique.
- Le système de visualisation des données,( Oscilloscope à mémoire (GwInstek GDS-3154)).
- Le système de pesée (balance de marque OHAUS AX423).

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 4-4.

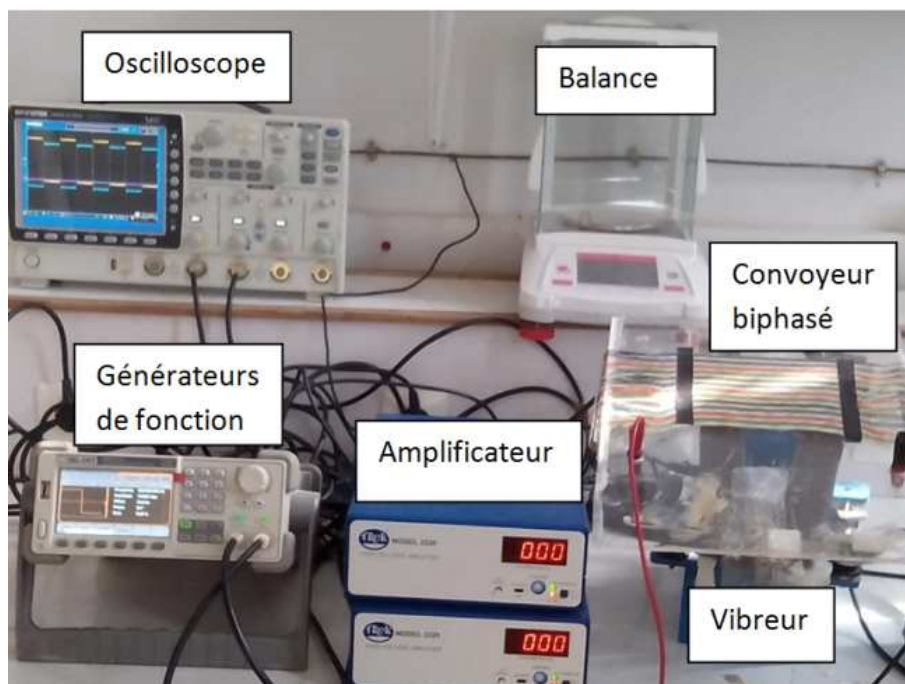


Figure 4-3- photographie globale du dispositif expérimental.

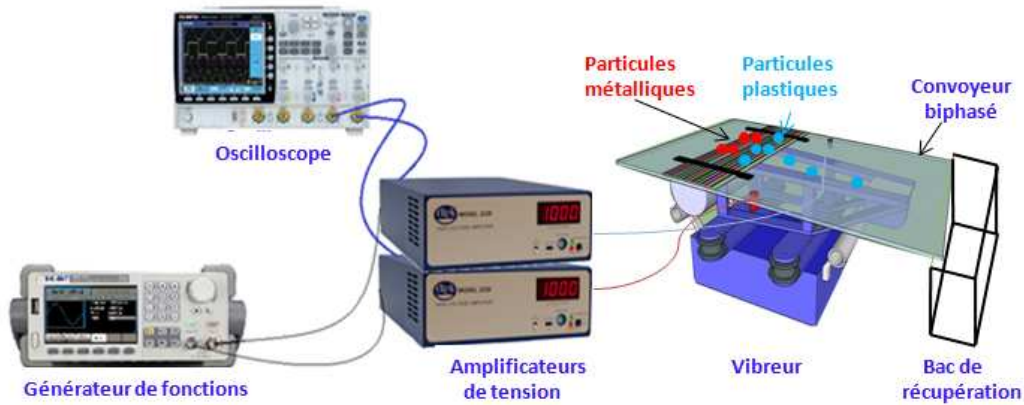


Figure 4-4- Représentation schématique de l'installation expérimentale.

#### 4.3.1. Convoyeur utilisé

Le convoyeur à ondes mobiles (Fig.4-5) a été construit à l'aide d'une plaque en plexiglas, de dimensions  $140 \times 120 \text{ mm}^2$ , sur laquelle ont été placées des électrodes (fils) de cuivre parallèles de diamètre  $0,49 \text{ mm}$ , placés côte-à-côte de manière à ce que l'intervalle entre les fils de cuivre " nus " de diamètre  $0,29 \text{ mm}$  soit égal à  $1 \text{ mm}$  comme représentée sur la Figure 4-6.



Figure 4-5 - Dispositif du convoyeur biphasé



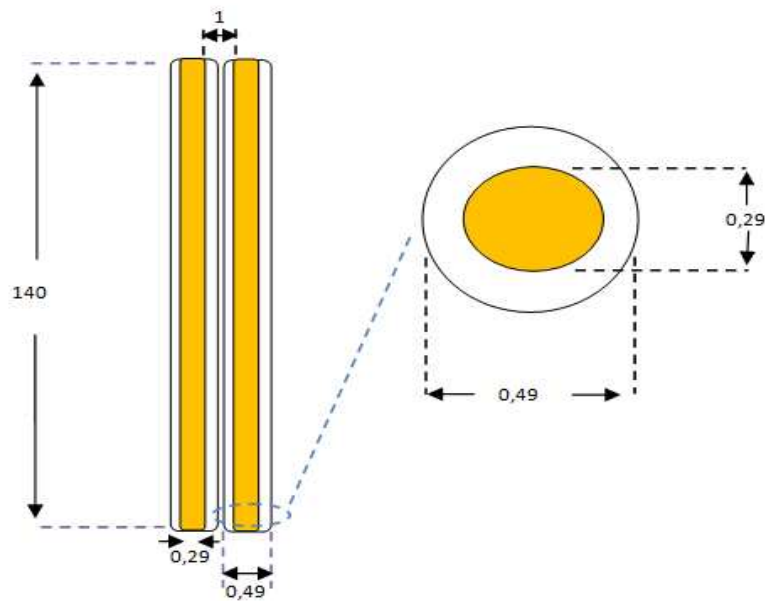


Figure 4-6- Représentation détaillée des électrodes et leurs dimensions en (mm).

#### 4.3.2. Vibreur électromagnétique

Dans le premier chapitre, on a décrit les forces de collage qui influent sur les particules micronisée, où certaines particules restent collées sur le film isolant du convoyeur. Ainsi, dans les expériences à plan incliné, certaines particules restent attachées à la surface du CRE. Pour éliminer l'influence de ces forces, le convoyeur a été fixé sur un vibreur électromagnétique (Fig. 4-7), de façon à ce que lorsque le mélange de particules est déposé sur le convoyeur non alimenté, la totalité des granules se déplacent et tombent de celui-ci.

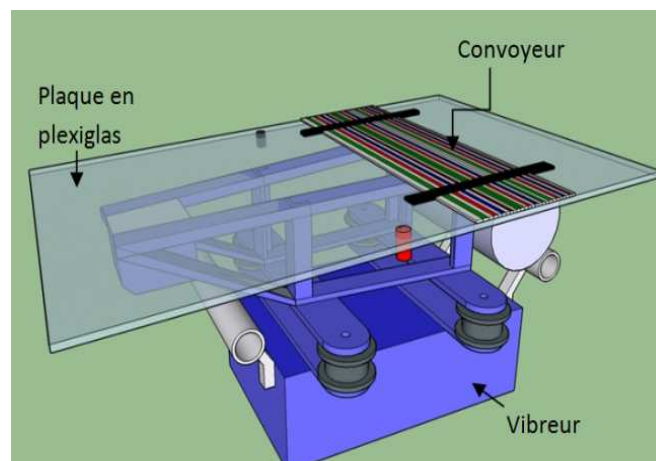


Figure4-7 -Schéma descriptif du convoyeur placé sur le vibreur.

### 4.3.3. Système d'excitation électrique

Le système d'alimentation électrique est présenté sur la Figure 4-8. La Figure 4-8(a) représente les connexions du convoyeur avec le système d'alimentation, avec un déphasage de  $180^\circ$  illustré sur la Figure 4-8(b).

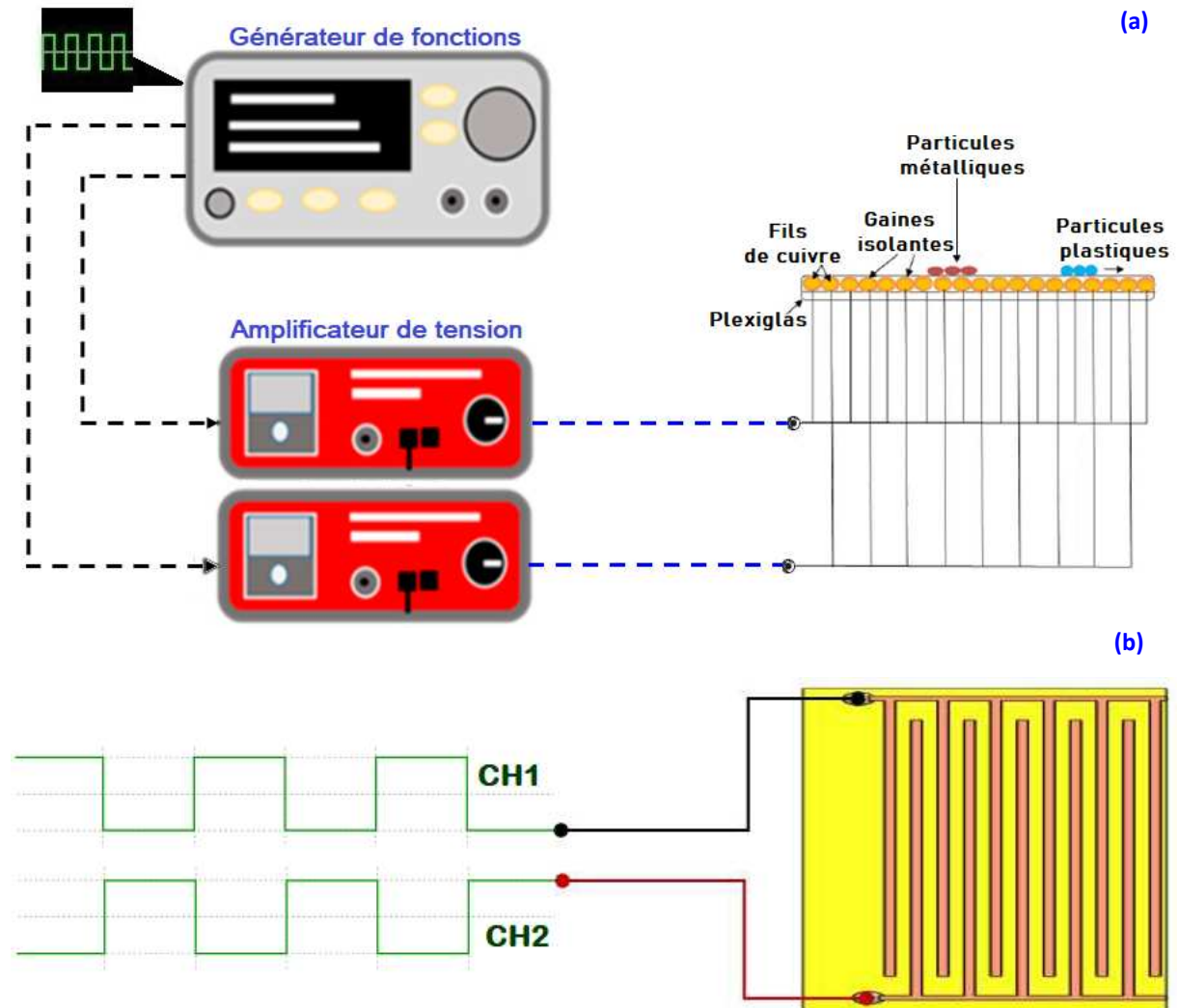


Figure 4-8- Convoyeur biphase

- (a) Schéma descriptif de l'alimentation du convoyeur biphase  
 (b) Forme du signal appliqué aux électrodes (Déphasage de  $180^\circ$ ).

Comme le montre la Figure 4-8(a), le convoyeur est alimenté par un signal de haute tension alternative délivré par deux amplificateurs (marque TREK, modèle 2220), sa tension maximale en AC est de  $\pm 2$  kV avec un courant de  $\pm 20$  mA. Les amplificateurs sont pilotés par un générateur de fonction (marque Siglent, modèle SDG 1025).

#### 4.4. Échantillons utilisés

L'objectif de ce travail est l'analyse de l'attachement des particules de bronze et le détachement des particules de polyamide (PA) et la séparation de ces particules millimétriques. Les expériences décrites dans ce paragraphe ont été menées sur des échantillons de **10 g** composés de parts égales de bronze (**50%**) et de plastique (**50%**), d'une taille granulométrique moyenne de **1 à 2 mm**.

##### a) Bronze

Le bronze est un alliage métallique non ferreux. Autrefois, le nom de bronze était donné à tous les alliages du cuivre. Ainsi, certains " bronzes " datant du XVIIe siècle ne sont en fait que des laitons. Ses principales caractéristiques sont représentées dans le tableau 4-1 :



Figure 4-9 - Échantillon de granules de bronze utilisés.

##### b) Polyamide (PA)

Le polyamide est actuellement un plastique très utilisé. Il se caractérise par une haute résistance mécanique, rigidité, dureté, une faible reprise d'humidité, de bonnes propriétés de glissement, et une excellente résistance à l'usure. Les bonnes caractéristiques de ce plastique permettent de l'utiliser dans les équipements chirurgicaux, le matériel informatique, la construction mécanique, et même dans des milieux aqueux. Ses principales caractéristiques sont, aussi, regroupées dans le tableau 4-1.



Figure 4-10- Échantillon de granules de polyamide (PA) utilisés.

Tableau 4-1 - Caractéristiques principales du bronze et du polyamide (PA)

	Taille [mm]	Masse volumique [g/cm <sup>3</sup> ]	Conductivité [10 <sup>6</sup> Siemens/m]	Rigidité diélectrique [kV/mm]
Bronze	1 à 2	8,8	7,4	/
Polyamide (PA)	1 à 2	1,14	/	20

#### 4.5. Procédure expérimentale

##### 4.5.1. Protocole expérimental

Une fois le mélange granulaire posé sur la surface du convoyeur, ce dernier est alimenté à travers les amplificateurs HT comme représenté sur la Figure 4-8 (a). Le vibreur est ensuite mis en marche. À la fin de chaque manipulation, les masses de particules qui restent sur le convoyeur sont majoritairement du bronze et celles qui chutent du convoyeur sont en majorité du plastique.

La masse des produits séparés ont été mesurées à l'aide d'une balance électronique digitale de précision **1 mg** (OHAUS AX423). Les taux de pureté et de récupération des produits récupérés ont été calculés afin de déterminer l'efficacité de la séparation.

La récupération et la pureté ont été calculées à l'aide des équations (4-1), (4-2), (4-3) et (4-4) :

$$Réc_B(\%) = \frac{m_{in} - m_p}{m_{Tx}} \times 100 \quad (4-1)$$

$$Réc_p(\%) = \frac{m_{out} - m_B}{m_{Tx}} \times 100 \quad (4-2)$$

$$Pur_p(\%) = \frac{m_{out} - m_B}{m_{out}} \times 100 \quad (4-3)$$

$$\text{Pur}_B(\%) = \frac{m_{in} - m_p}{m_{in}} \times 100 \quad (4-4)$$

$Réc_B$ ,  $Réc_p$  est la récupération du produit bronze et plastique respectivement;  $m_{in}$  est la masse totale des particules qui reste sur le convoyeur ;  $m_{out}$  est la masse totale des particules qui a chuté du convoyeur,  $m_p$  est la masse de particules de plastique qui sont restées à la surface du convoyeur,  $m_B$  est la masse de particules de bronze qui a chuté du convoyeur et  $m_{Tx}$  est la masse totale du produit (bronze ou plastique) déposée sur le convoyeur égale à 5g.

Toutes les expériences ont été réalisées dans des conditions stables de température (20-25°C) et d'humidité relative (45-55%); de plus, chaque expérience a été répétée deux fois et la valeur moyenne a été utilisée pour le traçage.

#### 4.5.2. 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 :

- ▶ Tension AC appliquée aux électrodes :  $U = 0 \dots 2$  kV ;
- ▶ Tension DC appliquée aux électrodes :  $U = 0 \dots 8$  kV ;
- ▶ Fréquence :  $f = 0 \dots 500$  Hz ;
- ▶ Débit des particules :  $D = 0,28 \dots 0,5$  g/s.
- ▶ Déphasage :  $\varphi = 0 \dots 180^\circ$ .

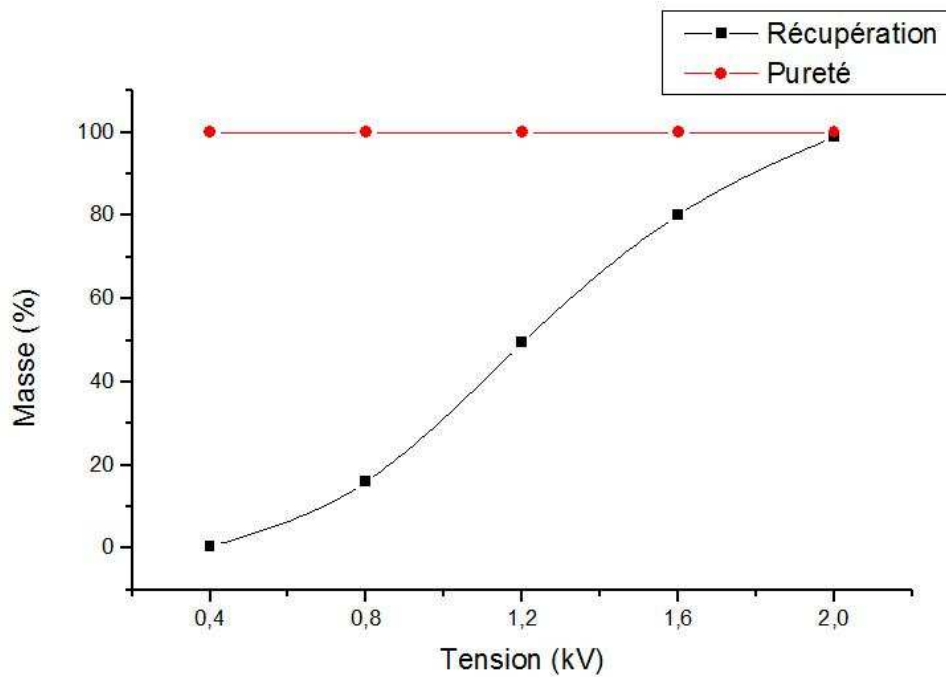
##### 4.5.2.1. Amplitude du signal haute tension

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.

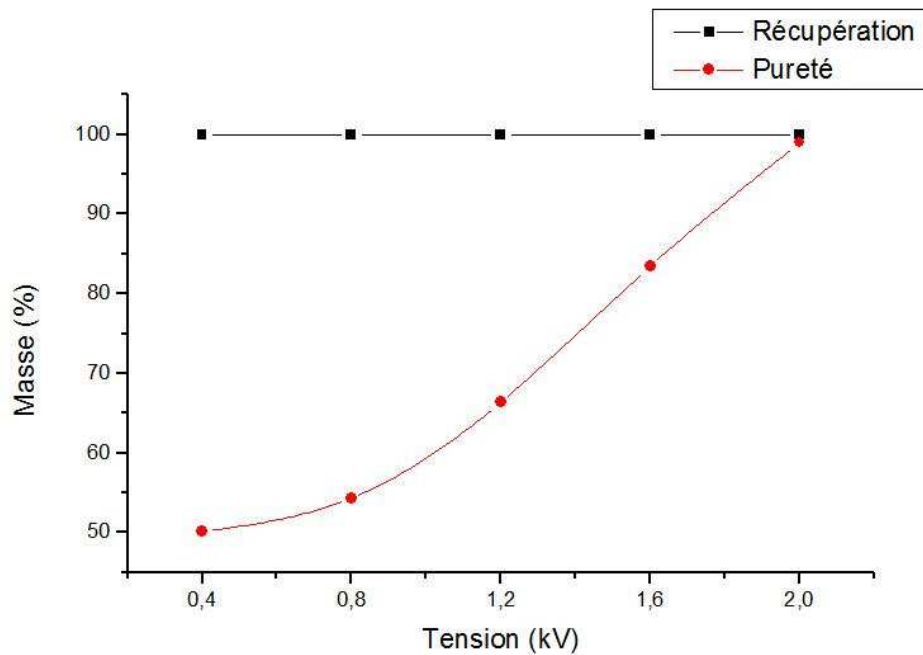
Nous avons expérimenté dans cette partie les deux formes de tension, à savoir une tension alternative de forme carrée et une tension continue.

**(i) Application d'une tension alternative de forme carrée**

Pour ces expériences, la tension a été variée pour évaluer l'efficacité de la séparation avec le dispositif vibrant. Les Figures 4-11 et 4-12 représentent la variation de la récupération et de la pureté du bronze et du plastique en fonction de la valeur de la tension appliquée, pour une fréquence  $f=400$  Hz et un débit  $D=0,5$  g/s.



**Figures 4-11** - Variation de la récupération et de la pureté du bronze en fonction de la valeur de la tension appliquée ( $f=400$  Hz,  $D=0,5$  g/s).



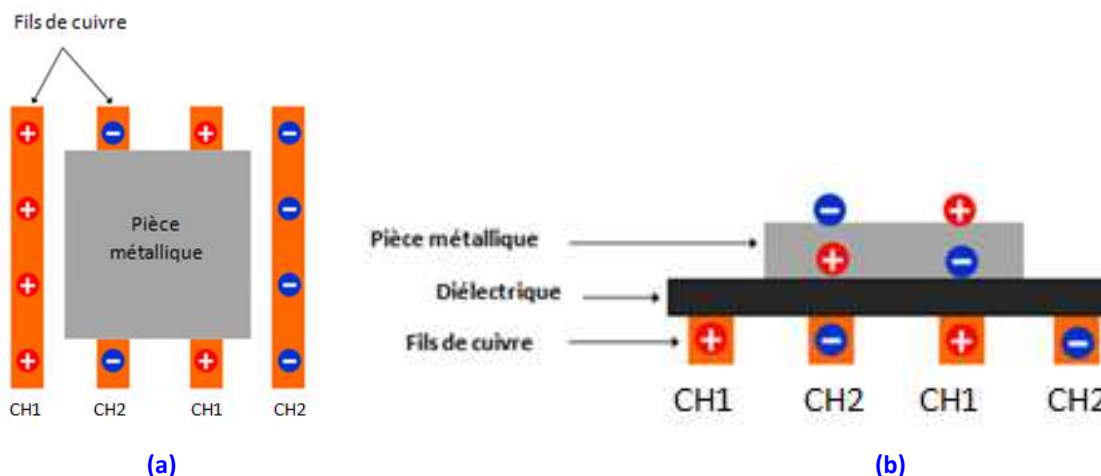
**Figures 4-12** -Variation de la récupération et de la pureté du plastique en fonction de la valeur de la tension appliquée ( $f=400$  Hz,  $D=0,5$  g/s).

Comme indiqué à la Figures 4-12, la totalité des particules de plastique a chuté du convoyeur quelle que soit la valeur de la tension appliquée  $U$ , correspondant ainsi à une récupération de **100%** mais une pureté très faible pour les petites valeurs de  $U$ . Par exemple, lorsque  **$U=0,4$  kV**, **100%** du plastique a chuté du convoyeur mais avec une pureté médiocre.

En effet, pour les petites valeurs de  $U$ , seulement une partie des particules de bronze qui "adhère" à la surface du convoyeur tandis que l'autre partie chute avec les granules de plastique car la force d'attraction exercée est faible. Néanmoins, malgré le taux de récupération faible, la pureté des granules de bronze est égale à **100%**(Fig.4-11). La force d'attraction dépend donc fortement de la tension appliquée.

Une force électrostatique est appliquée sur les particules métalliques. Comme le montre la Figure 4-13, lorsque la pièce métallique est en contact avec les électrodes, une charge électrique de polarité opposée à la tension appliquée est induite par induction sur celle-ci. Par conséquent, une force électrostatique d'attraction est générée qui provoque la fixation des pièces métalliques. Quelle que soit la polarité des électrodes adjacentes, une force d'attraction électrostatique est créée sur les pièces métalliques.

De plus, une petite charge de polarisation est également produite sur la particule de plastique. Cependant, cette charge est beaucoup plus petite et ne suffit donc pas pour que les particules de plastique soient attachées à la surface du convoyeur.



**Figure 4-13** - Description schématique de la charge d'induction et de la force d'attraction appliquée sur les pièces métalliques.

a) Vue de dessus, b) Vue de côté.

### (ii) Application d'une tension continue

L'application d'une haute tension continue à la place d'une tension alternative biphasée a donné les résultats tracés aux Figures 4-14 et 4-15, représentant la variation de la récupération en fonction de la tension continue. Dans ce cas, le convoyeur est alimenté par une tension continue " négative-terre ". Paradoxalement, l'effet de la tension est tout à fait différent avec un signal continu. À des tensions appliquées jusqu'à **8 kV**, beaucoup plus élevées par rapport à la tension alternative carrée, la force d'attraction est beaucoup plus faible. Ainsi, pour **U= 8 kV** par exemple, **50%** seulement des particules de bronze sont restées sur le convoyeur, contrairement à la tension biphasée la récupération est presque **100%** pour seulement **U= 2 kV**.



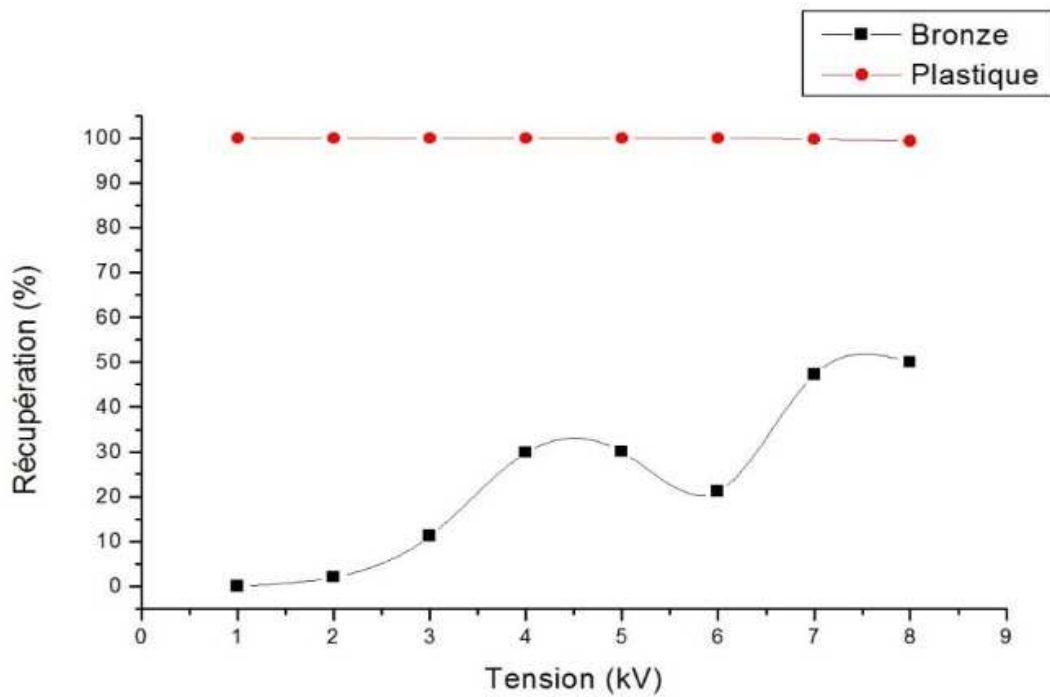


Figure 4-14 - Variation de la récupération du bronze et de plastique en fonction de la tension continue.

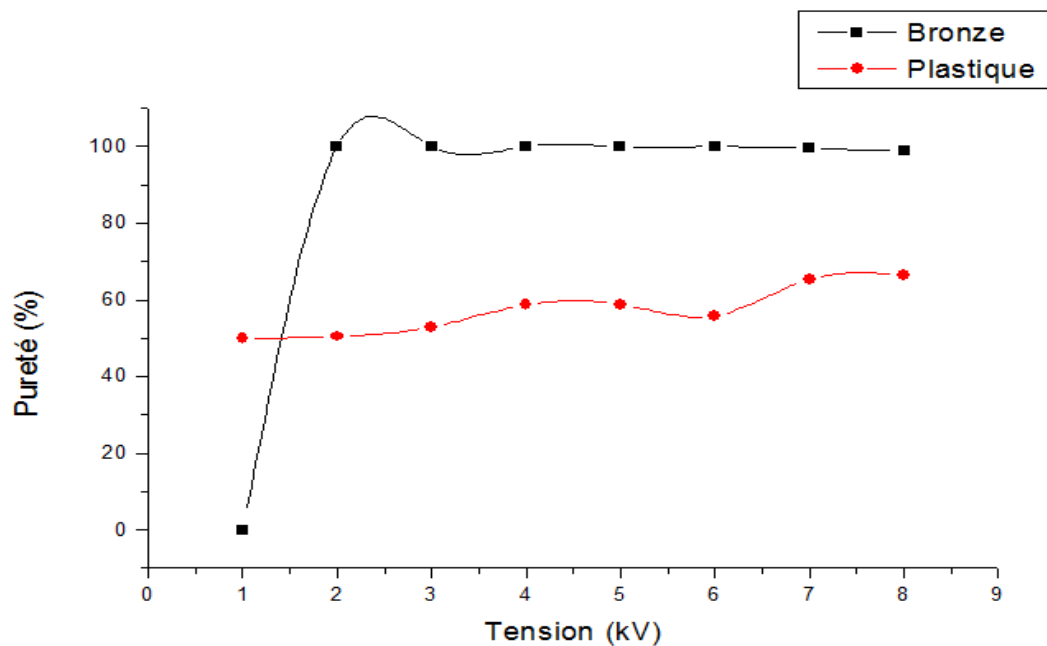


Figure 4-15 - Variation de la pureté du bronze et de plastique en fonction de la tension continue.

La force diélectrophorétique ne dépend pas de la polarité du champ électrique appliqué, les champs DC et AC peuvent être utilisés mais le champ utilisé doit être non uniforme.

Tel que montré expérimentalement, La force d'attraction aussi ne dépend pas de la polarité du champ électrique appliqué, L'intensité du champ électrique et la force résultante

agissant sur la particule dépendent de la tension appliquée. Par conséquent, la régulation de l'amplitude de la tension offre un moyen de régler la force exercée sur les particules.

#### 4.5.2.2. Fréquence du signal haute tension

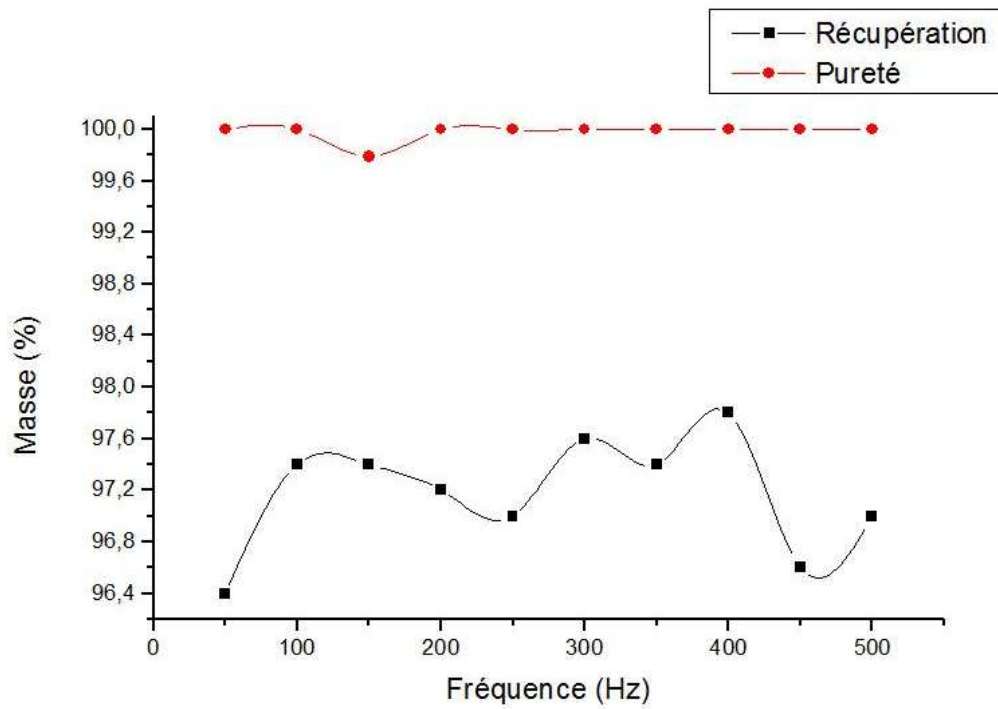
Le second paramètre étudié est l'effet de l'augmentation de la fréquence  $f$  du signal. L'amplitude du signal haute tension carré est fixé à  $U= 2 \text{ kV}$  avec un débit de particules  $D=0,5 \text{ g/s}$ .

L'évolution de la récupération et de la pureté est donnée par la Figure 4-16 et 4-17 et celles-ci demeurent, pratiquement, insensibles aux variations de la fréquence du signal appliqué.

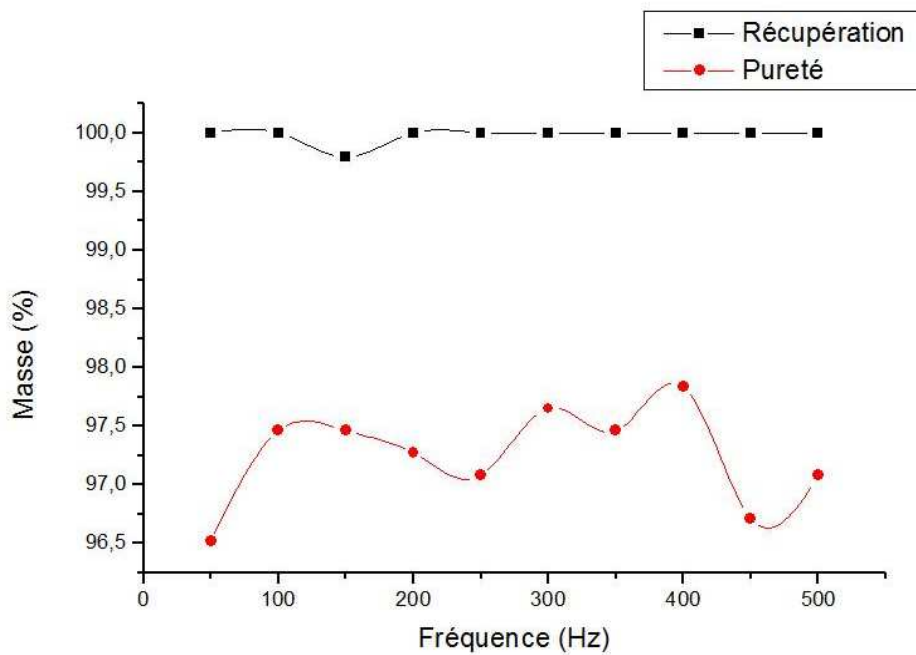
Les résultats obtenus montrent que dans la gamme des valeurs de la fréquence utilisée, la fréquence n'a pas une influence significative sur la force d'attraction.

Par contre, des résultats obtenus pour une gamme de fréquence plus petite comprise entre  $0$  et  $5 \text{ Hz}$ , montrent que celle-ci a en effet un effet considérable sur la force appliquée sur les particules (Fig.4-18).

Pour une fréquence nulle, pratiquement toutes les particules de métal chutent du convoyeur par vibration ; on en déduit alors que la force d'attraction est pratiquement inexistante. Par ailleurs, dès que la fréquence atteint  $1 \text{ Hz}$ , plus de  $60\%$  des granules de métal s'attachent à la surface du convoyeur. Pour une valeur  $f=4 \text{ Hz}$ , près de  $90\%$  des granules de bronze restent " fixés " à la surface.



**Figures 4-16** - Variation de la récupération et de la pureté du bronze en fonction de la fréquence du signal ( $U=2$  kV,  $D=0,5g/s$ ).



**Figures 4-17** - Variation de la récupération et de la pureté du plastique en fonction de la fréquence du signal ( $U=2$  kV,  $D=0,5g/s$ ).

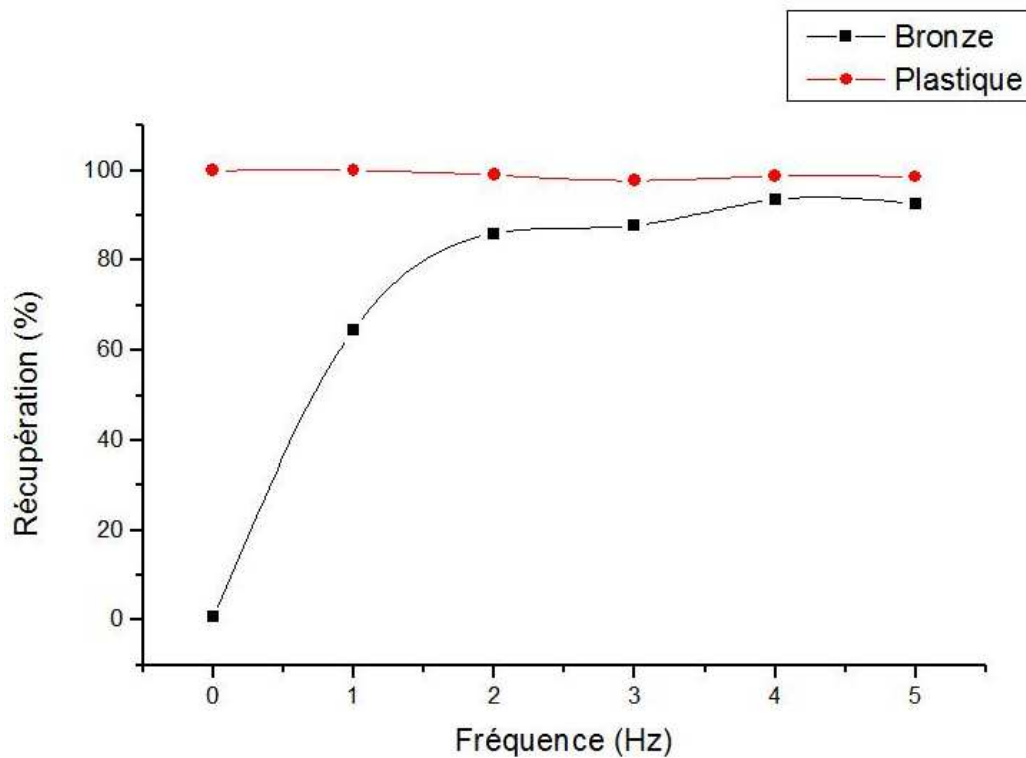


Figure 4-18 - Variation de la récupération du bronze et du plastique en fonction de la fréquence (U=2 kV, D=0,5g/s).

#### 4.5.2.3. Débit de la matière

Pour les expériences effectuées dans cette section, la vibration cause un mouvement plus rapide des particules de plastique surtout. Le vibreur a été utilisé dans cette étude, pour provoquer une séparation entre les granules de métal et de plastique.

Les résultats obtenus tracés dans les Figures 4-19 et 4-20 montrent que le débit a un effet surtout sur les granules isolants. Par analogie avec la charge électrique  $Q_e$  induite par induction électrostatique sur les granules de métal, il y a une charge  $Q_p$  également induite sur les particules de plastique par polarisation électrique. La charge  $Q_p$  étant plus faible que la charge  $Q_e$ , les granules de plastique ne peuvent adhérer à la surface du convoyeur que pour les faibles valeurs de débit.

Une valeur optimale du débit est celle qui permet de causer le déplacement des granules de plastique et qui maintient les particules de métal en surface.

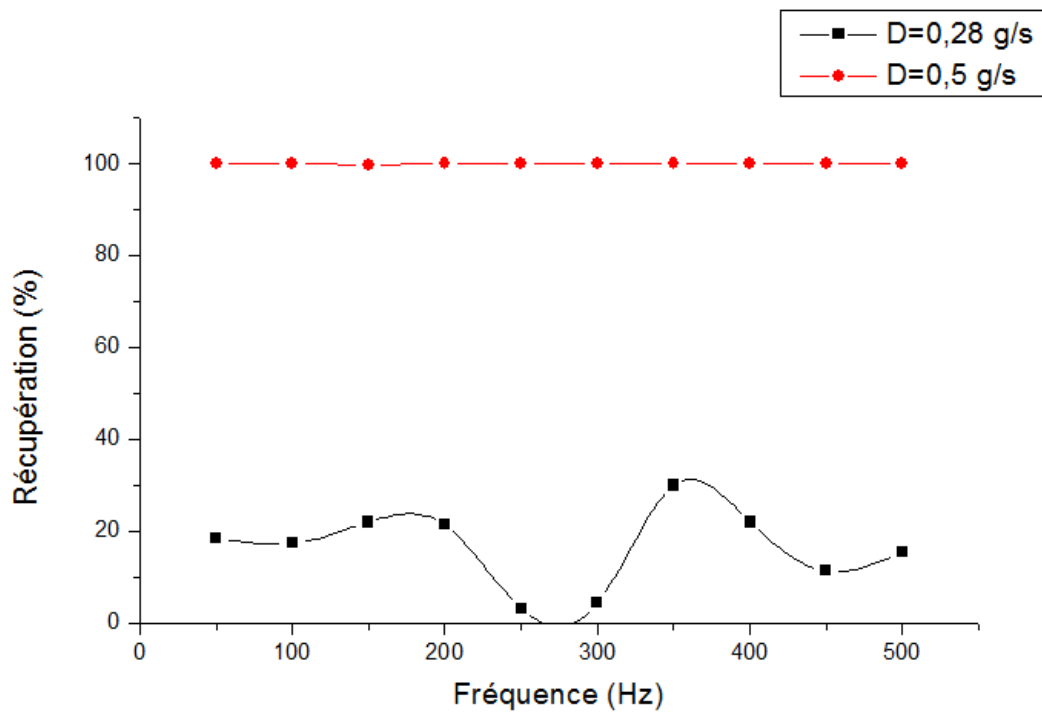


Figure 4-19 - Variation de la récupération du plastique en fonction de la fréquence pour deux valeurs différentes du débit de matière ( $D=0,28$  g/s et  $D=0,5$  g/s).

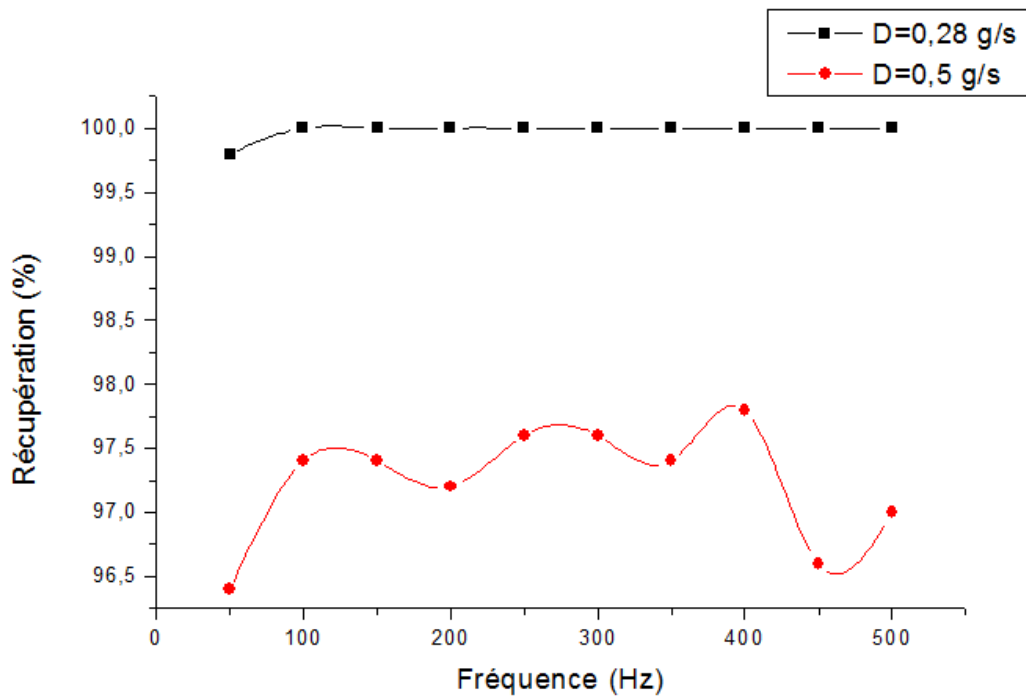


Figure 4-20- Variation de la récupération du bronze en fonction de la fréquence pour deux valeurs différentes du débit de matière ( $D=0,28$  g/s et  $D=0,5$  g/s).

#### 4.5.2.4. 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 biphasé, triphasé ou quatre phases (Fig. 4-21).

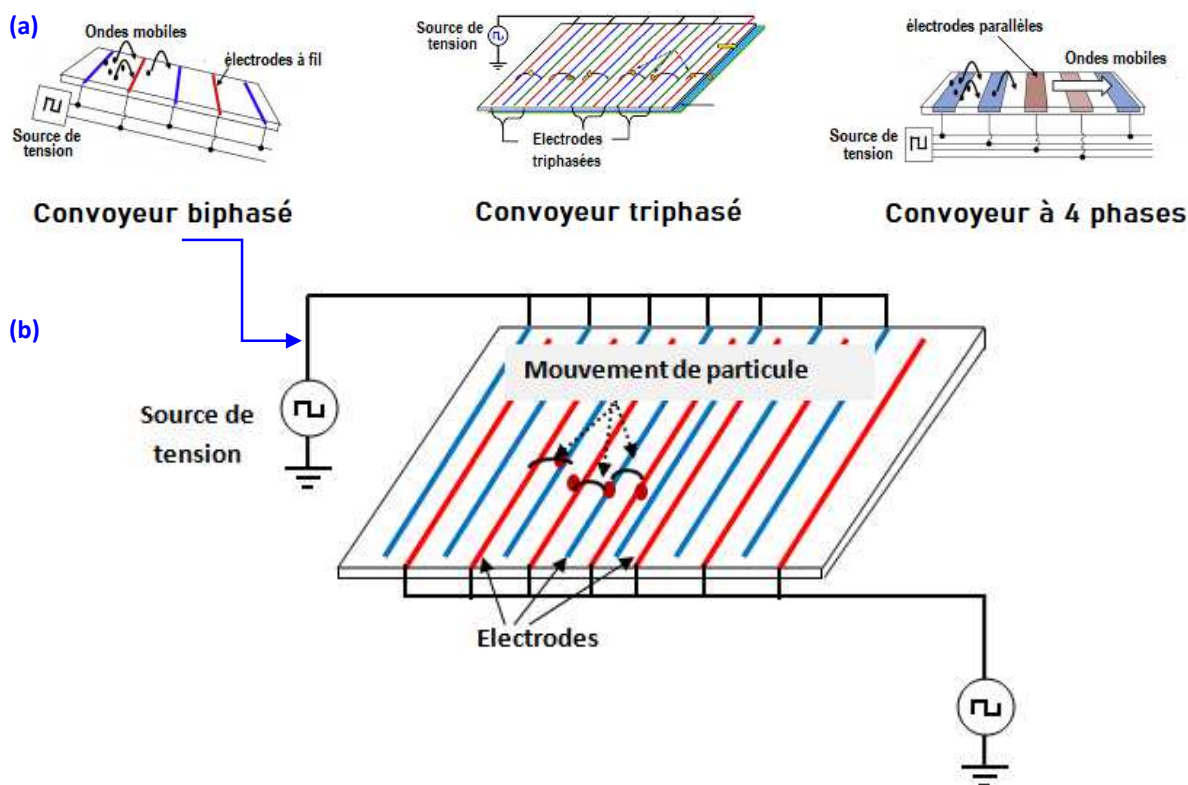
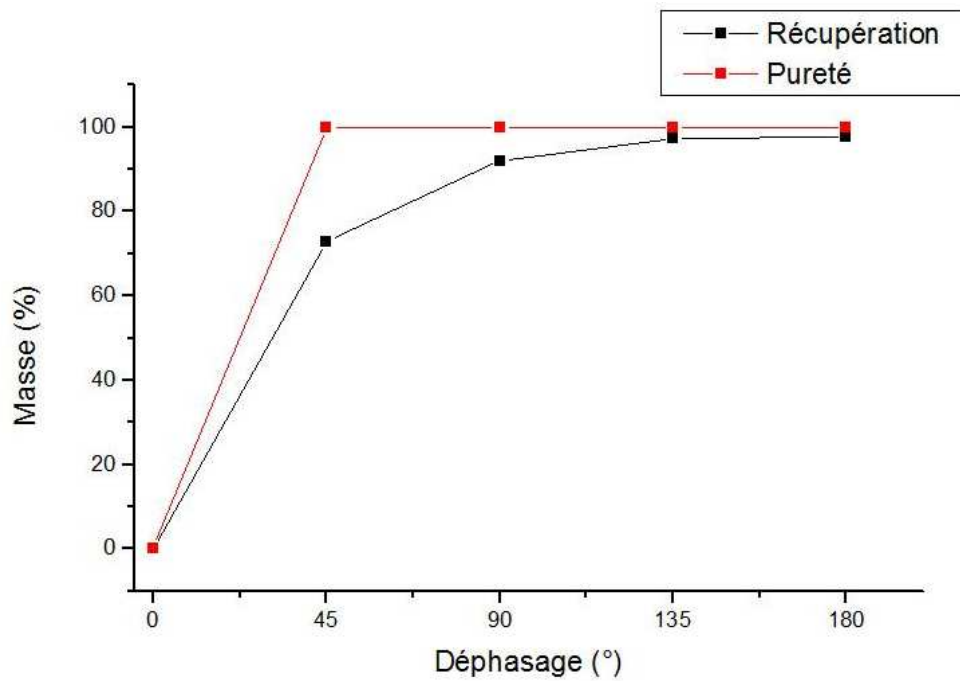


Figure 4-21-(a) Configurations du convoyeur ; (b) Zoom sur la configuration du convoyeur biphasé.

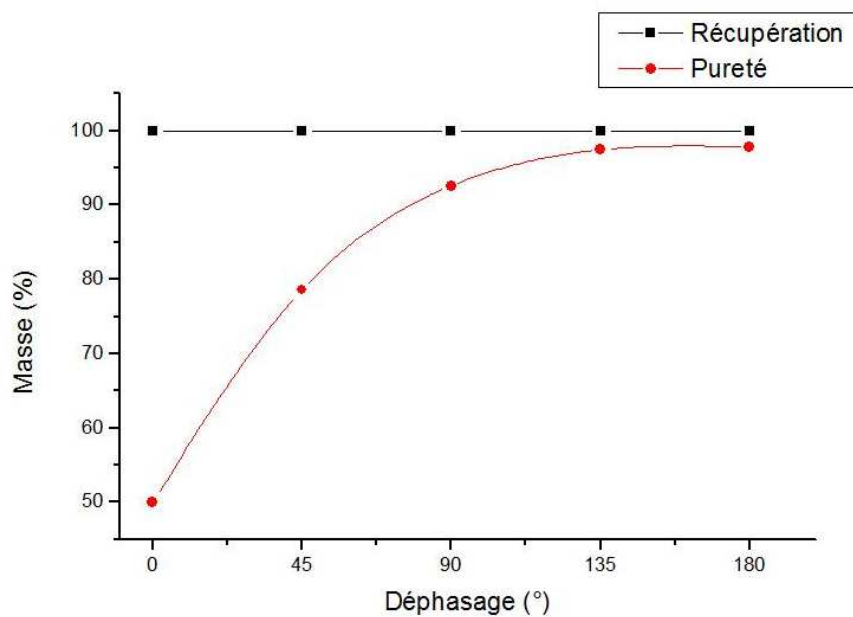
Le déphasage entre deux électrodes voisines peut être égal à  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  ou  $180^\circ$  selon qu'il s'agit d'un convoyeur à quatre, à trois ou à deux phases, respectivement.

Les résultats reportés aux Figures 4-22 et 4-23 sont obtenus en fonction de la variation du déphasage de la tension biphasée (de  $0^\circ$  à  $180^\circ$ ) avec une tension constante égale à  $2\text{ kV}$  et une fréquence égale à  $400\text{ Hz}$ .

Un déphasage  $\varphi = 0^\circ$  correspond à une différence de potentiel nulle entre les électrodes, ce qui explique que pratiquement aucune particule de bronze n'ait adhéré à la surface du convoyeur. À l'opposé, un déphasage  $\varphi = 180^\circ$  correspond à chaque instant à une différence de potentiel maximale égale à  $4\text{ kV}$ .



Figures 4-22 - Variation de la récupération et de la pureté du bronze en fonction du déphasage de la tension ( $D=0,5$  g/s,  $U=2$  kV,  $f=400$  Hz).



Figures 4-23 - Variation de la récupération et de la pureté du plastique en fonction du déphasage de la tension ( $D=0,5$  g/s,  $U=2$  kV,  $f=400$  Hz).

#### 4.6. 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 le débit de matière. Un convoyeur vibrant permet d'augmenter l'influence de la force diélectrophorétique contre l'opposition de la force de pesanteur et la force d'image. 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.



**CONCLUSION**

**GÉNÉRALE**

### Conclusion générale

Les déchets d'équipements plastiques issus de DEEE contiennent une grande diversité de matériaux dont le traitement et le recyclage nécessitent un développement de nouvelles technologies de séparation.

L'objectif de ce travail de thèse est d'analyser le déplacement des particules micronisées et millimétriques de plastique ainsi que l'attachement des particules micronisées, millimétriques et centimétriques en métal. La faisabilité de la séparation des particules de différentes tailles a été étudiée en utilisant la technique des rideaux électriques.

Le rideau électrique est généré par un ensemble d'électrodes disposées en parallèle sur la surface et recouvertes d'une fine couche d'isolant. La première condition de mise en mouvement est d'avoir des particules isolantes chargées, certaines particules sont naturellement chargées et peuvent être soulevées par des champs électriques suffisamment élevés. La charge des particules, qui peut être provoquée par des décharges à barrière diélectrique (DBD) ou par triboélectricité, est nécessaire mais non suffisante pour assurer le déplacement. Les valeurs du gradient de champ juste au-dessus de la surface de la barrière isolante, doivent être suffisamment élevées pour que les particules soient déportées de la zone.

Deux types de convoyeurs ont été réalisés dans le cadre de notre travail, un convoyeur biphasé à double face et un convoyeur à une seule face à deux et à trois phases. Une isolation entre les électrodes a été assurée pour la protection des convoyeurs contre le claquage entre les électrodes adjacentes.

Le premier type de convoyeur à double face a été utilisé pour étudier le déplacement des particules micronisées de plastique, et l'attachement des particules micronisées, millimétriques et centimétriques. Il a été également utilisé pour la séparation des particules micronisées et millimétriques. Le convoyeur a été fixé sur un dispositif mécanique à inclinaison variable pour analyser à la fois la force d'attraction appliquée aux particules métalliques et la force diélectrophorétique appliquée sur les particules de plastique.

Nous avons remarqué que la force d'attraction appliquée sur les particules de métal dépend principalement de l'amplitude de la tension appliquée. Le comportement des particules isolantes est différent, la force diélectrophorétique a un effet seulement sur les particules à masse faible.

Par ailleurs, une analyse a été effectuée avec le convoyeur à une seule face, à deux et à trois phases, pour différents valeurs de la distance inter-électrodes et différents signaux de la tension appliquée. Cette étude a été effectuée pour étudier la force d'attraction appliquée par le convoyeur sur les particules millimétriques et centimétriques en métal. Nous avons remarqué que 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. En plus, il a été observé que le champ électrique appliqué par un signal de forme carrée génère une force d'attraction plus grande que les autres formes de tension. En revanche plus la distance inter-électrodes diminue, plus la force d'attraction augmente.

Ensuite une analyse expérimentale a été effectuée en utilisant un convoyeur biphasé pour étudier l'influence de plusieurs facteurs tels que l'amplitude, le déphasage et la fréquence de la tension appliquée sur la séparation d'un mélange granulaire (Bronze/PA). Dans ce cas, le convoyeur a été fixé sur un vibreur électromagnétique pour éliminer l'influence des forces de collage appliquées sur les particules isolantes.

Il a été déduit que la tension reste le facteur majeur dans la séparation, l'augmentation de la tension donne une bonne séparation au niveau des deux convoyeurs.

D'un autre côté, le facteur de l'inclinaison a aussi été significatif sur l'efficacité de la séparation ainsi que le débit de vibration. Plus l'angle de l'inclinaison augmente le système devient plus rapide mais en revanche la pureté des produits est réduite car les particules de métal ne s'attachent pas fortement au convoyeur. Notons que la vibration rend le système plus rapide aussi mais instable si on dépasse une certaine amplitude de la vibration car les particules se déplacent toutes sous l'action des vibrations et alors il n'y a plus une bonne séparation.

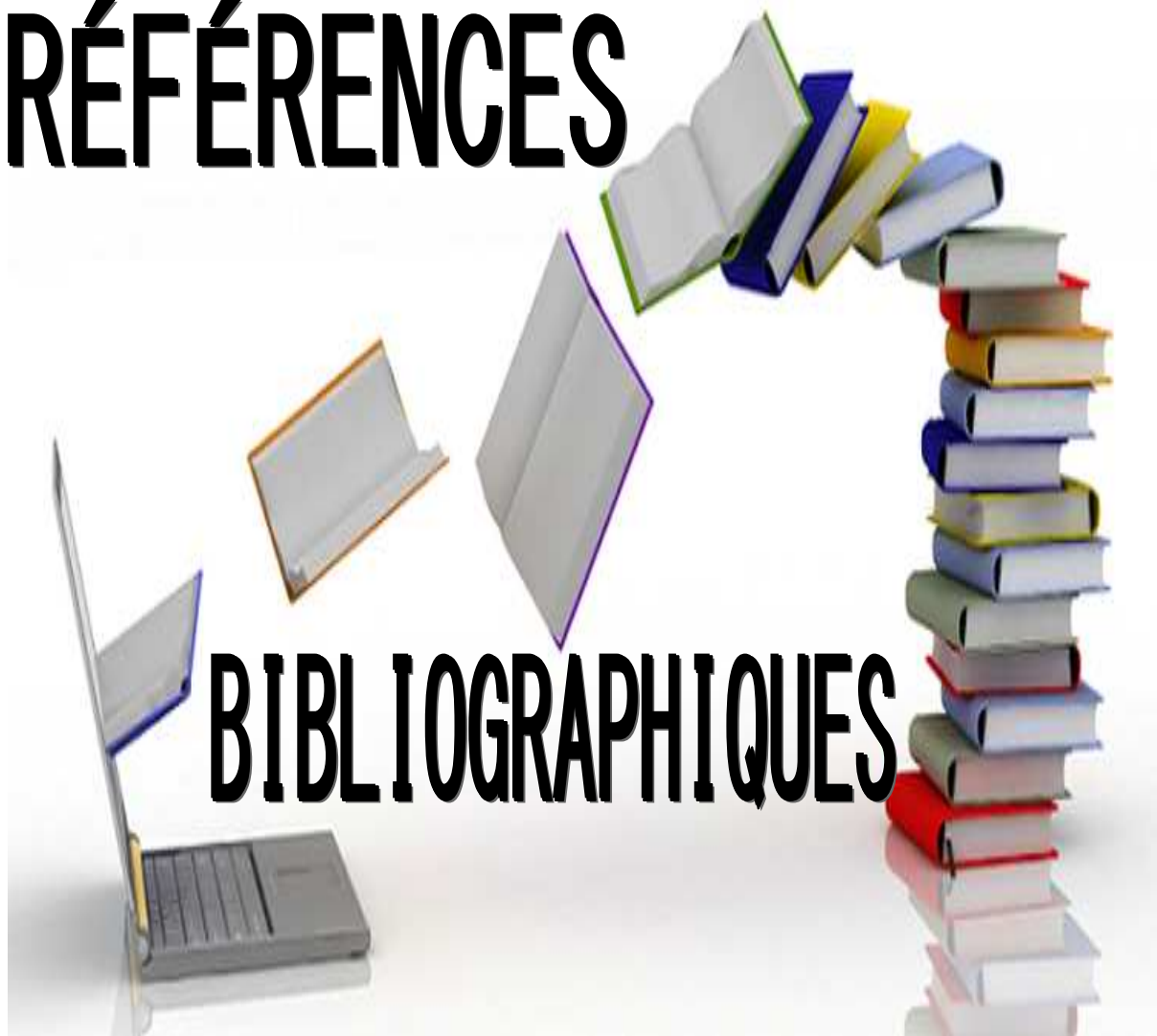
## Conclusion générale

---

En guise de perspectives, nous suggérons de :

- 🌈 Utiliser des plaques diélectriques plus fines pour disposer des convoyeurs à double face avec un champ électrique plus intense.
- 🌈 Approfondir l'étude par l'utilisation d'autres matériaux et d'autres tailles qui n'ont pas été utilisées dans notre étude.
- 🌈 Réaliser un dispositif automatisé pour effectuer la séparation des grandes quantités de particules en continu avec un système de commande pour avoir un bon rendement sans intervention humaine.
- 🌈 Analyser théoriquement avec plus de détails l'origine de la force d'attraction appliquée sur les particules de métal.

# RÉFÉRENCES



# BIBLIOGRAPHIQUES

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Deprouw. A, Jover. M, Chouvinc. S, Fangeat. E, "Rapport Annuel du Registre des Déchets D'équipements Électriques et Électroniques", Rapport Annuel, 2016.
- [2] Lu. B, Yang. J, Ijomah. W, Wu. W, Zlamparet. G, "Perspectives on reuse of WEEE in China: lessons from the EU Resources", Conservation and Recycling, 2018 Aug 1 ;135:83-92.
- [3] Higashiyama. Y, Asano. K, "Recent progress in electrostatic separation technology", Particulate Science and Technology, 1 janvier 1998; 16 (1): 77-90.
- [4] Veit. H.M., Diehl. T.R., Salami. A.P., Rodrigues. J.D.S., Bernardes. A.M., Tenório. J.A.S., "Utilisation de la séparation magnétique et électrostatique dans le recyclage des déchets de cartes de circuits imprimés", Waste Management, 2005 ; 25(1) : 67-74.
- [5] Tilmatine. A, Medles. K, Bendimerad. SE, Boukholda. F, Dascalescu. L, "Electrostatic separators of particles : Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures", Waste Management, 1 janvier 2009 ; 29(1):228-32.
- [6] Iuga A, Calin L, Neamtu V, Mihalcioiu A, Dascalescu L., "Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device", Journal of Electrostatics, 1 juin 2005, 63 (6-10) : 937-42.
- [7] Dascalescu. L, Tilmatine. A, Aman. F, Mihailescu. M, "Optimization of electrostatic separation processes using response surface modeling", IEEE Transactions on Industry Applications, 26 février 2004 ; 40 (1):53-9.
- [8] Miloudi. M, Medles. K, Tilmatine. A, Brahami. M, Dascalescu. L, "Optimisation of belt-type electrostatic separation of granular plastic mixtures tribocharged in a propeller-type device", In Journal of Physics : Conference Series, 23 juin 2011 (Vol. 301, No. 1, p. 012067). IOP Publishing.
- [9] 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.
- [10] Jeon. HS, Park. CH, Cho. BG, Park. JK, "Separation of PVC and rubber from covering plastics in communication cable scrap by tribo-charging", Separation Science and Technology, 9 janvier 2009 ; 44 (1) : 190-202.
- [11] Chang JS, Kelly AJ, Crowley JM. Handbook of electrostatic processes. CRC Press; 1995 Feb 8.
- [12] Hana, Bechkoura, and Mendjel Somia. "Etude et réalisation d'un procédé de tri des particules isolantes." (2019).
- [13] Nicoara S, Calin L, Iuga A, Serban N. Considerations on triboelectrostatic separation of plastic material for recycling purpose. Environment and Progress. 2006;6:341-6.
- [14] Smallwood JM. Electrostatic Recovery of Paper and Plastic Packaging Wastes (ELREC). ERA Technology Ltd. 2001.
- [15] Ralston OC. Electrostatic separation of mixed granular solids. Elsevier Publishing Company; 1961.

- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Mazumder M, Horenstein MN, Stark JW, Girouard P, Sumner R, Henderson B, Sadler 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Tilmatine A, Alibida A, Zelmat S, Louati H, Bellebna Y, Miloua F. On the attraction force applied on metal pieces in a traveling wave conveyor. Journal of Electrostatics. 2018 Dec 1;96:64-8.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Tatom FB, Srepel V, Johnson RD, Contaxes NA, Adams JG, Seaman H, Cline BL. Lunar dust degradation effects and removal/prevention concepts. NASA Technical Report No. TR-792-7-207A. 1967;3:1967.
- [25] 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.
- [26] Horenstein MN, Mazumder M, Sumner Jr RC. Predicting particle trajectories on an electrodynamic screen—theory and experiment. Journal of Electrostatics. 2013 Jun 1;71(3):185-8.
- [27] Weiss LC, Thibodeaux DP. Separation of seed by-products by an AC electric field. Journal of the American Oil Chemists' Society. 1984 May;61(5):886-90.
- [28] 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.
- [29] Masuda S, Kamimura T. Approximate methods for calculating a non-uniform travelling field. Journal of Electrostatics. 1975 Nov 1;1(4):351-70.

- [30] Masuda S, Matsumoto Y. Contact-type electric curtain for electrodynamical control of charged dust particles. In Proc. 2nd Int. Conf. on Static Electricity, Frankfurt 1973 Mar (No. 72, pp. 1370-09).
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] Niino. T., Egawa. S., and Higuchi. T., "High-Power and high-efficiency electrostatic actuator," Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop, Fort Lauderdale, Florida, février 1993, pp. 236-241.
- [34] Melcher. J.R., "Electric fields and forces in semi- insulating liquids," *Journal of Electrostatics*, vol. 2, 1976, pp. 121-132.
- [35] 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.
- [36] Tarek Diab. O., and Nouri. A., "Protection des panneaux solaires", 2014.
- [37] Pethig R. Dielectric and electrical properties of biological materials. *Journal of Bioelectricity*. 1985 Jan 1;4(2):vii-ix.
- [38] 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.
- [39] Pang H. Depoussierage électrostatique pour les particules submicroniques en atmosphère usuelle (terre) et raréfiée (planète mars) (Doctoral dissertation, Université Joseph-Fourier-Grenoble I , 2006.
- [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] Séguin. M. , Descheneau. J. , Tardif. B., "Ondes et physique moderne", *Physique XXI*, Tome C, 2010.
- [45] Fearing RS. Survey of sticking effects for micro parts handling. In Proceedings 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.



- [46] Hinds WC. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. John Wiley & Sons; 1999 Jan 19.
- [47] Sternovsky. Z., Sickafoose. A., Colwell. J., Robertson. S. and Horányi. M., "Contact charging of Lunar and Martian dust simulants", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, No. E11, p. 5105, 2002.
- [48] Atten P, Pang HL, Reboud JL. Study of dust removal by standing-wave electric curtain for application to solar cells on Mars. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2009 Jan 20;45(1):75-86.
- [49] White. H. J., "Industrial electrostatic precipitation", Wesley Publishing Company, Inc., 1963.
- [50] Parker K. R., "Electrostatic precipitation", Chapman & Hall, pp. 1-24, 1997.
- [51] Oglesby. S. & Nichols. G. B., "Electrostatic precipitation", Marcel Dekker Inc., 1978.
- [52] Pauthenier. M. & Moreau-Hanot. M., "La charge des particules sphériques dans un champ ionisé", *Journal de Physique et le Radium*, 3, pp. 590-613, 1932.
- [53] Pauthenier M, Guillien R. Etude électromécanique de la charge limite d'une sphère conductrice dans un champ électrique ionisé. CRAS Paris. 1932;195:115-6.
- [54] McDonald. J. R., Smith. W. B. & Spencer. H. W., "A mathematical model for calculating electric conditions in wire-duct electrostatic precipitation devices", *Journal of Applied Physics*, Vol. 48, N° 6, pp. 2231-2243, 1978.
- [55] Lawless PA, Altman RF. ESPM: an advanced electrostatic precipitator model. In *Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting 1994 Oct 2* (Vol. 2, pp. 1519-1526). IEEE.
- [56] Chen, Longwen. "Etude Expérimentale de la décharge couronne pour le traitement de l'air intérieur: COV et particules." PhD diss., Université Grenoble Alpes, 2018.
- [57] Hassouni. K., Massines. F., Pouvesle. J. M., "Plasmas hors-équilibre à des pressions atmosphériques, Plasmas froids: Génération, caractérisation, et technologies", Université de Saint-Etienne, 2004.
- [58] Landfried. R., "Contribution à l'étude de la transition décharge luminescente/arc électrique dans l'air et dans l'argon au voisinage de la pression atmosphérique", PhD Thesis, Supélec, 2011.
- [59] Abahazem. A., *Études expérimentales des décharges couronne pour la dépollution des gaz*, PhD Thesis, Université de Toulouse, 2009.
- [60] Veldhuizen. E.M.V., ed., "Electrical discharges for environmental purposes: fundamentals and applications", Nova Science Publishers, Huntington, N.Y, 2000.
- [61] Felici. N., "Diélectriques", Institut Polytechnique, Grenoble, 1966.
- [62] Dupuy. J., "Effet de couronne et champs ionisés", *Revue Générale d'Électricité*, 67, 2, pp. 85-104, 1958.
- [63] Chen. J., "Direct current corona-enhanced chemical reactions", PhD Thesis, Université de Minnesota, 2002.
- [64] Yousfi. M., Merbahi. N., Sarrette. J. P., Eichwald. O., Ricard. A., Gardou. J. P., Ducasse. O., and Benhenni. M., "Non thermal plasma sources of production of active species

- for biomedical uses : Analyses, optimization and prospect", in Biomedical Engineering - Frontiers and Challenges, R. Fazel-Rezai, Ed. InTech, 2011.
- [65] Aba'a Ndong. A., "Décharges à barrière diélectrique pulsées de volume et de surface appliquées à la précipitation électrostatique et à la régénération de surface: Volume and surface pulsed dielectric barrier discharges applied to electrostatic precipitation and surface regeneration", PhD diss., Poitiers, 2014.
- [66] Pethig R. Dielectrophoresis: Status of the theory, technology, and applications. *Biomicrofluidics*. 2010 Jun 29;4(2):022811.
- [67] Gascoyne. P. et Vykoukal. J., "Particle separation by dielectrophoresis" *Electrophoresis*, vol. 23, pp. 1973-1983, 2002.
- [68] Becker. F. et al, "Separation of human breast cancer cells from blood by differential dielectric affinity", *Proceedings of the National Academy of Sciences, United States*, vol. 92, pp. 860-864, 1995.
- [69] Huang. Y., Wang. X. B., Becker. F. F. et Gascoyne. P. R., "Introducing dielectrophoresis as a new force field for field-flow fractionation", *Biophysical Journal*, vol. 73, pp. 1118-1129, 1997.
- [70] Chesnutt. J. K. W. et Marshall. J. S., "Simulation of particle separation on an inclined electric curtain", *IEEE Transaction on Industry Applications*, 2013.
- [71] Liu. G. et Marshall. J. S., "Particle transport by standing waves in electric curtain", *Journal of Electrostatics*, vol. 68, pp. 289-298, 2010.
- [72] Liu. G., Li. S. Q. et al, "Characteristics of the motion of martian dust simulant on the travelling-wave electric curtain", *Jouranal of Ingeneering Thermal Physics*, vol. 32, pp. 2073-2075, 2011.
- [73] Cui. L. and Morgan. H., "Design and fabrication of travelling wave dielectrophoresis structures", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 10, pp. 72-79, 2000.
- [74] 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.
- [75] Alibida. A., Zemat. S., Zemat. M. E., Bogdan Neagoe. M., Miloua. F., Dascalescu. L., and Tilmatine. A., "Experimental analysis of a new attraction force applied on metal particles", *Particulate Science and Technology* 38, no. 4 (2020): 505-510.
- [76] Benabboun. A., Tilmatine. A., Brahami. Y. , Bendimerad. S-E., Miloudi. M., and Medles. K., "Experimental investigation of electrostatic separators of plastic particles using different charging devices", *Separation Science and Technology* 49, no. 3 (2014): 464-468.
- [77] Chen. R., Yao. H., and Qian. T., "An analytical model for electrostatic adhesive dynamics on dielectric substrates", *Journal of Adhesion Science and Technology* 31, no. 11 (2017): 1229-1250.
- [78] Nakamura. T., Yamamoto. A., "Modeling and control of electroadhesion force in DC voltage", *Robomech Journal*, décembre 2017; 4(1):1-0.

- [79] Mao. J., Qin. L., Zhang. W., "Modeling and simulation of electrostatic adhesion force in concentric-ring electrode structures of multilayer dielectrics", *The Journal of Adhesion*, 2 avril 2016 ; 92(4):319-40.
- [80] Krape. R. P., "Applications study of electroadhesive devices (NASA Contractor Report: NASA CR-1211)", National Aeronautics and Space Administration.", 1968.
- [81] **Louhadj. S.**, Hammadi. N., Touhami. S., Louati. H., Hadjali. A., Kimi. IE., Tilmatine. A., "Experimental analysis of the attraction force applied on metal particles using a double-side electrical curtain", *Journal of Electrostatics*. 2020 May 1; 105:103448.
- [82] Ali. AH., Zelmat. ME., Touhami. S., **Louhadj. S.**, Benmimoun. Y., Louati. H., Tilmatine. A., "Using a vibrating electrical curtain conveyor for separation of plastic/metal particles", *Powder Technology*. 2020 Aug 1; 373:267-73.
- [83] **Louhadj. S.**, Zelmat. S., Alibida. A., Tilmatine. A., "Utilisation d'un convoyeur à ondes mobiles biphasé pour la séparation des particules métal / plastique", 11<sup>ème</sup> Conférence sur la Haute Tension, Oran les 29 – 30 avril 2019.
- [84] **Louhadj. S.**, Tilmatine. A., "Réalisation d'un convoyeur à rideau électrique biphasé à double face pour la séparation des particules métal / plastique", Troisièmes Journées Doctorales de Génie Électrique JDGE'2019, Université Djillali Liabes, Sidi Bel Abbès, 17-18 Décembre 2019.

## ملخص

تستخدم الستارة الكهربائية ذات الموجة المتحركة بشكل عام لتحريك الجسيمات الدقيقة غير الموصلة ، والهدف من هذا العمل هو تحليل الظاهرة التي لوحظت لأول مرة على ناقلات الستارة الكهربائية ، والتي تتمثل في تطبيق قوة جذب على الجسيمات المعدنية على وجه الخصوص. تم استخدام ناقلان ، ذو طورين وآخر ثلاثي الأطوار يعملان بمضخات عالية الجهد والتي تم تثبيتها على نظام إمالة متغيرة ، قوة الجذب المطبقة بواسطة ناقل ثلاثي الطور أكبر من تلك المطبقة بواسطة ناقل ثنائي الطور ، من ناحية أخرى ، تعتمد هذه القوة على عدة عوامل مثل السعة والتردد وانزياح الطور للجهد المطبق. تم استخدام ناقل مزدوج الوجه يعمل بمحول نقطة وسطية عالية الجهد ، بتردد 50 هرتز ، مثبت على جهاز ميكانيكي يسمح بميله اليدوي من 0 درجة إلى 180 درجة لدراسة قوة الإزاحة للجسيمات العازلة وقوة التعلق بالجسيمات المعدنية. أظهرت النتائج ، من ناحية ، وجود قوة جذب تعتمد بشكل أساسي على سعة الجهد المطبق ، ومن ناحية أخرى ، جدوى فصل جزيئات المعدن / البلاستيك

## Résumé

Un rideau électrique à ondes mobiles est généralement utilisé pour déplacer des particules micronisées non conductrices. L'objectif de ce travail est d'analyser un phénomène observé pour la première fois 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 haute tension qui ont été fixés sur un système d'inclinaison variable. 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, fixé sur un dispositif mécanique permettant son inclinaison manuelle de 0° à 180° a été utilisé pour étudier la force de déplacement des particules isolantes et la force d'attachement des particules de métal. 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.

## Abstract

A traveling wave electric curtain is generally used to move non-conductive micronized particles. The objective of this work is to analyze a phenomenon observed for the first time on electric curtain conveyors, which consists in applying an attractive force on metallic particles in particular. Two conveyors were used, two-phase and another three-phase powered by high voltage amplifiers that were fixed on a variable tilt system. 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, frequency and phase shift of the applied voltage. A double-sided conveyor powered by a midpoint high voltage transformer with of frequency 50 Hz, attached to a mechanical device that allowed its manual tilting from 0° to 180° was used to study the displacement force of the insulating particles and the attachment force of the metal particles. The results obtained revealed, on the one hand, the existence of an attractive force which depends mainly on the amplitude of the applied voltage and, on the other hand, the feasibility of the separation of the metal/plastic particles.