

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8 Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2019



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

**Domaine:** Sciences et Technologie

**Filière:** Electrotechnique

**Spécialité:** Réseaux électriques

**Par:** MOUHOU B Sarra

### Thème

**Mesure de la charge dans les canalisations de transport des matériaux pulvérulents**

Soutenu publiquement, le 02/07/2019, devant le jury composé de:

M.KACHI Miloud	Professeur	Univ. Guelma	Encadreur/ Président
M.REMADNIA Mokdad	MCA	Univ. Guelma	Examineur
M.BELOUCIF Feissel	MCB	Univ. Guelma	Examineur

**Année Universitaire: 2018 /2019**

# **Remerciements**

**Avant toute chose, je remercie « الله » qui m'a donné la Patience, le courage et la volonté pour réaliser ce mémoire.**

**Paix et Salut sur notre premier éducateur**

**(مُحَمَّدٌ صَلَّى اللَّهُ عَلَيْهِ وَسَلَّمَ) le prophète pour ce qu'il a donné à l'humanité.**

**" من لم يشكر الناس لم يشكر الله... " حديث شريف**

**Je tenais aussi à présenter ma sincères remerciements à mon encadreur Dr. KACHI MILOUD pour sa disponibilité tout au long de l'élaboration de ce mémoire, pour ses encouragements, ses conseils, pour son aide, ses critiques et ses suggestions, et surtout pour sa patience dans la correction de ce travail.**

**Je tiens également à remercier l'ensemble des membres du jury qui ont fait l'honneur de juger notre travail.**

**Je remercie tous mes professeurs qui m'ont enseigné toutes ces années, je vous remercie et je témoigne mes sentiments les plus déférents.**

**Je tiens également à remercier L'ingénieur MOURAD.**

## **Résumé**

Les matériaux isolants pulvérulents ou granuleux peuvent acquérir une charge électrique lors de leur passage dans les canalisations métalliques suite à un frottement (triboélectricité) entre ces matériaux et les parois internes des conduites de transport pneumatique. Le phénomène de chargement de granulés peut constituer un gros problème, en particulier dans le milieu industriel, pouvant par exemple influencer la coulabilité, créer des décharges ou même des explosions dans les conduits de transport pneumatique.

Dans ce travail le chargement des matériaux pulvérulents dans une canalisation métallique a été étudié. A cet effet, une installation de taille réduite a été réalisée au laboratoire de Génie Electrique de Guelma (LGEG). Le but de l'étude est de mettre en évidence le phénomène de charge des matériaux pulvérulents dans les canalisations métalliques lors du transport pneumatique dans les différents processus industriels et la détermination des principaux facteurs d'influence.

## **Abstract**

Powders or granular insulating materials can acquire an electric charge when they pass through the metal pipes as a result of friction (triboelectricity) between these materials and the internal walls of the pneumatic conveying conduits. The charging phenomenon of granular can lead to several problems, particularly in the industrial environment, which can for example influence the flowability, create discharges or even explosions in pneumatic conveying conduits.

In this work, the electric charging of pulverulent materials into a metallic pipe was studied. A small installation was achieved at the Electrical Engineering Laboratory (LGEG). The aim of the study is to highlights the charging phenomena of powders materials in metallic pipes during pneumatic transport in the different industrial processes and the determination of the main influencing factors.

## ملخص

يمكن للمساحيق أو المواد العازلة الحبيبية الحصول على شحنة كهربائية عندما تمر عبر الأنابيب المعدنية نتيجة الاحتكاك بين هذه المواد والجدران الداخلية لقنوات النقل الهوائي. يمكن أن تؤدي ظاهرة الشحن الحبيبي إلى عدة مشاكل، لا سيما في البيئة الصناعية، والتي يمكن أن تؤثر على سبيل المثال على قابلية التدفق، أو تسبب تصريفات أو حتى انفجارات في قنوات النقل الهوائي.

في هذا العمل، تمت دراسة الشحن الكهربائي للمساحيق في أنبوب معدني. لهذا الغرض، تم تحقيق تركيب صغير في مختبر الهندسة الكهربائية (م ه ك ق). تهدف الدراسة إلى تسليط الضوء على ظاهرة شحن المساحيق في الأنابيب المعدنية أثناء النقل الهوائي في العمليات الصناعية المختلفة وتحديد العوامل المؤثرة الرئيسية.

## Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> Description de la décharge couronne positive	04
<b>Figure I.2:</b> Description de la décharge couronne négative	05
<b>Figure I.3:</b> Principe de formation d'électret par décharge couronne	06
<b>Figure I.4:</b> Dispositif de charge par effet triboélectrique	07
<b>Figure I.5:</b> Classement de certains matériaux selon leur caractère triboélectrique	08
<b>Figure I.6:</b> Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur	09
<b>Figure I.7:</b> Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone	10
<b>Figure I.8:</b> Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique	10
<b>Figure I.9:</b> Les régimes du lit fluidise en fonction de la vitesse de fluidisation	11
<b>Figure I.10:</b> Représentation schématique d'un dispositif de chargement tribo-aéro- électrostatique	12
<b>Figure I.11:</b> Dispositif à vibrations	12
<b>Figure I.12:</b> Représentation schématique d'un dispositif de chargement par tambour tournant (a) Lisse, (b) à ailettes	13
<b>Figure I.13:</b> Principe de charge par rouleau électrostatique	13
<b>Figure I.14:</b> Influence entre deux corps (le corps B étant isolé)	14
<b>Figure I.15:</b> Influence entre deux corps (le corps B étant relié à la terre)	14
<b>Figure I.16:</b> Mesure de la charge à l'aide d'un seau de Faraday : (a) principe de la méthode et (b) circuit de mesure	16
<b>Figure I.17:</b> Principe de la sonde capacitive	17
<b>Figure I.18:</b> Sonde capacitive vibrante	18
<b>Figure I.19:</b> Principe de fonctionnement du moulin à champ	19
<b>Figure I.20:</b> Principe du voltmètre électrostatique	20

<b>Figure I.21:</b> Modèle capacitif de la sonde à induction	21
<b>Figure I.22:</b> Principe de la méthode de compensation	23
<b>Figure II.1:</b> Le couscous utilisé dans les expériences	27
<b>Figure II.2:</b> Schéma de la fabrication industrielle du couscous	28
<b>Figure II.3:</b> Molécule de polyéthylène ramifiée	29
<b>Figure II.4:</b> Le polyéthylène utilisé dans les expériences	29
<b>Figure II.5:</b> Polymérisation du styrène	30
<b>Figure II.6:</b> Le polystyrène utilisé dans les expériences	31
<b>Figure II.7:</b> Dispositif de chargement des matériaux pulvérulents : Photo du dispositif utilisé dans les expériences et la représentation schématique du dispositif	32
<b>Figure II.8:</b> La cage de Faraday utilisée pour mesurer la charge électrique : Photo du dispositif utilisé dans les expériences et le schéma de principe pour la mesure de la charge	33
<b>Figure II.9:</b> Electromètre Keithley model 6514	33
<b>Figure II.10:</b> Humidity/ Anemometer Meter – Lutron (AM-4205 A)	34
<b>Figure II.11:</b> Balance électronique (5 kg/1g)	34
<b>Figure II.12:</b> Dual Channel Thermometer (RS-232 computer interface) model (TM-915A)	35
<b>Figure III.1:</b> Variation d'humidité de couscous en fonction du temps de séchage	38
<b>Figure III.2:</b> Variation de la charge massique de couscous en fonction de la température de l'installation: avec poids fixe	39
<b>Figure III.3:</b> Variation de la charge massique de couscous en fonction de la température de l'installation	40
<b>Figure III.4:</b> Variation de la charge de couscous en fonction du poids pour $T = 84\text{ C}^\circ$	41

<b>Figure III.5:</b> Variation de la charge de couscous en fonction du poids pour $T = 70\text{ C}^\circ$	42
<b>Figure III.6:</b> Variation de la charge massique de couscous en fonction de la température de l'installation: sans et avec la terre	43
<b>Figure III.7:</b> Variation de la charge massique de polyéthylène en fonction de la température de l'installation	45
Figure III.8: Variation de la charge massique de polystyrène en fonction de la température de l'installation	47
<b>Figure III.9:</b> Chargement de polyéthylène et polystyrène sans et avec la terre	48

## Liste des tableaux

<b>Tableau II.1:</b> Les caractéristiques de PEBD et PEHD	29
<b>Tableau II.2:</b> Propriétés physiques de PS	31
<b>Tableau III.1:</b> La charge de couscous Amor benAmor directement du sac	37
<b>Tableau III.2:</b> La charge de couscous extra directement du sac	37
<b>Tableau III.3:</b> Chargement de couscous sans chauffer l'installation	37
<b>Tableau III.4:</b> Humidité de couscous réduit par un séchoir	37
<b>Tableau III.5:</b> Chargement de couscous avec poids fixe (28 g)	39
<b>Tableau III.6:</b> Chargement de couscous pour plusieurs températures	40
<b>Tableau III.7:</b> Chargement de couscous pour $T = 84\text{ C}^\circ$	41
<b>Tableau III.8:</b> Chargement de couscous pour $T = 70\text{ C}^\circ$	42
<b>Tableau III.9:</b> Chargement de couscous sans la terre	42
<b>Tableau III.10:</b> Chargement de couscous avec la terre	43
<b>Tableau III.11:</b> La charge de polyéthylène directement du sac	44
<b>Tableau III.12:</b> Chargement de polyéthylène (sans la terre)	44
<b>Tableau III.13:</b> Chargement de polyéthylène (avec la terre)	45
<b>Tableau III.14:</b> La charge de polystyrène directement du sac	46
<b>Tableau III.15:</b> Chargement de polystyrène (sans la terre)	46
<b>Tableau III.16:</b> Chargement de polystyrène (avec la terre)	47



# Sommaire

Introduction générale	01
<b>CHAPITRE 1 – Etat de l’art</b>	
I.1. Introduction	02
I.2. Chargement des matériaux	02
I.2.1. Phénomène et méthodes de chargement	02
I.2.1.1. Chargement des matériaux par décharge couronne	03
I.2.1.1.1. La décharge couronne	03
I.2.1.1.2. Types de la décharge couronne	03
I.2.1.1.3. Charge par décharge couronne	05
I.2.1.2. Chargement des matériaux par triboélectricité	06
I.2.1.2.1. La triboélectricité	06
I.2.1.2.2. Charge par effet triboélectrique	07
I.2.1.2.3. Dispositifs de chargement triboélectrique	09
I.2.1.3. Chargement des matériaux par rouleau électrostatique	13
I.2.1.4. Chargement des matériaux par influence électrostatique (induction)	14
I.3. Méthodes de mesure de la charge	15
I.3.1. Seau de Faraday	15
I.3.2. Sonde capacitive	16
I.3.3. Sonde capacitive vibrante	17
I.3.4. Moulin à champ	18
I.3.5. Voltmètre électrostatique	19
I.3.6. Sonde à induction	20
I.3.7. Méthode de compensation	22
I.4. Charge dans les systèmes de transport pneumatique	23
I.4.1. Systèmes de transport pneumatique	23
I.4.2. Chargement des particules lors de leur transport pneumatique	25
I.5. Conclusion	25
<b>CHAPITRE II – Matériaux et méthodes</b>	
II.1. Introduction	26
II.2. Matériaux	26
II.2.1. Matériau alimentaire	26
II.2.1.1. Le couscous	26
II.2.1.1.1. Définition et origine de couscous	26
II.2.1.1.2. La fabrication industrielle de couscous	27
II.2.1.1.3. Le conditionnement et le stockage	28
II.2.2. Les polymères	28
II.2.2.1. Polyéthylène (PE)	28
II.2.2.1.1. Définition de polyéthylène	28
II.2.2.1.2. Domaine d’application du polyéthylène	30
II.2.2.2. Polystyrène (PS)	30
II.2.2.2.1. Définition de Polystyrène	30
II.2.2.2.2. Utilisation du polystyrène	31
II.3. Installation expérimentale du transport	31
II.4. Etapes de mesure	33
II.4.1. Mesure de la charge	33
II.4.2. Mesure de l’humidité relative	34

II.4.3. Mesure de la masse granulaire	34
II.4.4. Mesure de la température de l'installation	35
II.5. Conclusion	35

### **CHAPITRE III – Résultats et interprétation**

III.1. Introduction	36
III.2. Mesures sur le couscous	36
III.2.1. Mesure sur des échantillons vierges	36
III.2.2. Chargement de couscous sans chauffage de l'installation	37
III.2.3. Réduction d'humidité	37
III.2.4. Chargement de couscous avec l'installation chauffée	38
III.2.4.1. Influence de la température de canalisation sur la charge	38
III.2.4.2. Influence du poids du couscous sur la charge	41
III.2.4.3. Influence de la mise à la terre de la canalisation	42
III.3. Mesures sur les polymères	44
III.3.1. Chargement du polyéthylène	44
III.3.2. Chargement du polystyrène	46
III.3.3. Comparaison entre la charge massique du polyéthylène et polystyrène	48
III.4. Conclusions	48
Conclusion générale	50
Bibliographie	51

## Introduction générale

L'électricité statique est un phénomène découvert à l'époque des Grecs, qui remarquèrent que lorsque l'on frottait des morceaux d'ambre avec un morceau de tissu, ils attiraient les plumes, le tissu et la laine. William Gilbert était l'un des premiers qui savaient qu'il existe d'autres matériaux qui avaient un phénomène d'attraction.

Le phénomène de chargement de granulés peut constituer un gros problème, en particulier dans le milieu industriel, car les granulés sont chargés par frottement (triboélectricité) et collent aux parois internes des tuyaux des installations dans les usines pendant leur transport pneumatique. La recherche de solutions à ce problème est l'une priorité de l'usine. La quantité de charge accumulée à la surface des matériaux doit être contrôlée et ramenée à un niveau sans risque. Cela permettra d'assurer la sécurité et la performance des installations et des équipements industriels au voisinage. Par conséquent, les charges électriques accumulées doivent être éliminées ou évacuées à travers le système de mise à la terre.

Dans ce travail le chargement des matériaux pulvérulents (isolants ou non) dans une installation à canalisation métallique a été étudié. L'objectif étant de mettre en évidence le phénomène d'une part et d'autre part la détermination des principaux facteurs d'influence.

Pour bien cerner le sujet nous avons structuré le mémoire en trois chapitres:

Le premier présente l'état de l'art du sujet. On présentera les différentes méthodes de chargements des matériaux isolants ainsi que les méthodes de mesure de la charge. La charge dans les systèmes de transport pneumatique est également présenté.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des matériaux utilisés dans cette étude, l'installation ainsi que les étapes et les techniques de mesure utilisées pendant l'étude.

Les résultats obtenus avec leurs interprétations ont été présentés dans le dernier chapitre.

Le mémoire se termine par une conclusion qui englobe les principaux résultats obtenus.

# **Chapitre I**

## **Etat de l'art**

## **I.1. Introduction**

La formation des charges à la surface des isolants est un phénomène commun puisqu'il s'agit avant tout d'un phénomène naturel. En effet, les isolants peuvent acquérir une charge électrique suite à un frottement (triboélectricité), à une force mécanique (piézoélectricité) ou par influence électrostatique [1].

Ce chapitre expose les différentes méthodes de chargement des matériaux § (I.2), puis les méthodes de mesure de la charge sont présentées dans § (I.3). La dernière partie du chapitre est consacrée à la problématique de la charge dans les systèmes de transport pneumatique § (I.4).

## **I.2. Chargement des matériaux**

### **I.2.1. Phénomène et méthodes de chargement**

Un corps chargé électriquement est la manifestation d'une accumulation ou d'une perte de charges électriques. En effet, lorsqu'un corps est en équilibre, il est électriquement neutre. Ce corps sera électrisé lorsque quelques-uns de ses atomes auront soit gagné, soit perdu un ou plusieurs électrons rompant ainsi l'équilibre et la neutralité. On dit alors que ce corps possède une charge électrique.

Il y a de nombreux modes d'électrisation possibles :

- Par frottement (triboélectricité).
- Par contact (transfert direct de charges).
- Par ionisation (émissions d'ions sous haute tension).
- Par influence (à l'aide d'un champ électrique).
- Par clivage (fragmentation).
- Par effet photoélectrique.
- Par émission thermoélectronique.
- Par ballo-électricité (agitation des particules dans un flux de gaz) etc....

Les méthodes les plus répandues étant l'effet triboélectrique, par transfert de charges à l'aide d'un rouleau électrostatique et par décharge couronne. Ces techniques sont les plus utilisées pour charger les diélectriques en vue de la caractérisation de leur aptitude à garder l'état d'électrisation [2].

### **I.2.1.1. Chargement des matériaux par décharge couronne**

#### **I.2.1.1.1. La décharge couronne**

La décharge couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz au voisinage d'un conducteur porté à une tension dont le champ électrique environnant est intense mais non disruptif. Cette conductivité est due au phénomène d'ionisation. Ce type de décharge ne nécessite aucune source externe d'ionisation pour se développer, on dit que c'est une décharge auto-entretenu (autonome). Cependant, la présence d'un électron initial pour amorcer la décharge est nécessaire. La décharge couronne à pression atmosphérique est souvent associée à deux électrodes asymétriques. L'électrode active de faible rayon de courbure (une pointe ou un fil mince) est portée à un potentiel élevé. L'électrode passive (une plaque plate ou un cylindre), est mise à la terre, elle peut être positive ou négative selon la polarité de la tension appliquée à l'électrode active.

La décharge couronne est un dispositif de chargement utilisé essentiellement pour le chargement des matériaux isolants. Grâce à cette technique il est possible de déposer des charges électriques aussi bien positives que négatives selon la polarité du système de décharge [3].

#### **I.2.1.1.2. Types de la décharge couronne**

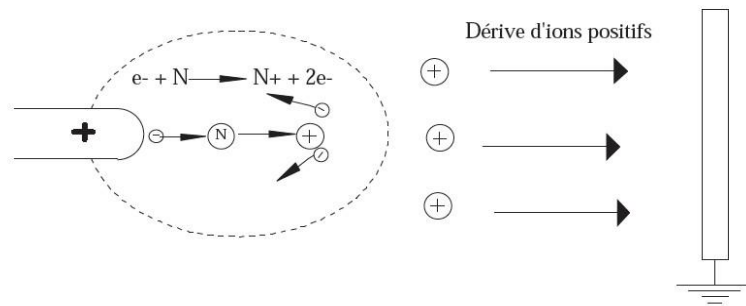
Deux types de cette décharge sont à énumérés. En raison de signe de polarité appliquée au niveau de l'électrode active, on peut différencier deux modèles : « mono polaire et bipolaire ». Et si on dit bipolaire, c'est qu'on fait allusion à une décharge dite positive et négative sur une certaine fréquence ou période. Si la polarité est positive, la décharge sera donc positive. Dans le cas inverse, elle sera négative [4].

- **Décharge couronne positive**

La décharge couronne positive est celle qui se produit quand la pointe est portée à un potentiel positif et la plaque à la terre. Dans ce cas, dans la zone de champ intense autour de la pointe, des électrons sont produits par photo-ionisation et sont accélérés vers l'anode (la pointe). Autour de celle-ci, se développe alors une région de forte ionisation : zone en pointillé sur la figure I.1. Les ions positifs ainsi créés sont repoussés par l'anode, sous l'effet des forces de Coulomb, jusqu'à une distance de la pointe (inférieure au millimètre) au-delà de laquelle le champ électrique trop faible ( $< 30 \text{ kV/cm}$  dans l'air à pression atmosphérique) ne

permet plus la création d'ions positifs. Les ions positifs migrent donc vers la cathode (la plaque).

Différents régimes existent pour la décharge couronne. Juste au-delà du seuil d'apparition, la décharge couronne positive est pulsatoire. En augmentant la tension, la décharge positive devient une décharge luminescente continue. Pour les tensions très élevées, la décharge se transforme en claquage (arc) [1].

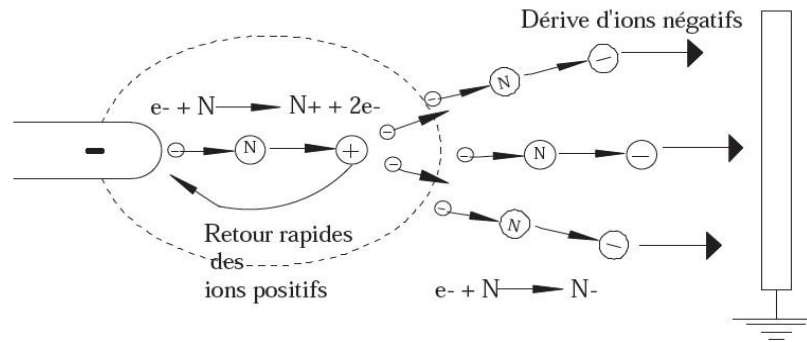


**Figure I.1:** Description de la décharge couronne positive

- **Décharge couronne négative**

Dans le cas où la pointe est portée à un potentiel négatif, il y a toujours création d'électrons par photo-ionisation et apparition de la zone d'ionisation autour de la pointe. Les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode (figure I.2).

Au-delà du seuil d'apparition, la décharge couronne négative à un régime pulsateur. En augmentant la tension, la décharge négative atteint le régime d'impulsions de Trichel dont la fréquence dépend de la tension appliquée. Ces impulsions sont régulières et sont dues au champ électrique qui s'affaiblit au voisinage de la cathode. Les ions négatifs empêchent en effet la multiplication des avalanches électroniques. Une fois ces ions migrés vers l'anode, de nouvelles avalanches apparaissent. L'intervalle entre deux pics de courant, impulsions de Trichel, dépend donc du temps nécessaire aux ions négatifs à atteindre l'anode [1].



**Figure I.2:** Description de la décharge couronne négative

- **Décharge couronne alternative**

Dans ce cas, le processus de la décharge soumise à une excitation alternative est identique à ceux décrits pour une excitation continue, dans la mesure où l'intervalle de temps entre les inversions de polarité est suffisamment long pour que toutes les charges résiduelles de l'alternance précédente soient écoulées. Ceci implique l'existence d'une fréquence  $f$  et d'une distance inter-électrodes  $d$  limites reliées par l'expression suivante :

$$d_{\max} = \frac{\mu E}{\pi f} \Rightarrow f_{\max} = \frac{\mu E}{\pi d} \quad (\text{I.1})$$

Avec  $\mu$  la mobilité des ions et  $E$  l'amplitude du champ électrique.

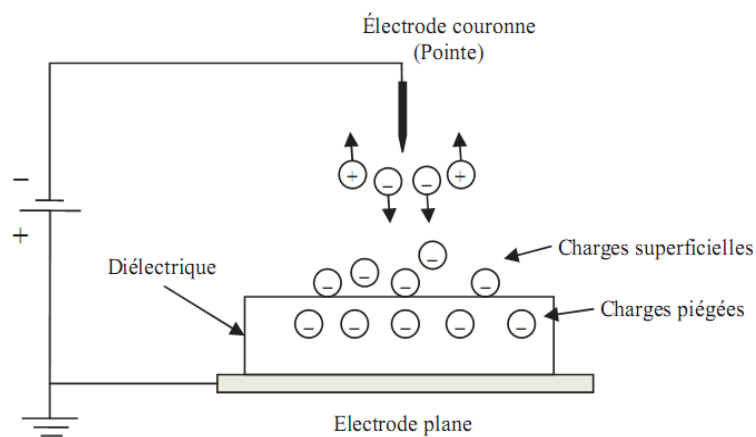
Tant que la fréquence est inférieure à  $f_{\max}$  la décharge couronne alternative se comporte comme en continu. Par contre si l'excitation est supérieure à cette fréquence  $f_{\max}$ , la charge d'espace va osciller et augmenter à chaque période. Cet effet cumulatif aura pour conséquence des passages à l'arc pour des potentiels plus faibles qu'en continu [1].

### I.2.1.1.3. Charge par décharge couronne

La décharge couronne est le moyen le plus simple et le plus fiable pour reproduire le chargement électrostatique des isolants. Grâce à ce moyen, il est possible de déposer des charges aussi bien positives que négatives selon la polarité du système de décharge dans les niveaux de surface de l'isolant. La méthode de chargement par décharge couronne suscite un intérêt toujours croissant à cause du besoin de charger électriquement des films ou des matériaux fibreux pour diverses applications telles que l'électro-photographie et les électrets.



Une tension assez élevée (de dizaines de kV) est appliquée à une électrode de faible rayon de courbure (centaines de micromètres) située à une certaine distance (plusieurs centimètres) par rapport à un plan de masse. L'électrode active peut être une pointe, plusieurs pointes disposées en forme de peigne, ou un fil très fin. Le champ électrique dans l'espace inter électrodes est non uniforme, son intensité au voisinage de l'électrode active est assez élevée pour que l'air soit ionisé. Le diélectrique est posé sur le plan de masse. Sous l'action du champ électrique, il reçoit des charges de même polarité que l'électrode couronne. La figure (I.3) illustre le principe de formation d'électret par décharge couronne négative [5].



**Figure I.3:** Principe de formation d'électret par décharge couronne

### I.2.1.2. Chargement des matériaux par triboélectricité

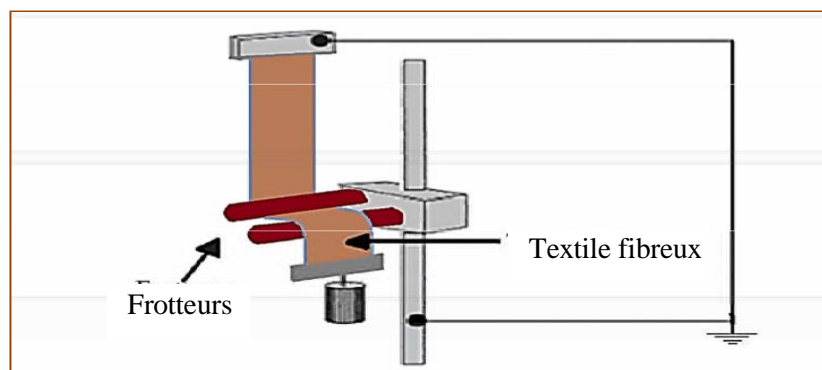
#### I.2.1.2.1. La triboélectricité

La triboélectricité (du grec *tribein* qui signifie « frotter » et *ēlektron* qui signifie « ambre » et est la racine du mot électricité) désigne le phénomène électrostatique créé par la mise en contact de deux matériaux de nature différente : une partie des électrons de la surface de contact d'un des deux matériaux est transférée à l'autre et ce transfert subsiste lors de la séparation. L'effet triboélectrique peut être augmenté par apport d'énergie mécanique en frottant les matériaux l'un contre l'autre [6].

Deux corps frottés l'un contre l'autre deviennent chargés électriquement. Dépendant de leurs natures, l'un devient chargé positivement, l'autre négativement [7].

### I.2.1.2.2. Charge par effet triboélectrique

Il s'agit d'un transfert de charges électriques entre différents matériaux : lorsque deux matériaux électriquement neutres entrent en contact, il y a un transfert de charges qui aboutit à l'obtention de deux matériaux chargés, l'un positivement et l'autre négativement. Si l'un des matériaux présente une conductivité faible, les charges ainsi générées resteront après séparation et de nouveaux contacts auront pour effet de produire de nouveaux transferts de charges. L'effet triboélectrique est en général associé à l'apparition de charges électriques après frottement entre deux matériaux mais sa définition s'étend souvent aux transferts de charges par contact, le frottement étant l'équivalent de contacts suivi de séparations, mais s'accompagnant de génération de chaleur et parfois de transfert de masse. La figure (I.4) présente un dispositif de charge par effet triboélectrique utilisé dans l'évaluation de l'aptitude d'un textile fibreux à se charger par frottement et à atteindre des potentiels de surface plus ou moins importants. Cette évaluation permet de prévenir la manifestation des courants de décharge [2].

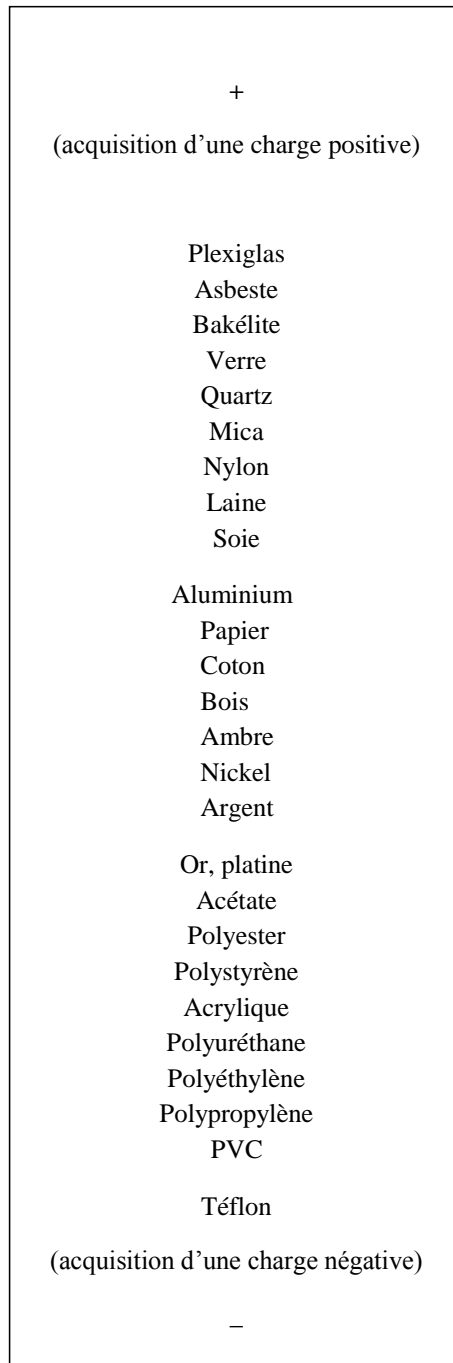


**Figure I.4:** Dispositif de charge par effet triboélectrique

La polarité des charges dépend de nombreux facteurs, on peut cependant établir des listes ou séries dites triboélectriques (figure I.5), auxquelles on prête la valeur d'indice : plus les deux matériaux dont il s'agit sont éloignés l'un de l'autre sur la liste, plus la charge qu'ils vont engendrer sera élevée. En réalité, on ne peut pas se fier complètement à l'ordre des matériaux dans ces listes car il diffère souvent d'un auteur à l'autre ; en effet une différence dans le frottement, des facteurs externes peuvent inverser les signes obtenus, il semble donc impossible de réaliser une liste avec un ordre fiable. Cette particularité de l'électricité

statique, le fait que les signes peuvent s'inverser de manière si facile, est très surprenant et est un élément de plus qui peut permettre de comprendre les mécanismes électrostatiques.

Ce classement n'est donc que très approximatif et l'ordre des différents matériaux peut varier sous l'influence de facteurs tels que : la rugosité de la surface, les forces de contact, le travail de sortie... En définitive ce diagramme n'est qu'un outil de comparaisons relatives entre les différents corps plutôt qu'une référence absolue [8].



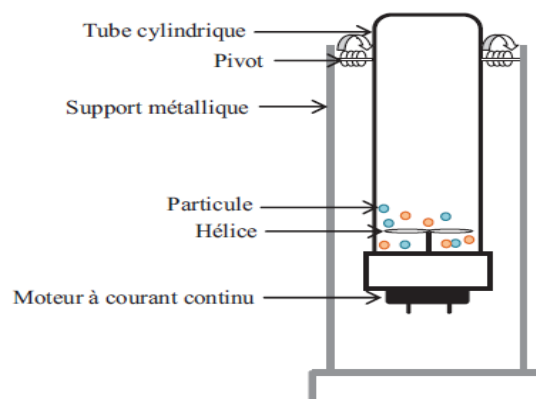
**Figure I.5:** Classement de certains matériaux selon leur caractère triboélectrique

### I.2.1.2.3. Dispositifs de chargement triboélectrique

- **Chargement par ventilateur**

Les principaux éléments de cette installation sont (Figure I.6) : le tube cylindrique isolant en PVC, le moteur à courant continu qui entraîne l'hélice isolante et le support métallique. Le dispositif utilise l'air ascendant qui donne naissance à des turbulences dans le tube contenant le mélange de particules, provoquant ainsi leur tribo-électrification lorsque celles-ci entrent en collisions entre-elles ou avec les parois du tube.

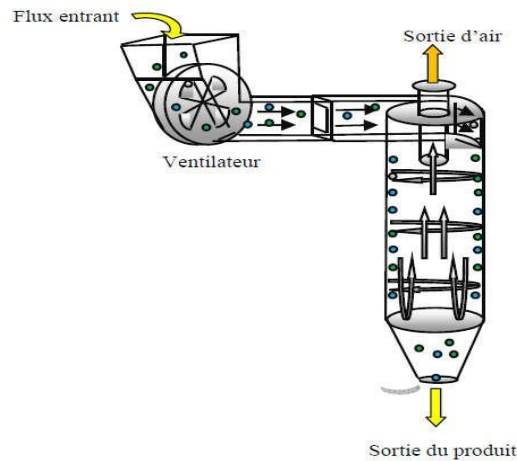
Le mélange chargé est récupéré en pivotant le cylindre sans procéder à l'arrêt du moteur afin d'éviter l'adhérence des particules aux parois et permettre la récupération complète du contenu. Notons ici que le matériau du cylindre joue un rôle important dans ce mécanisme de charge et peut être choisi judicieusement en fonction du mélange à traiter, car le nombre de collisions entre particule-paroi est important à cause de la force centrifuge qui tente de projeter les particules entre les parois du dispositif [9].



**Figure I.6:** Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur

- **Chargement par cyclone**

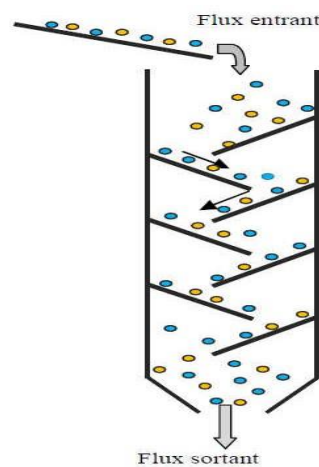
Le dispositif est un cylindre isolant (figure I.7), y compris un ventilateur dont le rôle est de souffler les particules à charger à l'intérieur du cylindre, où elles subissent un frottement continu contre la paroi interne. La majorité de la charge acquise s'effectue lors du contact des particules avec cette paroi [10].



**Figure I.7:** Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone

- **Chargement statique**

Le dispositif de chargement statique est une enceinte parallélépipédique isolante (figure I.8), y compris des parois inclinées et détachables. Les particules tombent en chute verticale et glissent dans ce dispositif par gravitation. Le chargement de ces particules s'effectue par frottement avec les parois [10].



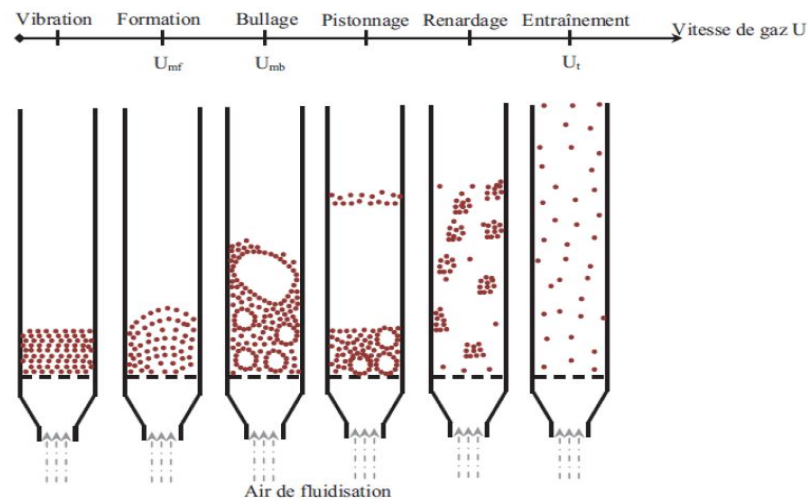
**Figure I.8:** Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique

- **Chargement à lit fluidisé**

Le dispositif est un tube cylindrique isolant, le mélange de particule est déposé sur le support (un disperseur en tamis isolant), on souffle de l'air à l'aide d'une soufflante au bas du cylindre. Les particules sont fluidisées, elles acquièrent des charges électriques de signe opposé grâce aux collisions entre elles.

C'est le procédé le plus utilisé pour le chargement tribo-électrique. Le fonctionnement du lit fluidisé dans ces dispositifs est défini par six phénomènes (figure I.9). On considère une

couche de particules solides reposant sur une plaque poreuse horizontale à l'intérieur d'un cylindre vertical. On injecte un gaz à travers la plaque dans le sens ascendant.

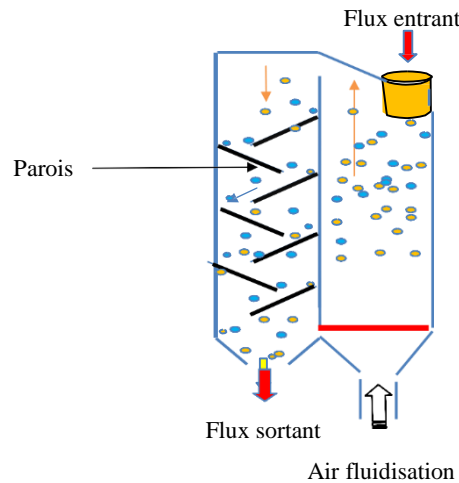


**Figure I.9:** Les régimes du lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation

- **La vibration** : pour les plus faibles vitesses du gaz, la couche des particules reste sur le disperseur sans mouvements visibles. Si on augmente encore la vitesse, on observe des vibrations de particules.
- **La formation** : le lit commence à être fluidisé (avoir des caractéristiques des fluides : ondes, petites bulles, viscosité ...) grâce à une vitesse superficielle de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimale de fluidisation  $U_{mf}$ , le lit montre une certaine expansion de la couche, on atteint ainsi la transition entre l'état fixe et l'état fluidisé du lit de particules.
- **Le bullage** : à une vitesse de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimum de bullage  $U_{mb}$ , des bulles se forment dans la région de la plaque poreuse de distribution de gaz au bas du cylindre, s'élèvent dans le lit, grossissent par coalescence et viennent finalement éclater en surface comme dans le cas d'un liquide à ébullition.
- **Le pistonage** : en excès au-delà de  $U_{mb}$ , le diamètre des bulles atteint cette fois des dimensions comparables à celles du cylindre. Il y a alternance dans le lit de passage de grosses bulles et de lit stable. La surface du lit se soulève et retombe de manière très régulière.
- **Le renardage** : les particules s'accrochent et créent des passages préférentiels pour le gaz.
- **L'entraînement** : quand la vitesse du gaz est approximativement égale à la vitesse limite de chute des particules dans le gaz au repos  $U_t$ , l'ensemble des particules est alors expulsé hors de la chambre de fluidisation : c'est le phénomène d'entraînement [10].

- **Chargement tribo-aéro-électrostatique**

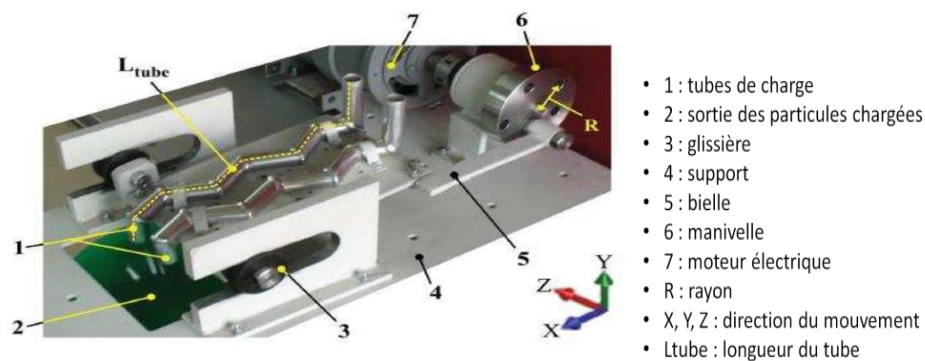
C'est une combinaison de deux modes de chargement en cascade, le procédé est une chambre parallélépipédique isolante comprend deux partie (figure I.10) : la première pour le chargement aéro-triboélectrique (à lit fluidisé), après avoir mis les particules en agitation dans un lit fluidisé, elles sont dirigés vers la deuxième partie du dispositif destiné au chargement statique par des parois inclinées, dont le but de pouvoir mieux contrôler la charge acquise, multipliant les paramètres de chargement [10].



**Figure I.10:** Représentation schématique d'un dispositif de chargement tribo-aéro-électrostatique

- **Chargement par vibrations**

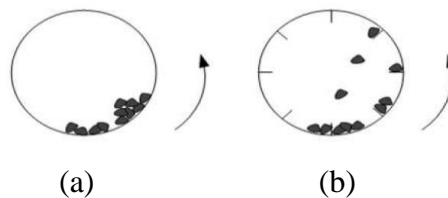
Une autre solution pour charger les particules est obtenue par le dispositif à vibrations (Figure I.11). Le matériau à charger glisse dans des canaux en zigzag mis en mouvement vibratoire selon les deux axes X et Y. Les oscillations du dispositif de charge sont contrôlées par un moteur électrique et un système bielle-manivelle. Les particules à charger interagissent premièrement avec les parois du dispositif [9].



**Figure I.11:** Dispositif à vibrations

- **Chargement à tambour tournant**

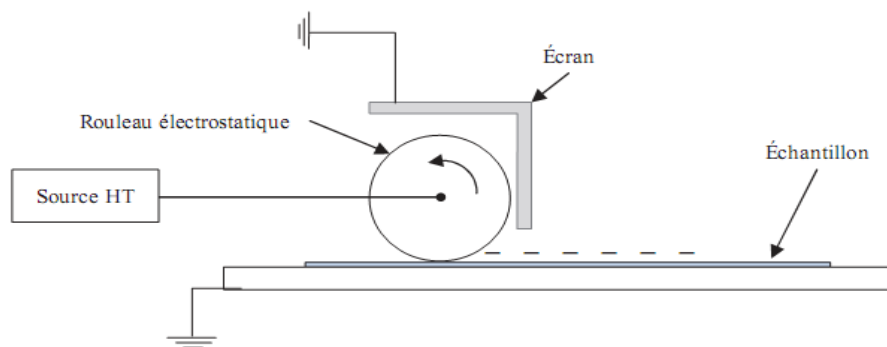
Différents dispositifs ont été imaginés pour améliorer l'effet de la charge et éliminer les agglomérats. En faisant tourner un tambour équipé d'ailettes au niveau de sa surface intérieure (Figure I.12), il pourra fournir non seulement une plus grande probabilité de collisions particule-particule, en raison de l'agitation, mais aussi une plus grande surface de contact pour les collisions particule-paroi par rapport au modèle à surface interne lisse [9].



**Figure I.12:** Représentation schématique d'un dispositif de chargement par tambour tournant  
(a) Lisse, (b) à ailettes

### I.2.1.3. Chargement des matériaux par rouleau électrostatique

Le contact entre deux matériaux est, en fait, suffisant pour produire un phénomène d'électrisation. Un diélectrique peut être aussi chargé avec un rouleau électrostatique en contact avec la surface libre de l'échantillon et dont le potentiel de charge est aussi contrôlé par la source haute tension.



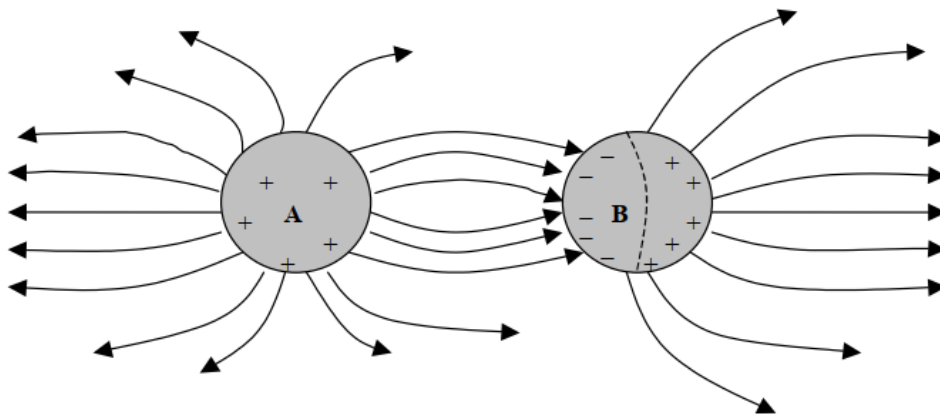
**Figure I.13:** Principe de charge par rouleau électrostatique

Le transfert de charge au contact entre le rouleau et la surface du diélectrique est très probablement de type électronique. La charge séparée résulte des différences dans la structure électronique des deux corps en contact ; elle est influencée tout d'abord par la nature des matériaux et par les traitements subis par leurs surfaces. La distribution de charge de surface déposée étant homogène à l'échelle macroscopique, ces rouleaux sont utilisés pour charger les feuilles de papier dans les imprimantes lasers [5].



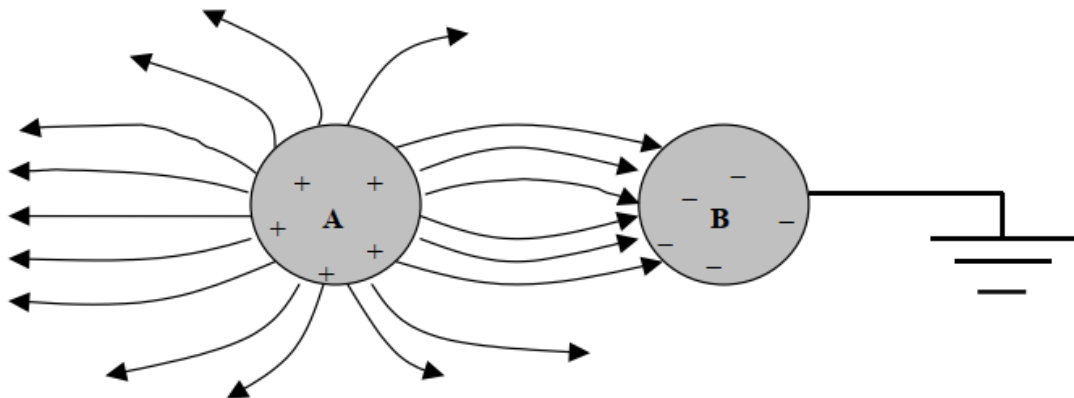
#### I.2.1.4. Chargement des matériaux par influence électrostatique (induction)

Le phénomène d'influence correspond à l'apparition de charges électrostatiques sur un corps conducteur dû à la proximité d'un corps déjà chargé, sans qu'il y ait contact entre les deux. En effet la présence du corps chargé induit un champ électrique à l'intérieur du corps influencé produisant ainsi des forces qui vont s'exercer sur les porteurs de charges libres ayant pour conséquence une redistribution de ceux-ci. La charge ainsi induite sera de signe opposé à la charge du corps influençant. En fait, en présence d'un champ électrique le matériau se polarise, une charge surfacique induite dite de polarisation apparaît alors. Comme le montre la figure I.14, il y apparaît autant de charges (+) que de charges (-).



**Figure I.14:** Influence entre deux corps (le corps B étant isolé)

A la séparation des deux zones chargées formées sur le corps influencé, il existe une ligne neutre. La région qui est la plus proche du corps influençant est chargée de signe contraire, et comme on peut le voir sur la figure, une partie des lignes de champ partant du corps influençant n'arrivent pas sur le corps influencé, de telle sorte que la charge ainsi induite sera toujours plus faible en valeur absolue que celle portée par le corps A.



**Figure I.15:** Influence entre deux corps (le corps B étant relié à la terre)

Si le corps influencé B est relié à la terre, il ne porte que des charges de signe contraire à celle du corps influençant et leur valeur absolue est toujours plus petite que celle de A [8]. Le phénomène d'influence ne modifie pas la charge totale d'un conducteur isolé, mais modifie uniquement la répartition de cette charge sur sa surface et donc son potentiel [11].

### I.3. Méthodes de mesure de la charge

La mesure des grandeurs électrostatiques occupe une place importante dans la caractérisation des matériaux diélectriques et la compréhension des phénomènes qui en résultent. Ces grandeurs fixes, ou faiblement variables dans le temps, sont souvent de faibles quantités, rendant ainsi leur mesure une opération délicate. Dans ce cas, l'instrument de mesure doit être capable de quantifier la grandeur en question sans pour autant la perturber ni être influencé par les circonstances de la mesure [1]. Cette section met l'accent sur les différentes techniques directes et indirectes de la mesure de la charge.

#### I.3.1. Seau de Faraday

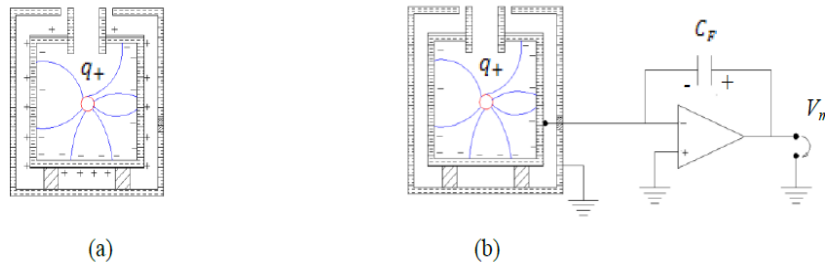
Le seau de Faraday permet la mesure directe de la charge totale des objets déplaçables et isolés de la masse, qu'ils soient conducteurs ou isolants. Cette technique est appropriée pour la mesure sur des liquides, sur des poudres dans les conduites ou sur des matériaux en pièces. Le seau de Faraday est constitué d'une enceinte conductrice dans laquelle l'objet chargé est introduit de telle sorte que tout le champ créé par la charge sur l'objet soit capturé par la surface de l'enceinte. Cette enceinte (le seau) doit être isolée par rapport à la masse et protégée contre le couplage au champ venant de l'extérieur. Pour l'isoler, le seau est placé dans une deuxième cage métallique de protection mise à la masse sans qu'il y ait une liaison entre les deux (figure.I.16.a).

En vertu du théorème de Gauss, les charges placées dans le seau créent un flux de lignes de champ à travers la surface, qui s'exprime par :

$$\oint E \cdot dS = \frac{\sum Q_i}{\epsilon} \quad (I.2)$$

Avec  $E$ : le champ électrique créé par la charge interne  $Q_i$  à travers la surface  $S$ .  $\epsilon$  étant la permittivité.

Ce théorème de Gauss montre alors que la charge totale engendre, par induction, une charge image équivalente à la charge nette interne. De ce fait, la mesure de la charge portée par le seau permet la mesure de la charge sur l'objet se trouvant dans le seau.



**Figure I.16:** Mesure de la charge à l'aide d'un seau de Faraday : (a) principe de la méthode et (b) circuit de mesure

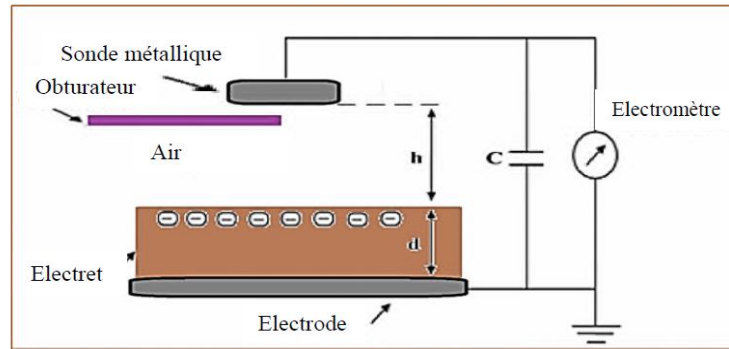
En connectant le seau à un circuit de mesure comportant une capacité  $C_f$  de valeur connue (figure.I.16. b), toute la charge portée par le seau apparaîtra sur la capacité  $C_f$ . La différence de potentiel entre le seau et la masse, mesurée à la sortie du circuit, permet la détermination de la quantité de charge à mesurer :

$$q = C_f \cdot V_m \quad (\text{I.3})$$

Pour la fiabilité des mesures, le seau de Faraday doit satisfaire deux conditions essentielles : (i) Le seau doit avoir une géométrie assurant un couplage parfait avec la charge interne. Cela implique que le seau doit être suffisamment profond et fermé (ii) Il doit être bien protégé contre le couplage avec des champs externes, moyennant un écran métallique, et bien isolé par rapport à cet écran [1].

### I.3.2. Sonde capacitive

Cette méthode est utilisée pour caractériser un électret dont une face est libre et l'autre est métallisée ou en contact avec une électrode reliée à la masse. Dans ce cas, une sonde métallique est placée en parallèle avec la surface libre du diélectrique dont l'intervalle d'air est assez large. La sonde est reliée à l'électrode à travers un condensateur électrique de capacité très élevée que celle formée par la sonde et l'électrode. La figure (I.17) illustre le principe de la sonde capacitive dont un obturateur couvre la sonde métallique du champ de l'électret.



**Figure I.17:** Principe de la sonde capacitive

Lorsque l'obturateur est retiré, la sonde est exposée au champ créé par l'électret et des charges électriques s'écoulent vers la capacité en créant à ses bornes une tension, dont la valeur est indiquée par l'électromètre. Cette tension est exprimée en fonction de la densité des charges induite au niveau de la sonde métallique  $\sigma_{\text{sup}}$ , sa surface  $S$  et la capacité  $C$  du condensateur [2]:

$$V = - \frac{S\sigma_{\text{sup}}}{C} \quad (\text{I.4})$$

Si la sonde peut être rendue assez petite, la distribution latérale de charge peut être déterminée par cette méthode de la sonde capacitive [5]. L'évaluation de la densité surfacique totale de charges  $\sigma_T$  peut être obtenue en introduisant la relation :

$$\sigma_T = - \frac{(\epsilon_r h + d)}{d} \sigma_{\text{sup}} \quad (\text{I.5})$$

Cette densité surfacique totale de charges  $\sigma_T$  peut être exprimée en fonction de la tension indiquée par l'électromètre [2].

$$\sigma_T = \frac{(\epsilon_r h + d)}{d} \frac{CV}{S} \quad (\text{I.6})$$

### I.3.3. Sonde capacitive vibrante

En 1932 Zisman introduit la sonde capacitive vibrante. La vibration de la sonde par mouvement perpendiculaire à la surface chargée entraîne la variation de la quantité de charge induite sur la sonde et ainsi la création d'un courant  $i = dQ/dt$ , dont la valeur est proportionnelle à l'amplitude et la fréquence de la vibration (Figure I.18). La valeur de la charge est ensuite obtenue par intégration du courant induit à travers des circuits appropriés.

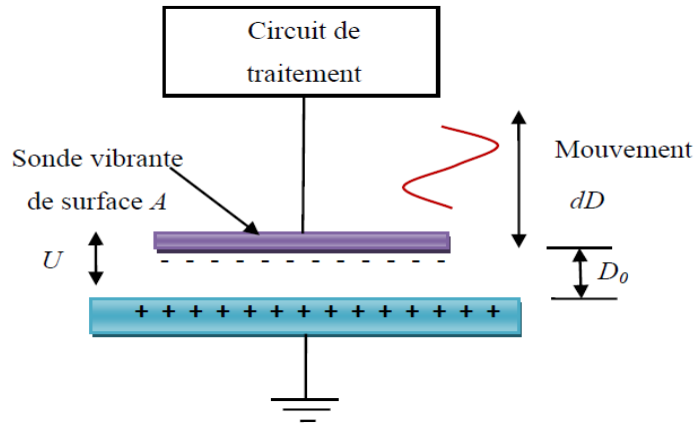


Figure I.18: Sonde capacitive vibrante

Si le mouvement de la sonde est sinusoïdal, la distance  $D$  entre la sonde et la surface de la couche est égale à :

$$D = D_0 + D_1 \sin(\omega t) \quad (\text{I.7})$$

Avec  $D_0$  la position de la sonde sans vibration et  $D_1$  amplitude de la vibration [m],  $\omega$  désigne la pulsation de la vibration.

La capacité du système sonde - couche est alors :

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{D_0 + D_1 \sin(\omega t)} \quad (\text{I.8})$$

Le courant induit, dû au mouvement, peut être déterminé par  $i = U \cdot dC / dt$  :

$$i = U \cdot \frac{d}{dt} \left( \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{D_0 + D_1 \sin(\omega t)} \right) \quad (\text{I.9})$$

$$i = -U \cdot \epsilon \epsilon_0 A \cdot \frac{D_1 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)}{[D_0 + D_1 \sin(\omega t)]^2} \quad (\text{I.10})$$

Avec  $U$  différence de potentiel entre la sonde et la couche.  $A$  surface de la sonde [1].

### I.3.4. Moulin à champ

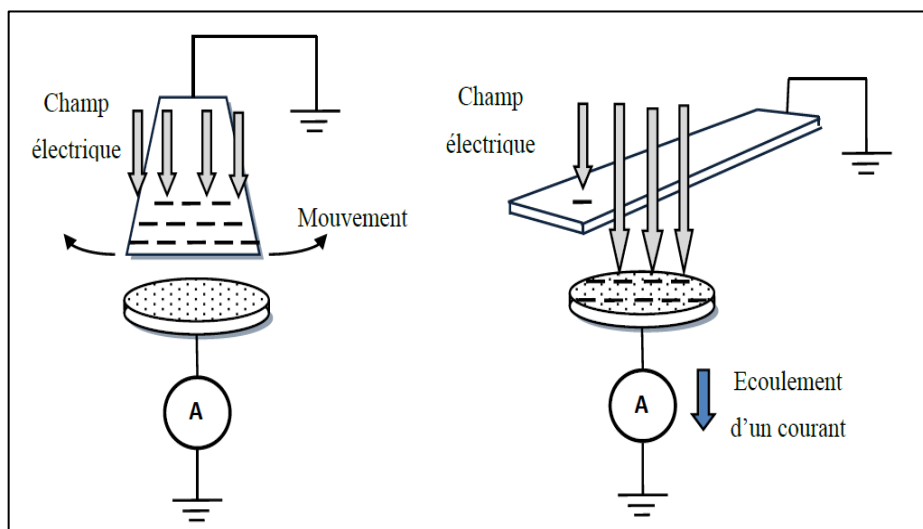
On désigne par « moulin à champ » un capteur capacitif à induction dont la variation de la capacité entre la sonde et la surface est obtenue par mouvement mécanique, généralement rotatif. La Figure I.19 montre le principe de fonctionnement d'un moulin à champ. Il est constitué de deux plaques métalliques, une mise à la masse et qui effectue le mouvement de rotation, servant comme vanne au passage du champ, et la seconde fixe, constitue l'élément

sensible, et reliée à un ampèremètre. Lorsque la plaque métallique, appelée hacheur, se met en mouvement le champ incident sur la surface sensible entraîne un courant induit :

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt}(\sigma_s A) \quad (\text{I.11})$$

Avec  $A$  la surface de l'élément sensible couverte par le champ,  $\sigma_s = \varepsilon \cdot E$  étant la densité de charge à la surface de l'élément sensible. Puisque le champ incident  $E$  est stationnaire, le courant induit est dû à la variation de la surface  $A$  [1]:

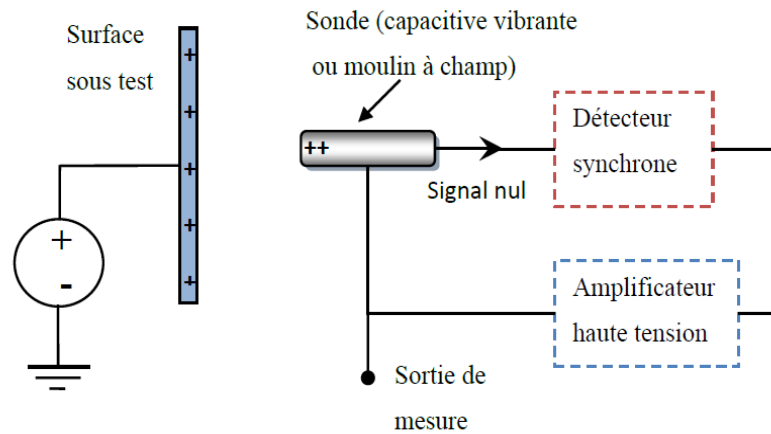
$$i = \varepsilon \cdot E \cdot \frac{dA}{dt} \quad (\text{I.12})$$



**Figure I.19:** Principe de fonctionnement du moulin à champ

### I.3.5. Voltmètre électrostatique

Le voltmètre électrostatique, nommé aussi « voltmètre sans contact », utilisant une boucle de retour d'annulation du champ, est un instrument versatile en électrostatique appliquée. Ce voltmètre a été largement utilisé pour la caractérisation des isolants chargés. Il peut être basé sur une sonde capacitive, ou sur un moulin à champ. La figure I.20 montre le principe de fonctionnement d'un voltmètre électrostatique avec système suiveur (asservi).

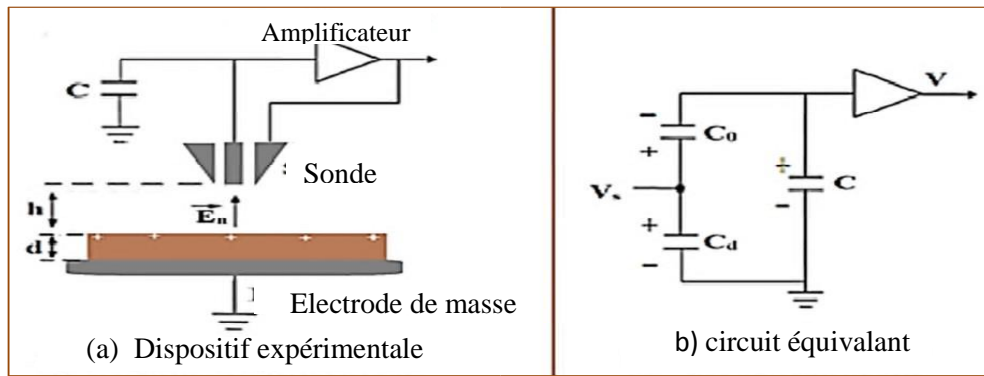


**Figure I.20:** Principe du voltmètre électrostatique

Lorsqu'une surface chargée est exposée à la sonde, qu'elle soit capacitive ou moulin à champ, cette dernière délivre un courant induit vers un circuit qui le détecte et l'amplifie. La sortie de l'amplificateur est connectée à la sonde, formant ainsi une boucle à retour négatif. Le signal fourni par la sonde est détecté, amplifié et retourné à la sonde jusqu'à son quasi annulation. L'annulation du signal implique l'égalité des tensions, de la sonde et de la surface chargée, et de ce fait le champ incident sur la sonde est nul. En conditions d'équilibre, le signal de la sonde approche zéro, l'amplificateur fournit une tension à la sonde égale à celle sur la surface chargée. Le signal est d'autant plus petit que le gain de l'amplificateur est grand. Les limites du voltmètre sont dues à la saturation de l'amplificateur haute tension [1].

### I.3.6. Sonde à induction

Lorsque la plaque sensible de la sonde à induction, présentée sur la figure (I.21), est exposée au champ électrique  $E_n$  créé par des charges proches, une charge image apparaît et qui est recueillie au niveau du condensateur ayant une capacité  $C$ . La tension aux bornes de cette capacité est amplifiée et le signal est exploité afin de déterminer soit le champ électrique, soit la charge d'un isolant.



**Figure I.21:** Modèle capacitif de la sonde à induction

- $C$  : la capacité du circuit extérieur (champ-mètre ou électromètre + câblage).
- $C_0$  : la capacité définie entre la face libre du diélectrique et la sonde.
- $C_d$  : la capacité définie entre la face libre du diélectrique et l'électrode de masse.

La relation entre le potentiel de surface  $V_s$  et la tension  $V$  mesurée à l'aide de la sonde à induction est :

$$V_s = \frac{C_0 + C}{C_0} V \quad (\text{I.13})$$

Sous la sonde, le champ électrique est supposé perpendiculaire à la surface de l'électrode détectrice et uniforme, alors :

$$E_n = \frac{|V_s + V|}{h} = \frac{C}{C_0} \frac{V}{h} \quad (\text{I.14})$$

En introduisant l'expression de la capacité  $C_0$ , définie entre la sonde et la face libre de l'isolant dont  $h$  est la distance entre eux, le champ électrique vu par la sonde sera fonction de la tension mesurée, la capacité  $C$  et la surface de l'électrode détectrice  $A$ . Par contre, ce champ dépend de l'épaisseur  $d$  du diélectrique et de la présence de l'électrode de masse à travers de la tension mesurée de  $V$ . L'expression du champ est explicitée par la relation suivante :



$$E_n = \frac{C}{\varepsilon_0 A} V \quad (\text{I.15})$$

Le numérateur de cette expression  $CV$  représente la charge totale  $Q$  vue par la sonde, et la densité de charge surfacique  $\sigma_s$  le long de la surface  $A$  de l'électrode détectrice est égale à cette charge divisée par la surface  $A$ . La condition standard à la limite, s'applique au niveau de la surface conductrice de la sonde, alors :

$$Dn = \varepsilon_0 E_n = \sigma_s \quad (\text{I.16})$$

Ceci est complètement en accord avec l'expression (I.15) du champ  $E_n$  et elle peut être retrouvée :

$$E_n = \frac{\sigma_s}{\varepsilon_0} = \frac{Q}{A} / \varepsilon_0 = \frac{CV}{\varepsilon_0 A} \quad (\text{I.17})$$

Ces résultats supposent que la distribution de la charge surfacique le long de la surface vue par la sonde est uniforme. La taille de la sonde est un facteur d'intensification du champ au niveau de sa surface, ceci peut affecter la distribution surfacique de la charge d'où nous réitérons l'importance de la géométrie de la sonde et la surface chargée du diélectrique [2].

### I.3.7. Méthode de compensation

Considérons le dispositif de la figure (I.22), d'où l'expression des tensions  $V_s$  et  $V_0$  respectivement aux bornes de l'électret et aux bornes de l'intervalle d'air est obtenue. Si l'intervalle d'air entre l'électrode supérieure et la surface libre de l'électret tend vers l'infini et en introduisant la densité surfacique totale de charges  $\sigma_T$ , telle qu'elle est définie par la relation :

$$\sigma_T = \sigma_s + \sigma_p = \sigma_r - P + \sigma_p \quad (\text{I.18})$$

Avec :  $\sigma_p$ : Est appelée la projection de  $\mathbf{p}(\mathbf{x})$  ou la densité surfacique équivalente.

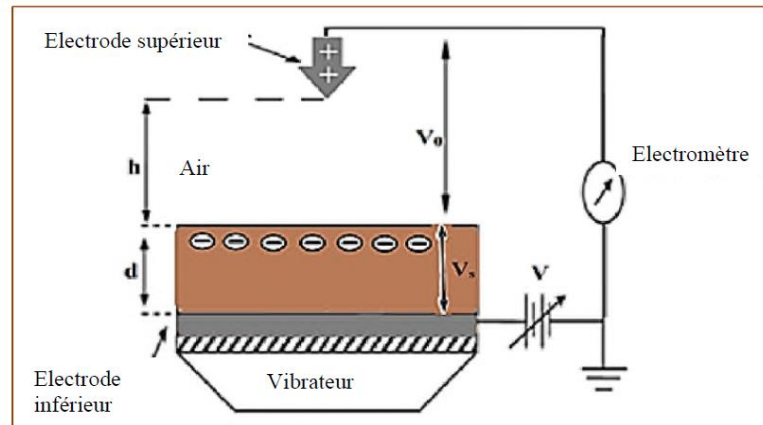
$\sigma_s$  : Densité surfacique.

Alors nous pouvons réécrire l'expression de ces tensions :

$$V_s = V_0 = \frac{\sigma_T d}{\varepsilon_r \varepsilon_0} \quad (\text{I.19})$$

La densité surfacique totale de charges en fonction de la tension aux bornes est :

$$\sigma_T = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{d} V_s \quad (\text{I.20})$$



**Figure I.22:** Principe de la méthode de compensation

Cette méthode est simple et elle ne nécessite pas la mesure de l'intervalle d'air. Pour améliorer la sensibilité du dispositif, illustré à figure (I.22), on provoque des vibrations de l'électret à l'aide d'un vibreur. Les vibrations provoqueront une variation de l'intervalle d'air et l'électromètre indiquera une composante alternative. Si la compensation de la tension  $V_0$  est effectuée avec précision, par un ajustement adéquat de la source continue, alors la composante alternative sera éliminée [2].

## I.4. Charge dans les systèmes de transport pneumatique

### I.4.1. Systèmes de transport pneumatique

Les systèmes de transport pneumatique sont des équipements permettant de conduire ou de transporter des produits d'un endroit à un autre à l'aide d'un système de propulsion ou d'aspiration pneumatique. Généralement, un système de transport pneumatique est constitué d'une pompe pneumatique, d'une certaine longueur de conduits, d'un ou de plusieurs réservoirs, d'un panneau de contrôles, etc. Selon les caractéristiques (physique ou chimique) des produits à transporter, on peut ajuster le débit ou la capacité de charge du système dans un temps déterminé pour conserver au maximum l'état original des produits. Nombreux sont les domaines d'application des systèmes de transport pneumatique [12] comme dans les domaines pharmaceutiques, chimiques, alimentaires...

Dans les installations de transport pneumatique, des solides divisés pulvérulents ou granuleux sont transportés à l'intérieur de conduites à l'aide d'un flux de gaz (le plus souvent de l'air). Les solides divisés peuvent être par exemple des produits alimentaires tels de la farine ou des légumineuses.

Les installations de transport pneumatiques se composent essentiellement d'un compresseur à air, d'une conduite et d'un séparateur de poussière (cyclone gaz). Le transport peut se faire horizontalement, verticalement et incliné. La conduite de transport peut être raccordée côté aspiration (transport par aspiration) ou côté refoulement (transport par refoulement) du compresseur.

Il existe également des installations aspirantes refoulantes mixtes. Les installations de transport refoulantes fonctionnent totalement sans poussière car la dépression dans le système empêche l'échappement d'air poussiéreux. Les installations de transport refoulantes sont capables de franchir des différences de hauteur et distance plus importantes que les installations de transport aspirantes.

Suivant la vitesse du flux d'air et sa teneur en matière solide, différents régimes de transport peuvent apparaître dans les conduites horizontales :

- **Transport en phase diluée**

Aux vitesses grandes, les particules solides en mouvement sont bien réparties sur la section de la conduite. Des particules se percutent ou percutent la paroi de la conduite.

- **Transport en traînée / cheveux d'ange**

Si la vitesse diminue pour une teneur en matière solide inchangée, l'énergie du flux ne suffit plus pour maintenir en suspension la totalité de la matière solide. Une partie des particules solides forme une traînée qui glisse sur le fond de la conduite. La partie restante des particules est transportée dans l'air au-dessus de la traînée.

- **Transport en dunes (phase dense)**

Si la vitesse est encore abaissée, les particules solides se déplacent à la manière d'une dune. Des particules franchissent le sommet de la dune et se déposent à l'abri du vent. Si la vitesse est encore réduite, les dunes peuvent donner naissance à des boules qui occupent en grande partie la section de la conduite.

- **Transport en bouchons (phase dense)**

Si la vitesse est très basse, les boules occupent toute la section de la conduite et il se forme des bouchons. Les boules et les bouchons n'avancent que très lentement. Si la pression du compresseur est insuffisante, le transport en boules et en bouchons peut rapidement conduire à l'obstruction de la conduite.

Dans les canalisations verticales, les régimes de transport possibles sont fondamentalement les mêmes mais l'influence de Régimes de transport avec les profils de vitesse la force de gravité est alors plus grande [13].

#### **I.4.2. Chargement des particules lors de leur transport pneumatique**

Le transport pneumatique est l'un des procédés industriels qui confère le plus de charge électrique aux solides divisés, cette charge reste en générale une nuisance pouvant par exemple influencer la coulabilité, créer des décharges ou même des explosions dans les conduits [14].

La charge de poudre augmente si la vitesse de l'air de transport augmente. Cependant, à une certaine vitesse, la poudre subit une charge maximale alors que pour des vitesses plus élevées, la charge diminue ensuite. La vitesse de l'air qui maximise la charge en poudre dépend du matériau du tuyau, du diamètre et de la charge en poudre [15].

A charges constantes, des effets électrostatiques plus importants ont été observés pour les petites particules par rapport aux grosses particules en raison de la densité élevée du nombre de particules et donc de l'augmentation des interactions pour les plus petites particules. Des charges plus élevées à faibles humidités relatives ont également produit des effets électrostatiques accrus [16].

#### **I.5. Conclusion**

Il existe plusieurs méthodes de chargement des matériaux granulaires isolants. Essentiellement, la triboélectricité et la décharge couronne sont les plus utilisées. Afin de mesurer la charge, il existe des méthodes directes et indirectes qui doivent traduire avec fidélité la valeur de la charge sans entrer en influence avec celle-ci.

Lors du transport pneumatique des matériaux pulvérulents, les particules peuvent avoir une charge électrique élevée. Dépendant de l'installation, les particules chargées peuvent entraîner des problèmes et nuire ainsi à toute l'installation.

## **Chapitre II**

### **Matériaux et méthodes**

## **II.1. Introduction**

Dans notre étude sur la mesure de la charge dans les canalisations de transport des matériaux pulvérulents, deux types de matériaux ont été utilisés: un produit alimentaire (le couscous) et deux types de polymères (le polyéthylène et le polystyrène). Les caractéristiques de ces matériaux sont présentées dans § (II.2).

Le but de l'étude est de mettre en évidence le phénomène de charge lors de transport pneumatique des matériaux pulvérulents et la détermination des principaux facteurs d'influence. A cet effet, une installation de taille réduite a été réalisée au laboratoire de Génie Electrique de Guelma « LGEG » afin de simuler, à petite échelle, les processus industriels.

## **II.2. Matériaux**

### **II.2.1. Matériau alimentaire**

La première série d'expérience a été effectuée sur un produit alimentaire : le couscous.

#### **II.2.1.1. Le couscous**

##### **II.2.1.1.1. Définition et origine de couscous**

Le couscous est un plat d'Afrique du Nord, d'origine berbère, populaire dans de nombreux pays. L'origine du mot couscous est moins sûre. Il vient de l'arabe classique KOUSKOUS et du berbère K'SEKSU, qui désigne à la fois la semoule de blé dur et le plat populaire dont elle est l'ingrédient de base. La fabrication traditionnelle du couscous exigeait l'emploi d'une main d'œuvre importante. Dans les traditions, c'est un groupe de femmes qui se rassemblaient et fabriquaient pendant plusieurs jours les quantités nécessaires à leur besoin annuel.

Dans l'industrie, le couscous est fabriqué avec des machines pour être vendu en grandes quantités dans les supermarchés comme toutes les autres pâtes alimentaires. La préparation industrielle du couscous est la transposition sur une vaste échelle des méthodes artisanales.

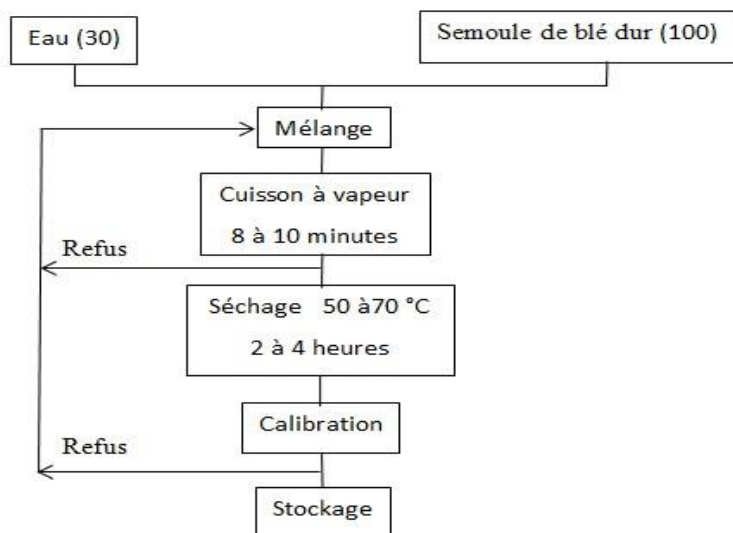
Le couscous est riche en glucides (70%) mais pauvre en protéines (13%) et en lipides (2%). Il présente aussi un large éventail de minéraux (Mg, P, K, Ca, Mn, Fer, Cu, Zn) et de vitamines (B1, B2, B3, B5, B6 et B9) [17].



**Figure II.1:** Le couscous utilisé dans les expériences

#### II.2.1.1.2. La fabrication industrielle de couscous

- La semoule de blé ou d'autres céréales est d'abord mélangée avec de l'eau puis transférée dans un « rouleur », un appareil spécifique qui permet de former les grains de couscous crues. Les grains sont calibrés au sein de ce même appareil avant d'être transportés dans le cuiseur à vapeur.
- À la sortie du cuiseur, la couche de couscous est émottée, puis les grains de couscous sont séchés dans un sécheur rotatif pour ramener son taux d'humidité à 12,5%. La température est ensuite abaissée dans un refroidisseur vibrant.
- Après refroidissement, le couscous est envoyé vers un tamiseur vibrant qui permet de sélectionner le produit en fonction de la taille. Les grains de couscous fins et moyens (les tailles les plus courantes sur le marché) sont transportés pour être stockés puis emballés [18].



**Figure II.2:** Schéma de la fabrication industrielle du couscous [17]

### II.2.1.1.3. Le conditionnement et le stockage

En Algérie, le couscous industriel est généralement emballé dans des paquets en plastique. Ce type d'emballage présente l'inconvénient de concentrer par condensation l'humidité sur les parois des sachets en plastique. Ces points de forte humidité peuvent permettre une croissance des micro-organismes présents. Il est recommandé de stocker le couscous dans des endroits secs à la température ambiante [17].

## II.2.2. Les polymères

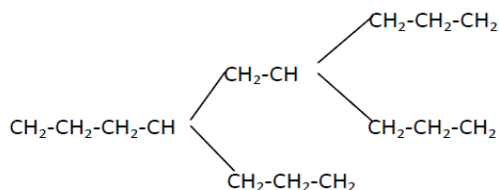
La seconde série d'expériences a été réalisée sur deux types de granulés de plastique isolants de type polyéthylène « PE » et de polystyrène « PS ».

### II.2.2.1. Polyéthylène (PE)

#### II.2.2.1.1. Définition de polyéthylène

Le polyéthylène est un polymère thermoplastique formé chimiquement par la polymérisation de l'éthylène  $C_2H_4$ . La molécule de polyéthylène se présente sous forme d'une chaîne d'atomes de carbone comme schématisé sur la figure (II.3). Les valences libres des atomes de carbone sont occupées par des atomes d'hydrogène. Cette chaîne contient de 1000 à 20000 monomères. La densité du polyéthylène à l'état amorphe est de  $0.855 \text{ g/cm}^3$  et à l'état cristallin est égale à  $1 \text{ g/cm}^3$ .





**Figure II.3:** Molécule de polyéthylène ramifiée

Cette matière plastique représente à elle seule, environ le tiers de la production totale des matières synthétiques et constitue la moitié des emballages plastiques. Le polyéthylène est translucide, inerte, facile à manier et résistant au froid. Le polyéthylène présente en général, une bonne rigidité diélectrique, il est assez inerte chimiquement, léger et se prête facilement au moulage [19].



**Figure II.4:** Le polyéthylène utilisé dans les expériences

Le tableau suivant montre les caractéristiques du polyéthylène de type haute densité (PEHD) et basse densité (PEBD) [20]:

**Tableau II.1:** Les caractéristiques de PEBD et PEHD

Les caractéristiques	PEBD	PEHD
Densité ( $\text{g cm}^{-3}$ )	0.95	0.95
Résistivité de surface ( $\text{Ohm / carré}$ )	$10^{13}$	$10^{13}$
Résistance diélectrique ( $\text{KV mm}^{-1}$ )	27	22
Résistivité volumique ( $\text{Ohm cm}$ )	$10^{15} - 10^{18}$	$10^{15} - 10^{18}$

### II.2.2.1.2. Domaine d'application du polyéthylène

Le polyéthylène est utilisé comme isolant dans les câbles à haute fréquence (coaxiaux) et les câbles à haute tension jusqu'à 200 kV. Le PEHD est également utilisé pour la fabrication d'objets plastiques rigides [19].

Le PE est utilisé aussi dans la moitié des emballages plastiques et dans les domaines les plus divers.

PEBD : produits souples : sacs, films, sachets, bidons, récipients et bouteilles souples (sauces, shampoing, crèmes...)

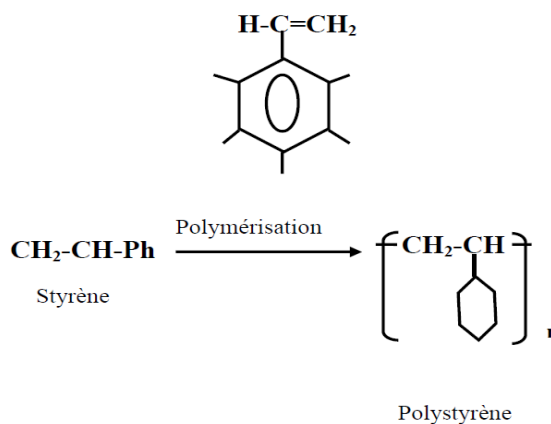
PEHD : objets rigides (bouteilles, flacons, bacs poubelles, tuyaux, jouets, ustensiles ménagers, boîtes de conservation, sacs plastiques [21].

### II.2.2.2. Polystyrène (PS)

#### II.2.2.2.1. Définition de Polystyrène

Le polystyrène (PS) a été découvert en 1930. Le polystyrène est un plastique dur, cassant et transparent. C'est un produit industriel largement diffusé, offrant de nombreux usages. On le reconnaît facilement à un blanchissement sur les zones de contraintes avant la rupture ou à sa fumée noire et à son odeur caractéristique lors de sa combustion.

Le polystyrène est un composé aromatique. Sa molécule se présente comme une molécule d'éthylène dans laquelle un atome hydrogène est remplacé par un anneau benzénique (figure II.5). La polymérisation en masse du styrène liquide à température ambiante, donne le polystyrène possédant les meilleures propriétés électriques [19].



**Figure II.5:** Polymérisation du styrène

C'est un matériau solide à 20°C et pâteux à 120°C, qui fond entre 150°C et 170°C. Il est inflammable et combustible, avec une température d'auto-inflammation d'environ 490°C. Il est également soluble dans les hydrocarbures chlorés et aromatiques [22].



**Figure II.6:** Le polystyrène utilisé dans les expériences

Le tableau suivant montre les principales caractéristiques du polystyrène [9]:

**Tableau II.2:** Propriétés physiques de PS

Propriétés physiques	PS
Température de service [ °C ]	-40 à 75
Masse volumique [ kg/m <sup>3</sup> ]	1040 - 1050
Résistivité [ Ω.m ]	10 <sup>17</sup>
Rigidité diélectrique [ kV/mm ]	40 à 100
L'absorption d'eau [ % ]	0,05 à 0,6

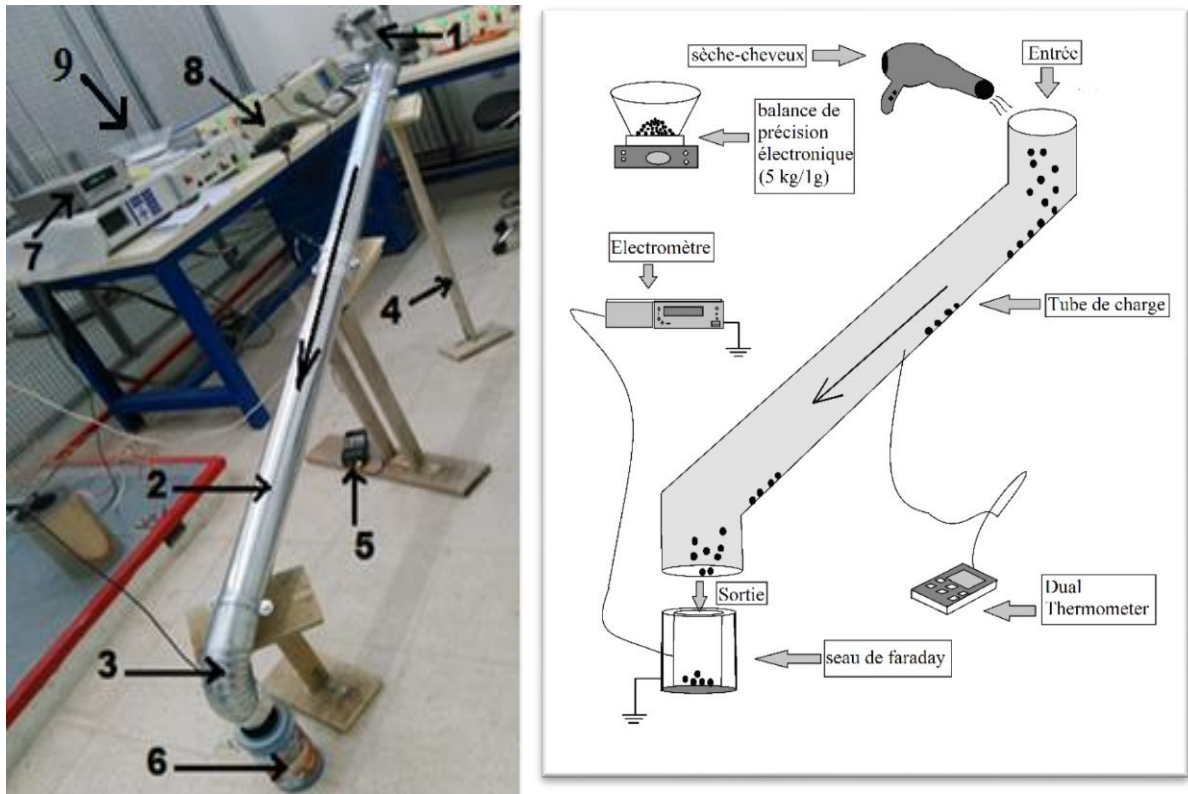
#### II.2.2.2.2. Utilisation du polystyrène

Usages variés : mobilier, emballages, jouets, verres plastiques, pots de yaourt, ...

- cristal : nombreux types de boîtes, boîtiers CD...
- ABS : produits rigides, légers et moulés (bacs à douche...)
- PSE : emballage « anti chocs », isolant thermique [21].

### II.3. Installation expérimentale du transport

Afin d'étudier le phénomène tribochargement des matériaux pulvérulents lors de passage dans les canalisations de transport, une installation à base de tubes galvanisés a été réalisée (figure II.7).



**Figure II.7:** Dispositif de chargement des matériaux pulvérulents : Photo du dispositif utilisé dans les expériences et la représentation schématique du dispositif

1 : Entrée du tube supérieur ; 2 : Tube de charge ; 3 : Sortie du tube inférieur ; 4 : Support de l'installation ; 5 : Dual Thermometer ; 6 : Seau de faraday ; 7 : Electromètre ; 8 : Sèche-cheveux ; 9 : balance de précision électronique (5 kg/1g).

La flèche : représente la direction du mouvement des particules à l'intérieur du tube.

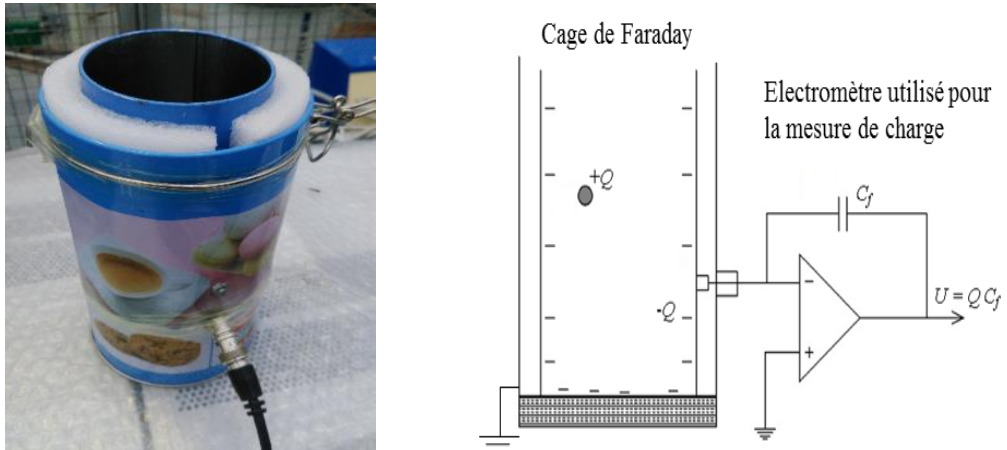
L'installation est composée d'un tube de métal de type galvanisé de 2 mètres de long et d'un diamètre de 80 mm (8 cm). Le mouvement des particules au sein de l'installation est réalisé par gravité. Ainsi, la canalisation forme une inclinaison d'un angle de  $21^\circ$  avec le sol. Le tout est supporté par des piquets en bois.

Au début, le couscous est séché par un sèche-cheveux pour réduire son humidité. Après cela, l'installation est chauffée par le sèche-cheveux et la mesure de sa température se fait directement avec un thermomètre en contact avec l'installation. Ensuite, le couscous est versé dans l'entrée du tube et glisse dans celui-ci, jusqu'à la sortie où un seau de Faraday (figure II.8) est installé afin de mesurer la charge des particules. Juste après, l'échantillon de couscous qui se trouve dans le seau de faraday est pesé par une balance électronique.

Les mêmes étapes se répètent pour les plastiques mais sans la réduction de l'humidité par le séchoir au début de l'expérience.

## II.4. Etapes de mesure

### II.4.1. Mesure de la charge



**Figure II.8:** La cage de Faraday utilisée pour mesurer la charge électrique : Photo du dispositif utilisé dans les expériences et le schéma de principe pour la mesure de la charge [9]

La mesure de la charge électrique acquise par les particules a été effectuée à l'aide d'un électromètre numérique Keithley model 6514 (Figure II.9) qui possède les caractéristiques suivantes [23]:

- Mesure de charge de 10fC à 20 $\mu$ C.
- Mesure Rapide - jusqu'à 1200 mesures/seconde.
- Interfaces facilement avec les commutateurs, les ordinateurs et les gestionnaires de composants.
- Annule les décalages de tension et courant facilement.
- Impédance d'entrée 200T $\Omega$  pour les mesures de tension.



**Figure II.9:** Electromètre Keithley model 6514

### II.4.2. Mesure de l'humidité relative

La mesure de l'humidité relative est un élément essentiel et un des principaux paramètres d'influence. Lors des expériences un Humidity/ Anemometer Meter – Lutron (AM-4205 A) (Figure II.10) a été utilisé.



**Figure II.10:** Humidity/ Anemometer Meter – Lutron (AM-4205 A)

### II.4.3. Mesure de la masse granulaire

La masse granulaire est mesurée après chaque expérience à l'aide d'une balance de précision électronique (5 kg/1g) (figure II.11) qui présente les caractéristiques suivantes [24]:

- Balance électronique 5kg/1g
- Avec affichage LCD.
- Précision 1 gramme.
- Pesée jusqu'à 5 Kg.
- Haute qualité.
- Dimensions : 16,3 x12,8 x 3,5 mm.



**Figure II.11:** Balance électronique (5 kg/1g)

#### II.4.4. Mesure de la température de l'installation

La température de l'installation est mesurée en continue durant chaque expérience avec un Dual Channel Thermometer (RS-232 computer interface) model (TM-915A) (figure II.12).



**Figure II.12:** Dual Channel Thermometer (RS-232 computer interface) model (TM-915A)

#### II.5. Conclusion

Ce chapitre présente les composants de l'installation expérimentale utilisée pour l'étude de la charge des particules dans les canalisations métalliques.

## **Chapitre III**

### **Résultats et interprétation**



### III.1. Introduction

Ce chapitre englobe les résultats de mesure de la charge des particules lors de leur déplacement dans une canalisation métallique. L'étude est portée sur les particules de couscous et les particules de polymères, essentiellement le polyéthylène et le polystyrène.

Les résultats présentés montrent essentiellement l'effet de la température de la canalisation et le séchage du couscous sur la charge acquise au cours du déplacement dans les tuyaux galvanisés.

### III.2. Mesures sur le couscous

#### III.2.1. Mesure sur des échantillons vierges

Pour pouvoir évaluer le processus de charge durant le transport dans la canalisation métallique, la charge et l'humidité ont mesurés pour des échantillons vierges directement obtenus du sac.

##### a. L'Humidité

Pour l'humidité, les valeurs suivantes ont été notées pour deux marques commerciales:

- **Couscous Amor benAmor** : Humidité directement du sac = 52.5 %, température directement du sac = 20.8 C°.
- **Couscous extra** : Humidité directement du sac = 60.5 %, température directement du sac = 21.2 C°.

##### b. La charge

On a mesuré la charge de deux marques de couscous (Amor benAmor et Extra) directement du sac, et les résultats sont donné respectivement dans les tableaux III.1 et III.2.

**Tableau III.1:** La charge de couscous Amor benAmor directement du sac

Charge (nC)	Poids (g)	Rapport (nC /g)	Moyenne (nC /g)
3.8	15	0.25	0.24
3.6	14	0.25	
3.5	15	0.23	

**Tableau III.2:** La charge de couscous extra directement du sac

Charge (nC)	Poids (g)	Rapport (nC /g)	Moyenne (nC /g)
2.24	14	0.16	0.16
4.15	24	0.17	
3.72	22	0.16	

### III.2.2. Chargement de couscous sans chauffage de l'installation

Les premiers tests ont été réalisés sur une installation soumise aux conditions ambiantes (température et humidité). L'échantillon du couscous est introduit dans la canalisation. L'humidité mesurée du couscous était 58% tandis que celle de la salle était 51.6% à température ambiante de la salle 17°C. Notons que l'installation était isolée de la terre. Le tableau III.3 montre les résultats obtenus.

**Tableau III.3:** Chargement de couscous sans chauffer l'installation

Charge (nC)	Poids (g)	Rapport (nC /g)
4.95	40	0.12

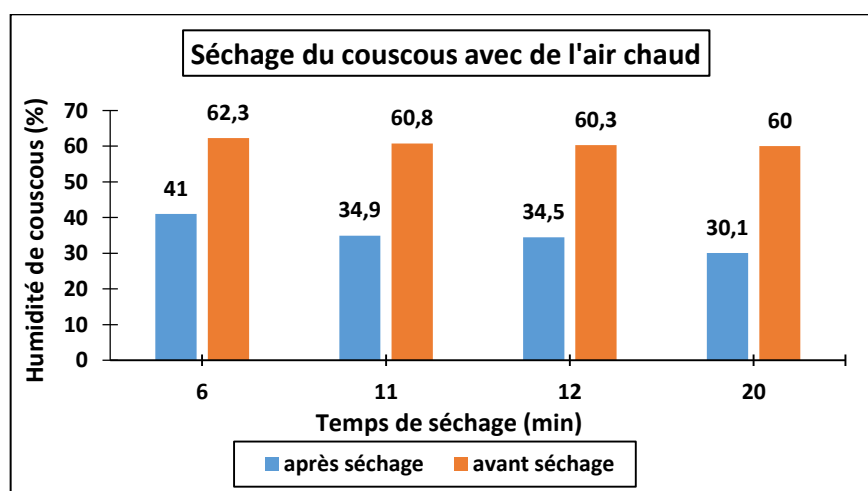
### III.2.3. Réduction d'humidité

Le tableau III.4 représente les résultats expérimentaux de la réduction de l'humidité de couscous en utilisant de l'air chaud issue d'un sèche-cheveux. Dans cette manipulation le couscous a été chauffé à plusieurs durées où à chaque fois l'humidité est mesurée. Le tableau III.4 et la figure III.1 montrent la variation de l'humidité avec le temps de séchage.

**Tableau III.4:** Humidité de couscous réduit par un séchoir

Le poids (g)	40	40	40	40
Humidité de la salle (%)	41.4	39.6	36.4	44.5
Température de la salle (C°)	19.7	20.8	22.4	19.9
Humidité de couscous avant	62.3	60.8	60.3	60

séchage (%)				
Température de couscous avant séchage (C°)	19.3	19.9	20.3	19.7
Le temps de sécher le couscous (min)	6	11	12	20
Humidité de couscous après séchage (%)	41	34.9	34.5	30.1
Température de couscous après séchage (C°)	33.1	34.3	34.8	31



**Figure III.1:** Variation d'humidité de couscous en fonction du temps de séchage

La figure III.1 représente la variation d'humidité de couscous avant et après séchage en fonction de temps d'application de l'air chaud.

### III.2.4. Chargement de couscous avec l'installation chauffée

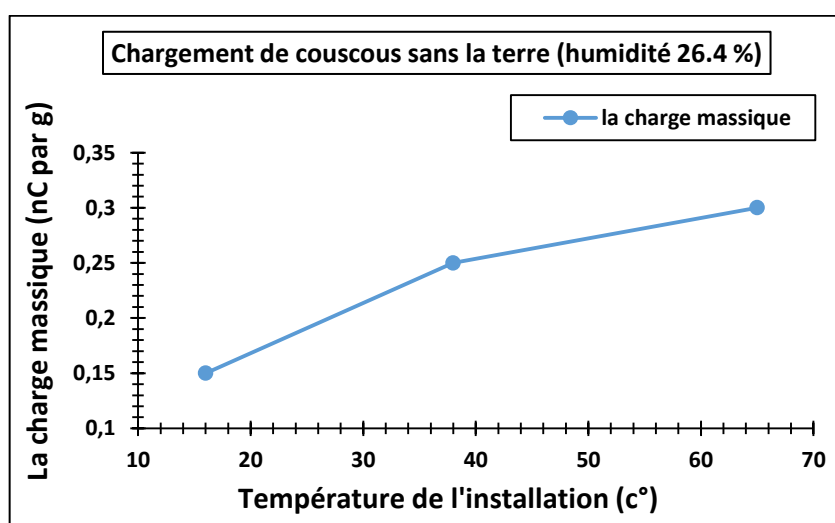
#### III.2.4.1. Influence de la température de canalisation sur la charge

##### a. Influence de la température de l'installation (RH=26.4%)

Le tableau III.5 montre les résultats de la charge pour trois températures de l'installation, essais répétés trois fois. Durant ces mesures l'humidité du couscous était 26.4 %. On a gardé le même poids de couscous pour voir l'effet de la température de l'installation sur la charge de couscous. L'installation était sans mise à la terre.

**Tableau III.5:** Chargement de couscous avec poids fixe (28 g)

Température(C°)	Charge (nC)	Poids(g)	Rapport (nC /g)	Moyenne (nC /g)
T=16	3.62	28	0.12	0.15
T=16	4.77	28	0.17	
T=16	5.04	28	0.18	
T=38	6.96	28	0.24	0.25
T=38	7.28	28	0.26	
T=38	7.73	28	0.27	
T=65	8.14	28	0.29	0.3
T=65	8.14	28	0.29	
T=65	9.02	28	0.32	

**Figure III.2:** Variation de la charge massique de couscous en fonction de la température de l'installation: avec poids fixe

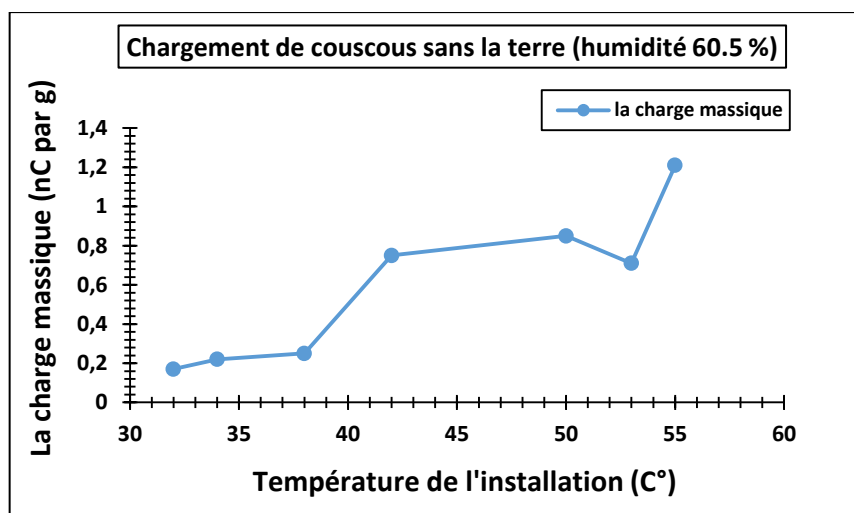
La figure III.2 montre la variation de la charge massique de couscous en fonction de la température de l'installation. Selon la figure, la charge massique augmente lorsqu'on augmente la température de l'installation. Cela implique alors que le processus de charge est dépendant de la température. Plus celle-ci est grande plus la charge devient plus ou moins importante.

#### **b. Influence de la température de l'installation (RH=60.5%)**

Le tableau III.6 et la figure III.3 montrent les résultats obtenus du chargement de couscous pour plusieurs températures de l'installation. L'humidité du couscous directement du sac = 60.5 %. L'installation est toujours sans la terre.

**Tableau III.6:** Chargement de couscous pour plusieurs températures

Température (C°)	Charge(nC)	Poids(g)	Rapport(nC / g)	Moyenne(nC / g)
T=32	3.4	20	0.17	0.17
T=34	4.5	20	0.22	0.22
T=38	5	20	0.25	0.25
T=42	18.8	25	0.75	0.75
T=50	8	7	1.14	0.85
T=50	8	7	1.14	
T=50	7.5	13	0.57	
T=50	4.5	8	0.56	
T=53	8.8	19	0.46	0.71
T=53	14.7	17	0.86	
T=53	8.2	10	0.82	
T=55	6.7	5	1.34	1.21
T=55	10.4	9	1.15	
T=55	5.7	5	1.14	

**Figure III.3:** Variation de la charge massique de couscous en fonction de la température de l'installation

D'après les résultats obtenus on remarque que la charge massique augmente avec l'augmentation de la température de l'installation. Cependant, l'augmentation du niveau de charge avec l'augmentation de la température de l'installation n'est pas régulière en raison, peut-être, de changements d'humidité ou de la température de la salle pendant les manipulations.

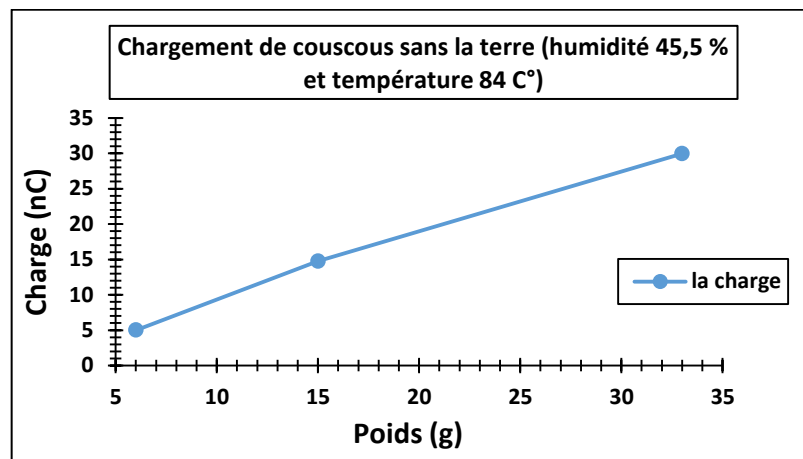
### III.2.4.2. Influence du poids du couscous sur la charge

#### a. Influence de la quantité du couscous (RH= 45.5 %, T = 84 C°)

Le tableau III.7 montre les résultats de la variation de la charge de couscous en fonction du poids. La température de l'installation est fixe pendant les trois essais (T = 84 C°), l'humidité de couscous RH= 45.5 %. L'installation est toujours utilisée sans la mise à la terre.

**Tableau III.7:** Chargement de couscous pour T = 84 C°

Température (C°)	Charge(nC)	Poids(g)	Rapport(nC / g)	Moyenne (nC / g)
T=84	29.95	33	0.90	0.90
T=84	14.75	15	0.98	
T=84	5	6	0.83	



**Figure III.4:** Variation de la charge de couscous en fonction du poids pour T = 84 C°

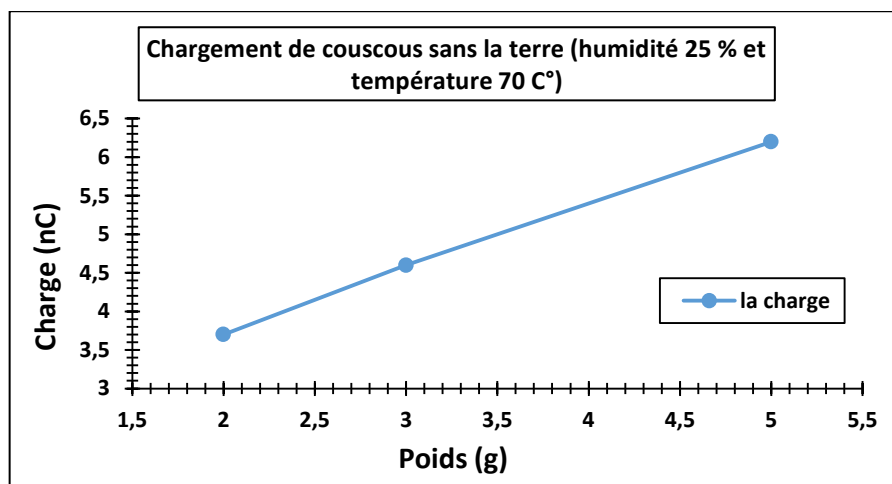
La figure III.4 présente la variation de la charge de couscous en fonction du poids. On remarque d'après la courbe que la charge de couscous augmente avec l'augmentation du poids, autrement dit, la quantité du couscous.

#### b. Influence de la quantité du couscous (RH= 25 %, T = 70 C°)

Le tableau III.8 montre les résultats expérimentaux de la variation de la charge de couscous en fonction du poids. La température de l'installation est fixe pendant les trois essais (T = 70 C°), l'humidité de couscous RH= 25 % pour le cas sans la mise à la terre. Ces essais ont été réalisés pour montrer la variation de la charge avec l'augmentation du poids.

**Tableau III.8:** Chargement de couscous pour T = 70 C°

Température (C°)	Charge(nC)	Poids(g)	Rapport(nC / g)	Moyenne (nC / g)
T=70	6.2	5	1.24	1.54
T=70	4.6	3	1.53	
T=70	3.7	2	1.85	

**Figure III.5:** Variation de la charge de couscous en fonction du poids pour T = 70 C°

La figure III.5 montre les changements de la charge de couscous en fonction du poids. D'après la figure on remarque que la charge de couscous augmente lorsque on augmente le poids du couscous.

### III.2.4.3. Influence de la mise à la terre de la canalisation

Le tableau III.9 donne les résultats de chargement du couscous pour trois températures de l'installation avec trois essais pour chaque température. Dans ce cas, l'installation est sans la mise à la terre.

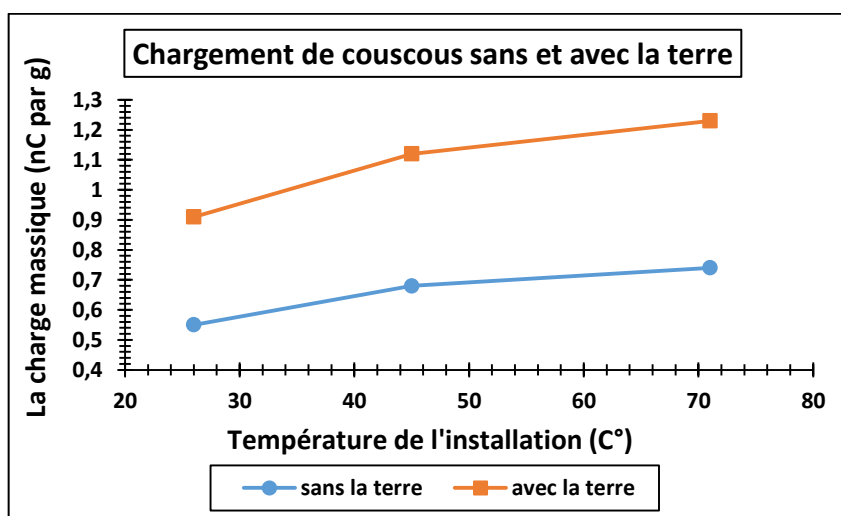
**Tableau III.9:** Chargement de couscous sans la terre

Température(C°)	Charge (nC)	Poids (g)	Rapport (nC / g)	Moyenne (nC / g)
T=26	8.22	19	0.43	0.55
T=26	9.6	19	0.50	
T=26	13.1	18	0.72	
T=45	12.9	18	0.71	0.68
T=45	10.00	17	0.58	
T=45	13.07	17	0.76	
T=71	17.1	21	0.81	0.74
T=71	17.3	21	0.82	
T=71	11.9	20	0.59	

Pour comparer les résultats du tableau précédent (tableau III.9) nous avons chargé le couscous dans les mêmes conditions ambiantes que précédemment, ainsi que les mêmes températures de l'installation, mais cette fois-ci l'installation est reliée à la terre. Les résultats du chargement de couscous (avec la terre) sont montrés dans le tableau III.10.

**Tableau III.10:** Chargement de couscous avec la terre

Température(C°)	Charge (nC)	Poids (g)	Rapport (nC / g)	Moyenne (nC / g)
T=26	17.5	19	0.92	0.91
T=26	17.12	19	0.90	
T=26	16.48	18	0.91	
T=45	19.4	18	1.07	1.12
T=45	20.46	17	1.20	
T=45	19.00	17	1.11	
T=71	22.83	18	1.26	1.23
T=71	20.96	17	1.23	
T=71	19.22	16	1.20	



**Figure III.6:** Variation de la charge massique de couscous en fonction de la température de l'installation: sans et avec la terre

La figure III.6 présente la variation de la charge massique de couscous en fonction de la température de l'installation avec et sans la mise à la terre. Quelque soit la situation, avec ou sans la mise à la terre, la charge augmente avec la température de l'installation. Cependant, la charge pour le cas d'une installation mise à la terre est supérieure à celle avec installation sans la mise à la terre, ce qui est un peu surprenant.



### III.3. Mesures sur les polymères

#### III.3.1. Chargement du polyéthylène

Au début, la température et l'humidité du polyéthylène (PE) des échantillons vierges sont mesurées: l'humidité RH= 35.8 % et la température T= 22.1 C°. La charge des échantillons vierges a été aussi mesurée, les résultats sont montrés sur le tableau III.11.

**Tableau III.11:** La charge de polyéthylène directement du sac

Charge (nC)	Poids (g)	Rapport (nC / g)	Moyenne (nC / g)
- 16.00	43	- 0.37	- 0.39
- 6.4	21	- 0.30	
- 4.00	8	- 0.5	

Le tableau III.12 donne les résultats de chargement de polyéthylène (PE) par frottement avec les parois du dispositif de chargement. Le tableau montre les résultats de trois températures différentes de l'installation. Ces essais ont été répétés trois fois pour une confirmation des résultats. Le tableau présente aussi la moyenne de ces essais. Dans ce cas l'installation est sans la mise à la terre.

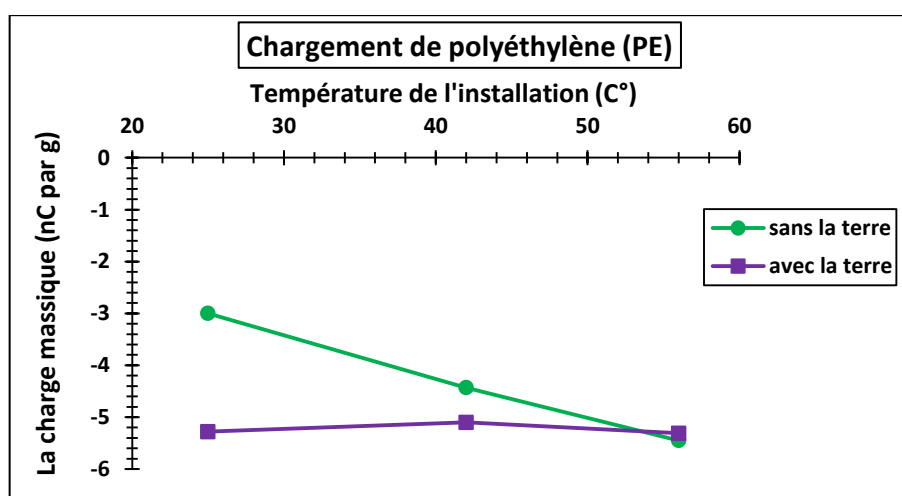
**Tableau III.12:** Chargement de polyéthylène (sans la terre)

Température (C°)	Charge(nC)	Poids(g)	Rapport(nC / g)	Moyenne (nC / g)
T=25	- 86.73	43	- 2.01	- 3
T=25	- 113.30	40	- 2.83	
T=25	- 145.88	35	- 4.16	
T=42	- 141.18	31	- 4.55	- 4.43
T=42	- 127.45	27	- 4.72	
T=42	- 97.17	24	- 4.04	
T=56	- 152.09	28	- 5.43	- 5.45
T=56	- 100.36	19	- 5.28	
T=56	- 96.24	17	- 5.66	

Pour comparer les résultats du tableau précédent (tableau III.12) nous avons chargé le polyéthylène dans les mêmes conditions ambiantes que la manipulation précédente, ainsi que les mêmes températures de l'installation, sauf que cette fois ci la canalisation est mise à la terre. Les résultats de chargement de polyéthylène (avec la terre) sont représentés dans le tableau III.13.

**Tableau III.13:** Chargement de polyéthylène (avec la terre)

Température (C°)	Charge(nC)	Poids(g)	Rapport(nC / g)	Moyenne (nC / g)
T=25	- 136.73	31	- 4.41	- 5.28
T=25	- 124.19	21	- 5.91	
T=25	- 105.00	19	- 5.52	
T=42	- 105.50	17	- 6.20	- 5.10
T=42	- 99.63	16	- 6.22	
T=42	- 40.63	14	- 2.90	
T=56	- 96.68	19	- 5.08	- 5.31
T=56	- 86.86	17	- 5.10	
T=56	- 86.43	15	- 5.76	

**Figure III.7:** Variation de la charge massique de polyéthylène en fonction de la température de l'installation

La figure III.7 présente la variation de la charge massique du polyéthylène en fonction de la température de l'installation. D'après les résultats obtenus de chargement de polyéthylène on constate que le PE est chargé négativement. La charge massique du polyéthylène issu d'une installation sans la terre augmente avec l'augmentation de la température de l'installation. Par contre la charge massique de polyéthylène lorsqu'on l'installation est reliée à la terre reste presque constante pour les trois valeurs de la température de l'installation. On voit que la charge massique du polyéthylène lorsque on travaille avec la terre est supérieure que sans la terre pour les deux premières températures de l'installation (25 C° et 42 C°) ensuite les deux charges massiques se rapprochent pour 56 C°.

### III.3.2. Chargement du polystyrène

Au début, la température et l'humidité du polystyrène (PS) vierge sont mesurées: l'humidité RH= 34.7 % et la température T= 22.1 C°. De même, la charge des échantillons vierge est mesurée, les résultats sont montrés par le tableau III.14.

**Tableau III.14:** La charge de polystyrène directement du sac

Charge (nC)	Poids (g)	Rapport (nC / g)	Moyenne (nC / g)
- 42.33	56	- 0.75	- 0.75
- 11.57	15	- 0.77	
- 10.38	14	- 0.74	

Le tableau III.15 montre les résultats de chargement de polystyrène (PS) par frottement avec les parois du dispositif de chargement. Le tableau représente les résultats de trois températures différentes de l'installation. L'installation était sans la terre dans ce cas.

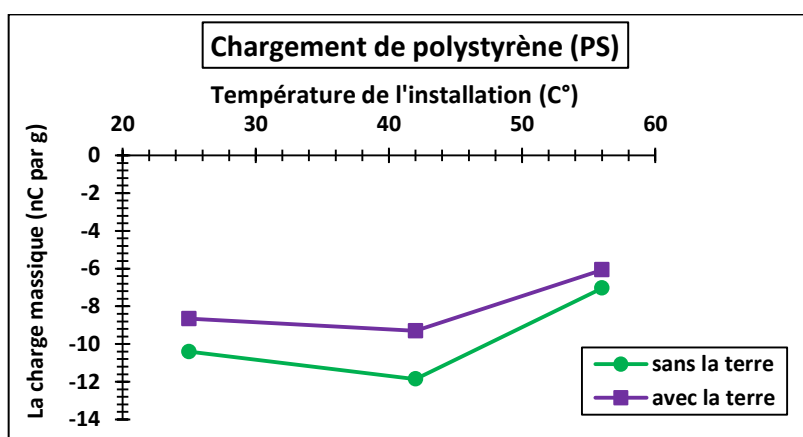
**Tableau III.15:** Chargement de polystyrène (sans la terre)

Température (C°)	Charge (nC)	Poids (g)	Rapport (nC / g)	Moyenne (nC / g)
T=25	- 182.12	18	- 10.11	- 10.41
T=25	- 183.00	18	- 10.16	
T=25	- 186.60	17	- 10.97	
T=42	- 173.8	16	- 10.86	- 11.86
T=42	- 164.6	14	- 11.75	
T=42	- 168.75	13	- 12.98	
T=56	- 101.82	17	- 5.98	- 7.04
T=56	- 116.1	16	- 7.25	
T=56	- 118.70	15	- 7.91	

Pour comparer les résultats du tableau précédent (tableau III.15) nous avons chargé le polystyrène dans les mêmes conditions ambiantes que les tests précédents, ainsi que les mêmes températures de l'installation, mais cette fois ci on a ajouté la terre. Les résultats de chargement de polystyrène (avec la terre) sont représentés dans le tableau III.16.

**Tableau III.16:** Chargement de polystyrène (avec la terre)

Température (C°)	Charge (nC)	Poids (g)	Rapport (nC / g)	Moyenne (nC / g)
T=25	- 152.17	18	- 8.45	- 8.66
T=25	- 143.40	17	- 8.43	
T=25	- 136.71	15	- 9.11	
T=42	- 125.70	14	- 8.97	- 9.30
T=42	- 111.33	12	- 9.27	
T=42	- 106.50	11	- 9.68	
T=56	- 251.8	39	- 6.45	- 6.07
T=56	- 110.96	19	- 5.84	
T=56	- 94.97	16	- 5.93	

**Figure III.8:** Variation de la charge massique de polystyrène en fonction de la température de l'installation

La figure III.8 montre la variation de la charge massique de polystyrène en fonction de la température de l'installation. Selon les résultats de chargement de polystyrène on constate que le PS est chargé négativement. Les valeurs de la charge massique du PS dans les deux cas (sans et avec la terre) varie suivant la température. La charge du PS augmente jusqu'à 42°C puis diminue au-delà. Ces changements ne sont pas réguliers à cause des changements de quelques conditions ambiantes pendant les manipules. On constate cependant que la charge massique du polystyrène est moins importante avec la terre. Elle légèrement supérieure lorsque l'installation est sans la mise à la terre.

### III.3.3. Comparaison entre la charge massique du polyéthylène et polystyrène

On a comparé la charge massique de polyéthylène et polystyrène dans les deux cas (sans et avec la terre). Les résultats sont illustrés par la figure III.9.

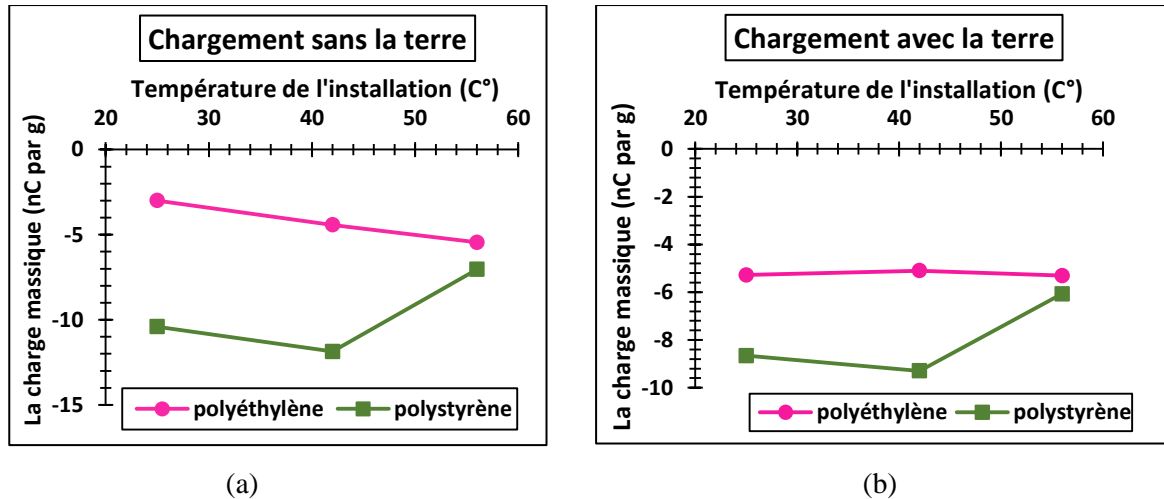


Figure III.9: Chargement de polyéthylène et polystyrène sans et avec la terre

La figure III.9 (a) montre la charge massique de polyéthylène et de polystyrène (sans la terre) en fonction de la température de l'installation. D'après les deux courbes on remarque que la charge massique de polystyrène est supérieure que la charge massique de polyéthylène dans le cas où l'installation est sans la mise à la terre.

La figure III.9 (b) représente la charge massique de polystyrène et de polyéthylène (avec la terre) en fonction de la température de l'installation. Selon les deux courbes on observe que la charge massique de polyéthylène est inférieure que la charge massique de polystyrène dans le cas où la canalisation est reliée à la terre. Selon la Figure III.9, On constate que le polyéthylène se charge moins que le polystyrène et ce dans les deux cas (sans et avec la terre).

### III.4. Conclusions

D'après tous les résultats obtenus lors du chargement de couscous, de polyéthylène (PE) et de polystyrène (PS), nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Le couscous était chargé positivement déjà de l'usine.
- Lors du passage du couscous dans la canalisation métallique sa charge reste positive mais change avec la température de l'installation et l'humidité du couscous lui-même.

-D'autre part, les plastiques (PE et PS) se chargent négativement, avec un niveau de charge qui dépasse de loin le cas du couscous.

-Le polystyrène se charge plus que le polyéthylène dans les deux cas (sans et avec la terre).

-La mise à la terre de l'installation ne réduit pas nécessairement la charge acquise par les matériaux transportés. La charge avec la mise à la terre peut même être supérieure au cas sans la terre.

## **Conclusion générale**

Le travail entrepris dans le cadre de ce mémoire avait pour objectif la mise en évidence du phénomène de charge des matériaux pulvérulents dans les canalisations métalliques lors du transport pneumatique dans les différents processus industriels. Principalement, l'étude s'est basée sur le couscous et les matériaux plastiques (polyéthylène et polyester).

Les résultats montrent que même dans une installation à l'échelle du laboratoire, les matériaux étudiés ont pu acquérir de la charge lors de leur passage dans les canalisations métalliques. La valeur de la charge dépend de la température et de l'humidité mais aussi de la quantité de la matière. Les polymères se chargent nettement plus que le couscous, du fait de leur caractère isolant. L'utilisation de la mise à la terre pour l'installation ne réduit pas nécessairement la charge des matériaux transportés. La charge sans mise à la terre peut être inférieure à la charge si la mise à la terre est utilisée.

## Bibliographie

- [1] KACHI Miloud, “ Caractérisation et contrôle de l'état de charge des matériaux polymères granulaires”, Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2011.
- [2] KETIR Amar, MAY Bouzid, “ Paramètres influent sur le dépôt de charge électrique par effet couronne sur une surface d'un diélectrique”, Mémoire de Master, Université de Bejaïa, 2015.
- [3] BEKAKRIA Adel, DENNOUN Mohamed Ridha, “ Dépôt de charges électriques sur des films en polymère par la décharge couronne bipolaire”, Mémoire de Master, Université de Bejaïa, 2017.
- [4] BACHA Mohand Arezki, “ Etude de la décharge couronne en géométrie fil - plan”, Mémoire de Master, Université de Bejaia.
- [5] SADOUD Hamou, “ Dépôt de charges électriques sur la surface d'un diélectrique fibreux”, Mémoire de Master, Université de Bejaia, 2015.
- [6] “Triboélectricité”, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Tribo%C3%A9lectricit%C3%A9>
- [7] “Électrisation par frottement: triboélectricité”,  
<http://scientificsentence.net/Equations/Electricite/index.php?key=yes&Integer=triboelectricite>
- [8] HAMMI Tarik, “ Etude de méthodes de mesures et réalisation d'un banc de test pour l'évaluation des propriétés électrostatiques des textiles”, Thèse de Doctorat, Université de Lille, Avril 2005.
- [9] MESSAL Sara, “ Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie agro-alimentaire”, Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, Décembre 2016.
- [10] REZOUG Mohammed, “ Contribution à l'étude de la neutralisation des charges électriques dans les particules isolantes”, Thèse de Doctorat, Université de Sidi-Bel-Abbès, 2015.
- [11] FASSI Farida, “ Les conducteurs - Influence électrostatique et condensateurs”, Notes de cours SVT\_S2, Faculté des Sciences de Rabat, Maroc, 2018.
- [12] “Systèmes de transport pneumatique”, <https://www.hellopro.fr/systemes-de-transport-pneumatique-1001268-fr-1-feuille.html>
- [13] “Connaissances de base en Transport Pneumatique”,  
[https://www.gunt.de/images/download/fluidised-beds\\_pneumatic-transport\\_french.pdf](https://www.gunt.de/images/download/fluidised-beds_pneumatic-transport_french.pdf)



- [14] Saleh K., Traoré A. N., Aghili A. and Guigon P., “Modélisation des phénomènes triboélectriques lors du transport pneumatique des poudres” 7<sup>th</sup> Conference of the French Society of Electrostatics SFE, Montpellier, France, 2010.
- [15] Schwindt N., von Pidoll U., Markus D., Klausmeyer U., Papalexandris M. V. and Grosshans H., “Measurement of electrostatic charging during pneumatic conveying of powders” Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017.
- [16] Smeltzer E. E., Weaver M. and Klinzing G. E., “Individual Electrostatic Particle Interaction in Pneumatic Transport” Powder Technology - powder technol, 1982.
- [17] LOUAFI Samra, KHEDIM Houriya, “ Diagnostique et caractéristique physico-chimique et microbiologique du couscous industriel”, Mémoire de Master, Université de Mostaganem, Juin 2016.
- [18] “Comment le couscous est-il fabriqué ?”, <https://www.clextral.com/fr/technologies-and-lignes/food-production-line-a-traduire/automated-couscous-production-lines/>
- [19] SAAD Djedjiga, “ Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques”, Mémoire de Magister, Université de Tizi-Ouzou, Décembre 2011.
- [20] “Caractéristiques de PEBD et PEHD”,  
<http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/1077/15/Annexe.pdf>
- [21] “Caractéristiques et usage des thermoplastiques”,  
<http://www.septiemecontinent.com/pedagogie/wp-content/uploads/2014/11/Familles-de-plastiques-et-usages.pdf>
- [22] “Présentation des caractéristiques de polystyrène”,  
<https://www.gralon.net/articles/materiel-et-consommables/materiels-industriels/article-le-polystyrene---caracteristiques-et-applications-1383.htm>
- [23] FEKIR Djamel Eddine, “ Chargement triboélectrique et séparation électrostatique pour deux types de mélange granulaire binaire isolants de taille fine et ceux de grosse taille”, Thèse de Doctorat, Université de Sidi-Bel-Abbès, 2017.
- [24] “Balance de précision électronique 1 gr. 5000 gr. 5kg Garantie 1 an”,  
<http://lescolisnoirs.fr/cuisine/161-balance-de-precision-electronique-1-gr-5000-gr-5kg-garantie-1-an-balance-electronique-5kg-1gbalance-de-cuisine-electroniqueavec--7426103461402.html>