

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES



Faculté de Génie électrique
Département d'Électrotechnique

Thèse présentée par :

MAHI Imene Nassima

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat LMD

Option : Haute tension

Intitulé de la thèse :

*Utilisation de l'instrument virtuel dans des
dispositifs électrostatiques*

Présentée devant le jury composé de :

Dr. MILOUA Farid	MCA	(U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Président
Dr. HAMMADI Nacera	MCA	(U.S.T.M.B. Oran)	Encadreur
Pr. TILMATINE Amar	Professeur	(U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Co-Encadreur
Dr. ZELMAT Mohamed Elmouloud	MCA	(U.S.T.M.B. Oran)	Examineur
Dr. MILOUDI Mohamed	MCA	(U.D.L. Sidi Bel-Abbès)	Examineur

Soutenue en 2018



Laboratoire de recherche APELEC (Application of Plasma, Electrostatics & Electromagnetic Compatibility)



REMERCIEMENTS

A l'issue de la rédaction de cette recherche, je suis convaincue que la thèse est loin d'être un travail solitaire. En effet, je n'aurais jamais pu réaliser ce travail doctoral sans le soutien de mes parents, mes frères et sœurs ainsi que ma meilleure amie MESSAFEUR Radjaa dont la générosité, la bonne humeur et l'intérêt manifestés à l'égard de ma recherche m'ont permis de progresser dans cette phase délicate de « *l'apprenti-chercheur* ».

Je tiens à remercier vivement le Docteur HAMMADI Nacera, Maître conférence classe A à l'université d'Oran, pour la confiance qu'elle m'a témoignée en acceptant la direction scientifique de mes travaux. Je lui suis reconnaissante de m'avoir fait bénéficier tout au long de ce travail de sa grande compétence, de sa rigueur intellectuelle, de son dynamisme, et de son efficacité certaine que je n'oublierai jamais. Soyez assurée de mon attachement et de ma profonde gratitude.

Et je remercie mon co-encadreur, le Professeur TILMATINE Amar, pour la confiance qu'il m'a accordée, pour ses multiples conseils et pour toutes les heures qu'il a consacrées à codiriger cette recherche. J'aimerais également lui dire à quel point j'ai apprécié sa grande disponibilité et son respect sans faille. Enfin, j'ai été extrêmement sensible à ses qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail doctoral.

Je suis très honoré à remercier de la présence à mon jury de thèse et je tiens à remercier :

Monsieur MILOUA Farid, Maître conférence classe A, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'être le président de mon jury de thèse. Je tiens à l'assurer de ma profonde reconnaissance pour l'intérêt qu'il porte à ce travail.

Monsieur OUIDDIR Rabah, Professeur à l'université d'Oran, pour l'honneur qu'il m'a fait pour sa participation à mon jury de thèse, pour le temps consacré à la lecture de cette thèse.

Monsieur MILOUDI Mohamed, Maître conférence classe A, pour sa participation à mon jury de thèse et pour toutes remarques intéressantes qu'il m'a faites.

Monsieur ZELMAT Mohamed Elmouloud, Maître conférence classe A à l'université d'Oran, d'avoir accepté de faire partie du jury de cette thèse. Je le remercie pour le temps

consacré à la lecture de ce travail ainsi que pour les commentaires m'ayant permis de l'améliorer.

Bien sûr, atteindre ces objectifs n'aurait pas été possible sans l'aide de mon amie, membre du laboratoire APELEC qui a participé au projet. Je souhaite notamment remercier Mr HALLOUCH Omar pour sa présence et son aide.

Je désire en outre remercier tous les membres du laboratoire APELEC et IRECOM (incluant ceux précédemment cités) pour leur sympathie, leur amitié. J'ai eu beaucoup de plaisir à travailler avec eux.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

Table des matières	
Introduction générale	1
CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART	
Introduction	4
PARTIE 1. TRANSPORT PNEUMATIQUE	5
I.1.1. Flexibilité du système	5
I.1.2. L'industrie et les matériaux	6
I.1.3. Le transport pneumatique et ses avantages	7
I.1.4. Facteurs influençant la fluidité	8
I.1.5. Forces aérodynamiques et électrostatiques	9
I.1.6. Phénomènes électrostatiques dans le transport pneumatique	13
PARTIE 2. LES ONDES MOBILES ET LA DIELECTROPHORESE	17
I.2.1. Les ondes mobiles	19
I.2.2. Diélectrophorèse	19
I.2.3. Théorie de la diélectrophorèse	19
I.2.4. Applications de la diélectrophorèse	28
Conclusion	28
CHAPITRE II : INSTRUMENTATION VIRTUELLE	
Introduction	30
II.1. Instrumentation virtuelle	30
II.1.1. Définition de l'instrumentation virtuelle	30
II.1.2. Avantages de l'instrumentation virtuelle	31
II.1.3. L'instrumentation virtuelle et le transfert des connaissances	32
II.1.4. Démarche heuristique et interactivité	32
II.2. logiciel LABVIEW	32
II.2.1. Création d'un VI	33
II.2.2. Création d'un sous-VI	35
II.2.3. Boucles	37
II.2.4. Tableaux, graphes et clusters	39
II.2.5. Structures de choix et séquences	41
II.2.6. Chaînes et entrées/sorties sur fichier	42
II.3. Cartes utilisées avec dispositifs	42
II.3.1. Carte GPIB (General Purpose Interface Bus)	43
II.3.2. Port USB RS232	43
II.3.3. Electromètre Keithley 6514	44
II.3.4. Balance OHAUS AX423	45
II.3.5. Balance GM-500	46

II.4. Programmes de LABVIEW utilisés dans les dispositifs	46
II.4.1. Programme développé pour le dispositif du transport pneumatique	47
II.4.2. Programme développé pour le dispositif des ondes mobiles	49
Conclusion	54

CHAPITRE III : ÉTUDE DU MOUVEMENT DES PARTICULES DANS UN CONVOYEUR À ONDES MOBILES

Introduction	55
III.1. Convoyeurs à ondes mobiles	55
III.2. Conception des convoyeurs à ondes mobiles	56
III.3. Convoyeurs utilisés	58
III.4. Échantillons utilisés	58
III.4.1. Polyamide (PA)	58
III.4.2. Bronze	59
III.4.3. Particules poudreuses du PVC	60
III.4.4. Cuivre	61
III.5. Dispositif expérimental	61
III.5.1. Matériels utilisés	63
a) Amplificateur de tension	63
b) Générateur de fonction	64
c) Oscilloscope à mémoire	64
d) Cage de Faraday	65
e) Thermo hygromètre numérique	66
III.6. Protocole expérimental	66
III.6.1. Avec vibration de convoyeur	66
III.6.2. Sans vibration du convoyeur	66
III.7. Étude de déplacement des particules de PA et PVC	67
III.7.1. Déplacement des particules PA	67
III.7.2. Étude de déplacement des particules micronisées de PVC	70
III.8. Étude de séparation de PA/bronze et du PVC/ cuivre	75
III.8.1. Séparation des particules PA/ bronze	75
III.8.2. Séparation du mélange de particules micronisées PVC / cuivre	79
Conclusion	80

CHAPITRE IV : IDENTIFICATION DU PRODUIT GRANULAIRE PAR LA MESURE DE LA CHARGE ELECTRIQUE

Introduction	82
IV.1. Echantillons utilisés	83
IV.1.1. Polycarbonate (PC)	83
IV.1.2. PEHD	84
IV.2. Dispositif expérimental	84
IV.2.1. Capteur électrostatique	86
IV.2.2. Capteur à cage Faraday	87
IV.3. Matériel utilisé	88
a) Thermo-hygromètre	88
b) Tachymètre	88
c) Électromètre	88
d) Balance	88

e) Moteur triphasé asynchrone à cage d'écureuil (aspirateur)	88
f) Variateur de fréquence	89
IV.4. Etude expérimentale	89
IV.4.1. Identification de la nature et de la composition du produit	89
IV.4.2. Résultats obtenus	92
Conclusion	101
Conclusion générale	103

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Si les nouvelles technologies de l'information donnent aux chercheurs un accès quasi instantané à une énorme quantité d'information, elles ne créent pas automatiquement un milieu favorable à la formation. Heureusement, le développement des technologies liées à l'information, permet de créer des moyens efficaces d'aide à la recherche ; les recherches récentes réalisées dans le domaine des sciences en témoignent.

Actuellement la réalisation d'une expérience de laboratoire se fait dans un laps de temps fixe. Un chercheur se doit à traiter rapidement une quantité importante d'informations, l'installation et le montage occupent souvent la majeure partie du temps alloué.

Il est difficile alors de travailler efficacement sur les aspects les plus importants et les plus intéressants d'une expérimentation, c'est-à-dire l'analyse des résultats et la modification de certains paramètres pour tester une nouvelle hypothèse. Ce travail peut se faire de manière plus efficace avec un ordinateur et l'équipement approprié. L'analyse de données complexes et leur représentation sur un ordinateur personnel sont un facteur important de motivation.

L'utilisation de l'ordinateur avec des logiciels préprogrammés rend monotone un outil attrayant et dynamique en le transformant en simple exerciceur. Outre le fait que l'ordinateur ait été conçu pour le traitement de l'information et le calcul, ce sont ces capacités graphiques qui font de lui un outil révolutionnaire. La représentation graphique diminue la charge cognitive (connaissance dans le sens de processus et de produit) en représentant des phénomènes abstraits difficiles à décrire dans une forme conventionnelle. Le chercheur peut alors intégrer plus rapidement des phénomènes physiques et en extraire les éléments de base. C'est un support à la créativité [1].

Il est alors apparu une nouvelle métaphore, celle de l'instrumentation virtuelle. Il ne s'agit plus de calculer et d'afficher des nombres mais de représenter des phénomènes physiques et de les contrôler, de formuler des hypothèses et de les vérifier et de simuler ou créer des environnements.

La représentation graphique est supérieure à la représentation mathématique ou textuelle pour appréhender les résultats d'une expérimentation en facilitant la perception et la compréhension d'un problème complexe. De plus elle est un support important pour la mémoire à court terme [2].

D'après Robinett [2], " Le processus d'apprentissage requiert des exemples concrets et des modèles graphiques descriptifs et interactifs efficaces et ces modèles sont réalisables par ordinateur. C'est tout récemment en se référant aux jeux vidéo que les scientifiques ont compris que la représentation graphique sur ordinateur peut aider à interpréter de grandes quantités de données, une chose pourtant évidente pour des enfants qui utilisent ces jeux ".

L'objectif de cette thèse est de relier l'instrument virtuel avec des dispositifs pour faciliter l'acquisition, l'interprétation de données et le contrôle des appareils de mesure en les connectant avec des cartes ou des ports USB. Dans ce manuscrit, on a fait deux études ; une avec les ondes mobiles et la diélectrophorèse et la deuxième avec le transport pneumatique.

La diélectrophorèse DEP est une méthode de contrôle des particules idéale pour les particules électriquement neutres. Quand une particule diélectrique est en suspension dans le champ électrique, elle sera polarisée en dipôles, et l'interaction coulombienne existera entre les dipôles et le champ électrique. Si le champ électrique n'est pas uniforme, une force nette agira sur la particule pour amener la particule à se déplacer vers/dans la direction des maxima du champ électrique. Avec le développement de la technologie d'usinage de précision, la technologie DEP a connu un développement rapide depuis 1990.

Le transport pneumatique à phase diluée, dans lequel les particules sont suspendues dans le gaz et transportées dans un pipeline, est une alternative aux solutions mécaniques de convoyage de matières : les poudres ou granulés sont entraînés par un courant gazeux, permettant d'obtenir un écoulement diphasique gaz/solide. Ce transport garde la préférence des industriels car il est plus efficace et respectueux. Lorsque les particules sont transportées, elles acquièrent une charge électrostatique par contact avec la paroi du tuyau.

Le présent manuscrit s'articule autour de quatre chapitres qui seront brièvement décrits dans les paragraphes suivants :

- Le premier chapitre de ce travail sera donc consacré à l'état de l'art sur le transport pneumatique, les ondes mobiles et les forces appliquées. C'est également dans ce chapitre que nous rappelons quelques études déjà faites dans ce domaine.
- Historiquement, un logiciel de mesure est un instrument de mesure qui est contrôlé depuis un ordinateur à la place des boutons sur sa face-avant. Cette logique conduit à la notion d'instrument virtuel : instrument réel contrôlé depuis un ordinateur.

C'est dans ce contexte que le second chapitre a été abordé. Ce chapitre a eu le mérite de nous faire aborder l'utilisation du logiciel LABVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), très approprié à l'informatique industrielle et scientifique. Trois de ces programmes ont été utilisés avec les dispositifs.

- Le troisième chapitre sera dédié à l'étude du déplacement et de la séparation de plusieurs mélanges de particules isolantes / conductrices millimétriques et micronisées en utilisant les ondes mobiles et la diélectrophorèse COM (convoyeurs à ondes mobiles). Ensuite nous irons plus loin en détaillant les deux différents dispositifs mis en place dans le laboratoire. La réalisation de l'instrumentation virtuelle sur PC sera appuyée sur un développement logiciel sous LABVIEW. Quelques paramètres seront testés, tels que la tension appliquée et la fréquence du signal.
- le quatrième chapitre consistera à l'étude de la nature des particules qui passent à travers un tube du transport pneumatique en aluminium. Cette partie s'est focalisée sur la charge des particules. À cet effet, nous proposons une étude de l'interaction entre des capteurs de charge électrique et l'instrument virtuel pour analyser la nature du produit granulaire s'écoulant dans le tube.
- Des conclusions générales qui synthétisent les principaux résultats obtenus et les perspectives scientifiques appliquées offertes par cette recherche clôturent ce travail.

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART

CHAPITRE I : ÉTAT DE L'ART

Des applications industrielles de l'électrostatique pour manipuler des particules ou des gouttelettes en suspension sont actuellement utilisées dans de nombreux domaines : peinture et poudrage électrostatiques, précipitation électrostatique (PES), pulvérisation électrique de liquide, guidage électrostatique de poudre (par rideaux électriques), séparation électrostatique de granules, etc.

Dans tous ces cas, les particules ou gouttelettes en suspension doivent être électriquement chargées. Alors, sous l'effet du champ électrique, elles sont dirigées ou entraînées vers une cible, une zone de capture ou de séparation, etc [3].

Les matières particulaires ont une large gamme d'applications dans l'industrie. Les processus de particules vont du mélange au transport. La charge électrostatique et les morphologies des particules sont deux paramètres qui restent relativement inconnus, mais ils sont très importants dans tous les processus.

La compréhension de ces deux paramètres peut améliorer l'efficacité des processus de particules et de leurs applications. La charge de particules se produit pendant le transport ; les particules chargées se déposent plus facilement que les particules neutres. Le transport de particules dans un tuyau d'un endroit à un autre est un processus simple mais essentiel ; ce processus est appelé transport pneumatique.

La séparation des particules est un processus clé dans une large gamme d'applications techniques, agricoles et minières. Les approches de séparation mécanique standard, telles que la centrifugation ou le tamisage, présentent une performance médiocre pour les particules chargées, étant donné que les charges électriques provoquent l'agglomération des particules les unes aux autres ou adhèrent aux parois des vaisseaux.

Ceci est particulièrement un problème pour les petites particules, ou la taille d'environ $10\ \mu\text{m}$ ou moins, pour lesquels les charges électrostatiques peuvent facilement dominer sur les forces de gravité ou d'inertie.

La technologie des rideaux électriques présente une approche alternative intéressante pour la séparation des particules chargées, car la méthode de transport des particules est directement liée à la charge de particules [4].

PARTIE 1. TRANSPORT PNEUMATIQUE

Les systèmes de transport pneumatiques sont fondamentalement simples et conviennent parfaitement au transport de matériaux en poudre et granulaires dans des situations d'usine, de site et d'usine.

Les exigences du système sont une source de gaz comprimé, généralement de l'air, un dispositif d'alimentation, un pipeline de transport et un récepteur pour désengager le matériau transporté et le gaz porteur. Le système est totalement fermé et, si nécessaire, le système peut fonctionner entièrement sans que les pièces mobiles entrent en contact avec le matériau transporté (figure I.1).



Figure I.1 : Transport pneumatique

Haut, bas ou des pressions négatives peuvent être utilisées pour transporter des matériaux. Pour les matériaux hygroscopiques, l'air sec peut être utilisé, et pour les matériaux potentiellement explosifs, un gaz inerte tel que l'azote peut être employé.

Un avantage particulier est que les matériaux peuvent être introduits dans les récipients de réception maintenu à une pression élevée si nécessaire.

I.1.1. Flexibilité du système

Avec un choix approprié et la disposition de l'équipement, les matériaux peuvent être transportés d'une trémie ou un silo (stockage) dans un endroit à un autre endroit à une certaine distance. Considérable, la flexibilité dans la disposition et l'opération de l'installation sont possibles, telles que l'alimentation multiple de point peut être faite en une ligne commune, et une seule ligne peut être déchargée dans un certain nombre de réception des

trémies. Avec les systèmes de vide, les matériaux peuvent être ramassés à partir du stockage ouvert ou des stocks, et ils sont idéaux pour nettoyer les accumulations de poussière et les déversements.

Les pipelines peuvent fonctionner horizontalement, verticalement de haut en bas (figures I.2-I.3) et avec des courbes dans le pipeline, toute combinaison d'orientations peuvent être logés dans un seul pipeline [5].



Figure I.2 : Transport pneumatique vertical

Transporter des matériaux verticalement en haut ou verticalement en bas ne pose plus de problème que de transporter horizontalement [6]. Les débits de matériaux peuvent être contrôlés facilement et surveillés pour vérifier en permanence l'entrée et la sortie, et la plupart des systèmes peuvent être arrangés pour être complètement automatique.



Figure I.3 : Transport pneumatique horizontal

I.1.2. L'industrie et les matériaux

Une grande variété de matériaux est manipulée sous forme de poudre et granulaire, et un grand nombre de différentes industries a des processus qui impliquent leur transfert et leur stockage. Certains des industries dans lesquelles les matériaux en vrac sont transportés

incluent agriculture, exploitation minière, produits chimiques, pharmaceutiques, fabrication de peintures, raffinage et traitement de métaux.

En agriculture, de très gros tonnages de matériaux récoltés comme les céréales et le riz sont manipulés, ainsi que des matériaux transformés tels que les granulés d'aliments pour animaux. Les engrais représentent une grande industrie alliée avec une grande variété de matériaux. Une vaste gamme de produits alimentaires de la farine au sucre et du thé au café est transportée pneumatiquement dans de nombreuses industries manufacturières. La confiserie est une industrie particulière dans laquelle beaucoup de ces matériaux sont manipulés.

I.1.3. Le transport pneumatique et ses avantages

Le transport pneumatique est un moyen moderne de transférer des poudres et des granulés qui apporte nombre d'avantages [7] :

I.1.3.1. Réduction de la contamination du produit

En utilisant un transporteur pneumatique, les clients pourront travailler avec un système de transfert hermétique, qui évitera à des matières étrangères de venir se mélanger à leur produit, ou que du produit ne tombe dans l'espace environnant. C'est également un moyen qui préserve l'intégrité du produit, dans la mesure où celui-ci n'est pas abîmé dans le processus de transport. La vitesse est réglée en fonction de la fragilité du produit.

I.1.3.2. Peu encombrant

Une solution de transport pneumatique n'occupe que très peu de place au sol, puisque la canalisation démarre verticalement depuis le point d'aspiration puis continue sur le même niveau que le point de déchargement sans gêner les autres machines. Le client peut utiliser plus efficacement son espace de travail.

I.1.3.3. Maintenance minimale

Les transporteurs pneumatiques ne comprennent que très peu de pièces en mouvement, ce qui se traduit par des coûts de maintenance très faibles et une meilleure fiabilité du système. Le corps du transporteur se désassemble sans aucun outil. La pompe est conçue avec un module de vide séparé qui se démonte facilement pour être nettoyé, ce qui réduit les temps d'arrêt.

I.1.3.4. Environnement de travail sans poussière

Un autre avantage majeur du transport pneumatique est que, contrairement aux convoyeurs mécaniques à bande ou à vis, il ne dégage pas de poussière. Parce que le transporteur pneumatique fonctionne en vase clos, les conditions de travail s'en trouvent améliorées, et permet de garder confinés des produits toxiques pendant leur transfert.

I.1.3.5. Souplesse dans la production

En ne remplaçant simplement que quelques éléments modulaires d'un transporteur pneumatique, il est facile de pouvoir, à des coûts raisonnables, rallonger ses distances de transport, son implantation, ou d'augmenter ses capacités de transfert. Cela permet de pérenniser une installation sans compromettre la fiabilité.

I.1.4. Facteurs influençant la fluidité

Les principaux facteurs influençant la fluidité des solides en vrac sont la taille des particules, forme, charge électrostatique et humidité. Il est tout à fait possible qu'une combinaison de ceux-ci, plutôt qu'un seul facteur, seraient responsables des mauvaises caractéristiques d'écoulement d'un matériau.

I.1.4.1. Taille des particules

En ce qui concerne la taille des particules, il existe une force naturelle d'attraction entre les particules qui augmente avec la taille décroissante. Ce seul facteur est suffisant pour rendre un matériau identique à tous égards, moins fluide sur une plage de taille plus fine. De l'expérience il semblerait que 50-100 μm est la gamme approximative, régulièrement les matériaux façonnés présentent un changement notable des caractéristiques d'écoulement. Une connaissance de la distribution de la taille des particules est donc clairement essentielle.

I.1.4.2. Forme de particule

L'influence de la forme des particules est plus facile à comprendre. Les particules de forme régulière ne peuvent pas s'emballer ensemble pour former une liaison mécanique et ne peuvent donc pas entraver la libre circulation d'une particule par rapport à ses voisins. Les particules fibreuses et de forme très irrégulière peuvent s'emboîter et ainsi rendre le volume moins fluide que les matériaux en forme régulière.

I.1.4.3. Charge électrostatique

À la suite de la manipulation du matériau, il est possible que les particules acquièrent une charge électrostatique. L'expérience a montré qu'une telle charge peut changer même le matériau à écoulement libre en un matériau qui présente des caractéristiques de cohésion. Certains polymères, telles que les résines de PVC, sont particulièrement sensibles aux problèmes d'écoulement de ce type.

I.1.4.4. L'humidité

L'humidité peut affecter l'écoulement de plusieurs façons. Des matières déliquescentes comme le sucre peuvent former un hydrate à la surface des particules. Ceux-ci peuvent les lier ensemble et les empêcher de couler. Avec des matériaux tels que le sable, lorsque les particules sont imperméables, toute humidité adhérerait à la surface des particules.

Cette humidité peut être suffisante pour former des liaisons d'eau. L'humidité sous cette forme est appelée «humidité libre». La tendance générale est pour l'humidité ajoutée pour augmenter la cohésion d'un solide en vrac jusqu'à ce qu'un pic soit atteint, après quoi

l'addition d'humidité supplémentaire à l'effet inverse jusqu'à ce que finalement la masse solide se comporte comme un lisier.

Avec des matériaux qui ont des particules perméables à l'eau, toute humidité sera préférentiellement absorbée dans les particules jusqu'à un point où elles sont saturées.

À moins que le matériau ne soit également déliquescent, l'humidité sous cette forme ne contribue pas à son cohésion. C'est l'excès d'eau qui contribue à la cohésion puisque cela se manifeste alors comme humidité de surface. Avec certains matériaux perméables, il peut y avoir une certaine quantité d'eau que, dans des conditions atmosphériques normales, reste toujours à l'intérieur des particules, telles qu'avec de la «farine de blé». Ceci est communément appelé «humidité inhérente» [8].

I.1.5. Forces aérodynamiques et électrostatiques

Le transport, le stockage, les mélanges, l'écoulement, la densification des matériaux pulvérulents sont influencés par les forces inter partielles qui prennent naissance lors de la friction ou du simple contact [9].

Trois types de forces s'exercent sur les matériaux granulaires :

- a) Les forces de la pesanteur ;
- b) Les forces de London-Van Der Waals ;
- c) Les forces électrostatiques.

I.1.5.1. Forces de la pesanteur

Le poids d'un corps de masse m s'exprime par :

$$P = m * g \quad \text{I.1}$$

Avec $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Les forces de la pesanteur s'opposent aux forces inter partielles. Elles sont différentes pour des particules chargées d'électricité statique ou électriquement neutres.

I.1.5.2. Forces de London – Van Der Waals

Ce sont des forces de nature électrostatique qui s'exercent sur des molécules ou des particules électriquement neutres. Elles peuvent être estimées en faisant la somme de toutes les combinaisons possibles de paires d'atomes entre particules et s'écrivent :

$$F = \frac{\lambda}{a^7} \quad \text{I.2}$$

Où a est la distance entre les deux centres et λ est une constante, qui dépend de la polarisation et de l'énergie d'ionisation des atomes impliqués.

Les forces de London – Van Der Waals étant inversement proportionnelles à la septième puissance de leur distance, cela entraîne un accroissement rapide de l'interaction pour les courtes distances (figure I.4).

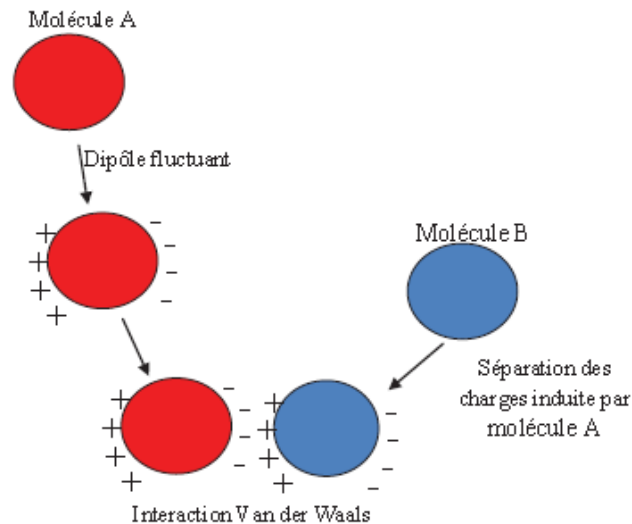


Figure I.4 : Phénomène physique derrière la force Van Der WAALS : polarisation

Le tableau I.1 donne la valeur des forces d'interaction entre des particules séparées par une distance de 50 Å (5nm), en fonction de leur rayon. Pour des particules de 1 mm, elles sont approximativement identiques. Ces constatations expliquent le fait que les fines particules aient plus tendance à s'agglomérer que les grosses.

Tableau I.1: Forces de Van Der Waals et de pesanteur en fonction de la taille des particules, d'après HIGUCHI [9]

Rayon [cm]	Forces de Van Der Waals $a=50 \text{ Å} [cm/s^2]$	Poids $[g * \frac{m}{s^2}]$
10^{-5}	$3,3 * 10^{-4}$	$4,1 * 10^{-12}$
10^{-4}	$3,3 * 10^{-3}$	$4,1 * 10^{-9}$
10^{-3}	$3,3 * 10^{-2}$	$4,1 * 10^{-6}$
10^{-2}	$3,3 * 10^{-1}$	$4,1 * 10^{-3}$
10^{-1}	3,3	4,1

I.1.5.3. Force de Coulomb

Ces sont des forces attractives ou répulsives qui s'exercent entre particules chargées. Si Q_a et Q_b sont les charges des deux particules et a la distance entre leurs centres, la loi de Coulomb permet d'écrire :

$$F = \frac{Q_a * Q_b * K}{a^2} \quad \text{I.3}$$

Avec Nm^2/C^2 $K = \frac{1}{4 * \pi * \epsilon_0}$ et ϵ_0 étant la permittivité du vide. Le calcul de ces forces a été établi pour des éléments supposés sphériques de charges données, de tailles différentes et en proche contact.

Le tableau I.2 montre une comparaison entre les forces électrostatiques et les forces de pesanteur, pour des petites particules.

Tableau I.2: Forces d'interaction électrostatique entre deux sphères chargées

Rayon [cm]	Forces [cm/s^2]	Poids [$g * cm/s^2$] Densité=1
10^{-4}	$9 * 10^{-6}$	$4,1 * 10^{-9}$
10^{-3}	$9 * 10^{-4}$	$4,1 * 10^{-6}$
10^{-2}	$9 * 10^{-2}$	$4,1 * 10^{-3}$
10^{-1}	9	4,1
1	$9 * 10^2$	$4,1 * 10^3$

Par conséquent, entre deux particules de $1 \mu m$ de diamètre, avec la même charge maximale, la force qui s'exerce est 1000 fois supérieure à celle de la pesanteur. En analysant les deux tableaux, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les forces de Van Der WAALS diminuent plus rapidement que les forces électrostatiques, quand la distance entre les particules augmente.
- Pour des particules de diamètre égal ou inférieur au micron, les forces de Van Der WAALS sont plus importantes que les forces électrostatiques, lorsque ces particules sont en contact.
- Quand le diamètre des particules diminue, les forces de Van Der WAALS décroissent plus lentement que les forces électrostatiques.

L'importance de ces deux forces dépend de la taille des particules et des distances qui les séparent. Les propriétés d'écoulement des matériaux granulaires sont en fonction des interactions particulières. Chaque particule se déplace en fonction de son poids, mais elles seront gênées dans leur mouvement par des contacts, soit avec les autres particules, soit avec les parois.

Les phénomènes d'adhésion et de cohésion peuvent être expliqués par les forces de Coulomb qui s'exercent soit entre deux particules, soit entre une particule et la paroi.

I.1.5.4. Cohésion due aux forces électrostatiques

La cohésion entre particules est due aux forces d'attraction de nature électrostatique qui prennent naissance lors du contact ou de la friction. Les charges électrostatiques formées au niveau des surfaces de contact se comporteront de diverses façons en fonction de la nature du matériau : conducteur ou isolant.

Lorsque deux isolants chargés de signe opposé se rencontrent, la cohésion a lieu et persiste. Les électrons ne peuvent pas se répartir et les force d'attraction ne s'annulent pas.

Les charges restent localisées aux points de contact et de friction avec le matériau responsable de l'électrisation. Ces points sont souvent des arrêtes et protubérances.

I.1.5.5. Adhésion due aux forces électrostatiques

L'adhésion des particules sur une paroi dépend des forces capillaires d'adhésion, des forces d'interaction électrostatique et de Van Der WAALS. Le mouvement d'une particule dans un système d'écoulement est donc le résultat des forces d'adhésion F_1 et de la force de pesanteur F_2 . (Figure I.5).

Les forces de Coulomb jouent un rôle prépondérant et il est bien évident que la nature du matériau support influencera de façon considérable ce phénomène.

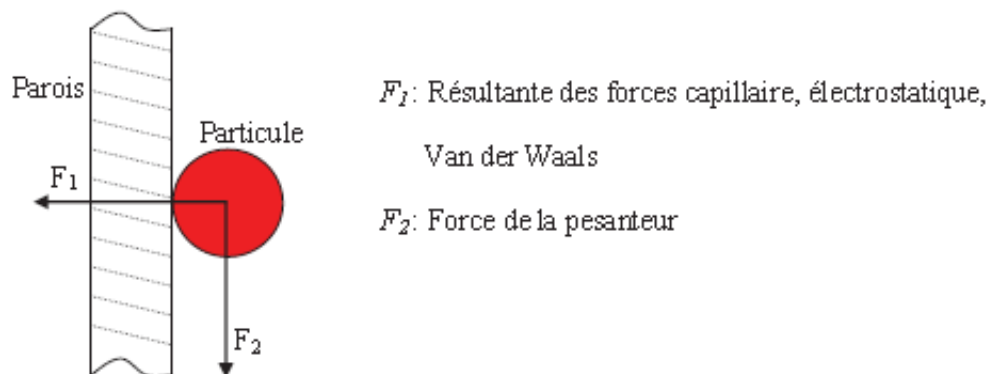


Figure I.5 : Représentation de différentes forces intervenant dans l'interaction

I.1.5.6. Forces aérodynamiques

Dans l'étude théorique du mouvement des particules en présence ou en absence de champ électrique, il faut tenir compte des forces aérodynamiques agissant sur ces particules.

L'équation des forces agissant sur une particule chargée électriquement est la suivante :

$$F_i = F_{el}(Q, E_0, x) \pm F_a - F_g \quad 1.4$$

Où F_i est la force d'inertie, F_{el} est la force exercée par un champ électrique uniforme d'intensité E_0 sur une particule chargée, de charge Q , située à une distance x de l'électrode.

F_a est la force aérodynamique et F_g la force gravitationnelle.

La force d'inertie F_i est donnée par la relation :

$$F_i = W * (\rho_s - K_p) * \frac{dv}{dt} \quad 1.5$$

Où : v est la vitesse de particule, K – coefficient de forme [10] (pour les particules sphériques $K_p = 0,5$), W – le volume d'une particule ayant la densité ρ_s ; ρ – densité de l'air.

La force aérodynamique s'exprime par la relation :

$$F_a = C_d * \pi * R^2 * \rho * v_r^2 / 2 \quad 1.6$$

C_d - Coefficient de trainée en fonction du nombre du Reynolds, v_r – vitesse relative d'une particule dans l'air.

La friction de l'air, ou la résistance de l'air, est un exemple de frottement du fluide. La force de friction est dépendante de la vitesse. Cette dépendance peut être très compliquée, et seulement les cas spéciaux peuvent être traités analytiquement. À des vitesses très faibles des particules, la résistance de l'air est approximativement proportionnelle à la vitesse et peut être exprimée sous la forme :

$$F_f = -b * v \quad 1.7$$

Où le signe négatif implique qu'il est directement opposé à la vitesse.

1.1.6. Phénomènes électrostatiques dans le transport pneumatique

Les matières particulaires sont essentielles dans de nombreux processus industriels. Les exemples de ces processus comprennent le transport de particules dans une chaîne de production, en utilisant catalytique particules dans des lits fluidisés pour augmenter le rendement de production, la filtration de la poussière pour minimiser la contamination, et les particules médicinales aérosol pour une utilisation en thérapie par inhalation.

La connaissance de chaque processus individuel est bien développée. Cependant, il y a une caractéristique des particules qui reste relativement inconnue dans tous les processus. L'effet des charges électrostatiques sur les particules dans plusieurs de ces processus reste encore insaisissable.

Dans la suspension de particules, les particules acquièrent une charge électrostatique lorsqu'elles entrent en contact avec d'autres surfaces.

1.1.6.1. Chargement des particules durant le transport

Pendant le transport des particules, les particules acquièrent une charge électrostatique au contact de la paroi du tuyau. Négliger l'accumulation de charge électrostatique sur les particules se traduira par de nombreux graves problèmes. Quelques exemples incluent: des explosions de poussière ou des risques d'explosion qui sont causés par des décharges d'étincelles provenant de particules excessivement chargées [11-13].

Les particules chargées peuvent également s'accumuler dans les pipelines et causent des blocages et des interférences de flux [14]. Dans les applications pharmaceutiques, les particules chargées peuvent s'agglomérer et se séparer, entraînant une formulation médicamenteuse inégale et les posologies [15-16]. Les particules chargées générées dans les inhalateurs médicaux peuvent conduire à des modèles de dépôt radicalement différents dans les poumons [17].

D'autre part, il y a des avantages à avoir des particules chargées pendant le transport. La charge de particules est la clé d'un système de surveillance en ligne, mais sans s'y limiter, le chargement en masse, la distribution des particules et la vitesse [18-20]. Indépendamment de l'application, il est nécessaire de mesurer et de contrôler la charge de particules dans les systèmes de transport pneumatique.

I.1.6.2. Prédiction de charge de particules dans un convoyeur pneumatique en système diluant

Le chargement de particules est un phénomène courant qui se produit naturellement et fréquemment. Tout processus qui utilise des poudres sèches impliquera des particules chargées.

Watano et al. (2003) [21] ont effectué des simulations ainsi que des expériences pour étudier la charge électrostatique quand un tas de particules de PMMA ont été soufflées à travers un tuyau horizontal. Ils ont constaté que le nombre des collisions entre les parois et la composante verticale de la vitesse d'impact sont d'importants paramètres pour la charge.

Cependant, la plupart des recherches sur la charge de particules ont été expérimentales, axées sur la détermination de la dépendance globale de la charge électrostatique sur des paramètres spécifiques.

Masuda et al. (1972) [22] a enduit une section d'un pipeline avec un film de polymère et utilisé un galvanomètre pour mesurer le transfert de courant lors de l'impact. Le nombre de contacts de particules avec la paroi était alors lié au transfert de charge. Ils ont trouvé que le transfert de courant entre les particules et la surface du tuyau dépend de la fréquence de contact, la surface de contact, le temps de contact et la taille des particules.

Smeltzer et al. (1982) [23] ont mesuré l'accumulation de charge sur les perles de verre circulant à travers les tuyaux en plexiglas. Des fils en Nickel ont été insérés dans le tuyau en verre de plexiglas, et la charge a été mesurée quand les particules sont entrées en contact avec le fil. Ils ont trouvé que la charge était linéaire liée à la fréquence de collision, qui a été mesurée dans différentes sections de tuyau. Ils ont également déterminé que la charge d'impact était le principal mécanisme du transfert dans un transport pneumatique dilué.

Yao et al. (2006) [24] ont utilisé la capacité électrique tomographie, ainsi que la vélocimétrie par imagerie de particules, pour mesurer le temps d'un système de particules circulant pour atteindre l'équilibre électrostatique dans un écoulement de tuyau cyclique. Ils ont trouvé qu'un temps plus long est requis pour une géométrie plus complexe, et l'équilibre électrostatique est atteint plus rapidement dans un tuyau horizontal que dans un tuyau vertical.

Plutôt que de mesurer le transfert de charge entre les particules et les surfaces des tuyaux, Il est également possible de mesurer directement la charge sur les particules à l'aide d'une cage de Faraday. Dans cette méthode, lorsque les particules entrent dans la cage de Faraday, un courant électrique est envoyé à l'électromètre. La lecture actuelle mesurée à partir de l'électromètre peut alors être directement liée à la quantité de charge possédée par les particules.

Kanazawa et al. (1995) [25] ont utilisé un voltmètre électrostatique pour mesurer la charge sur la surface du tuyau et une cage de Faraday pour mesurer la charge de particules dans un système de particules en mouvement. Ils ont trouvé une distribution bipolaire de charge pour les particules de forme irrégulière, mais une seule distribution polaire de charge pour les particules sphériques.

Nieh et Nguyen (1988) [26] ont également utilisé une cage de Faraday pour déterminer l'effet de l'humidité, de la vitesse, et le diamètre des particules sur le comportement de charge de particules. Ils ont trouvé que l'humidité a un effet significatif sur la charge des particules, et les particules sont neutralisées à haute humidité. Des particules plus petites ont également été trouvées pour avoir un rapport charge / masse plus élevé.

Seule une poignée d'études antérieures ont étudié le comportement de charge pour un impact d'une seule particule (charge d'impact) et comment la charge peut être contrôlée.

Matsusaka et al. (2000) [27] ont effectué des expériences en utilisant une sphère en caoutchouc de 31 mm qui a heurté une plaque d'acier et sont arrivés à la conclusion que la charge transférée en un seul impact dépend de la charge initiale du matériau, de la vitesse d'impact et de la zone de contact.

Matsuyama et Yamamoto (1995) [28] ont réalisé des expériences avec des particules de polymère de 3 mm et une plaque de métal ; ils ont trouvé que la charge d'impact dépend linéairement de la charge initiale de la particule. Il y a aussi une charge au-delà de laquelle une particule ne gagnera plus ou ne perdra plus de charge après un impact supplémentaire ; c'est ce qu'on appelle la charge d'équilibre et elle est indépendante des conditions d'impact.

Watanabe et ses collaborateurs (2007) [29] ont étudié des particules de médicament de 500 à 600 μm qui entrent en contact avec une plaque d'acier inoxydable. Ils ont trouvé que la charge d'équilibre est liée à la différence de potentiel de contact.

Matsusaka et al. (2002) [30] ont également observé cette charge d'équilibre trouvée par Matsuyama et Yamamoto [28] dans un système de particules en écoulement après une certaine longueur de tuyau. Matsusaka et al. (2007) [31] ont ensuite confirmé dans un système de particules en écoulement que la quantité de transfert de charge est fonction de la charge initiale et de la charge d'équilibre. Ils ont observé que la quantité de charge sur les particules varie exponentiellement en fonction de la longueur du tuyau, et le transfert de charge continue jusqu'à ce que les particules atteignent la charge d'équilibre dans le système.

Avec cette relation de charge, ils étaient capables de contrôler la charge de particules dans le flux de la conduite en changeant le matériau de la paroi avec laquelle les particules entrent en contact.

Dans une tentative de contrôle de la charge de particules, Matsusaka et al. (2008, 2011) ont conçu et construit des chargeurs de particules [19]. Lorsque les particules s'écoulent à travers une chambre conique ou cylindrique, la force centrifuge dirige les particules vers la paroi où elles entrent en collision et se chargent. Les chargeurs de particules fonctionnent selon le principe de l'électrification par contact ; une particule peut gagner ou perdre de la charge en fonction de l'état du matériau avec lequel elle entre en contact. Les paramètres importants pour le chargeur de particules sont les propriétés électrostatiques entre les particules et la surface de la paroi et le champ électrique appliqué [32].

I.1.6.3. Modèle de transfert de charge pour les systèmes métal-métal

Dans l'électrification par contact métal-métal, les électrons sont transférés entre surfaces. En conséquence, un matériau devient chargé positivement tandis que l'autre devient chargé négativement.

Le transfert de charge Δq_M entre les deux métaux après un contact, sans l'influence du champ électrique externe, est donné par :

$$\Delta q_M = C_0 * V_C \quad 1.8$$

Où C_0 est la capacité de contact entre les deux métaux et V_C est la différence de potentiel du contact qui dépend directement de la fonction de travail des deux métaux.

La fonction de travail est liée à la quantité d'énergie nécessaire pour décaper les électrons de la surface ; cette valeur est fortement influencée par l'état de surface (par exemple, la quantité des électrons de valence sur la surface). La différence de potentiel de contact entre les deux les métaux est donnée par :

$$V_C = - \frac{(\varphi_a - \varphi_b)}{e} \quad 1.9$$

Où φ est la fonction de travail pour chaque métal, et "e" est la charge élémentaire d'un électron. Les électrons passent du métal avec la plus petite fonction de travail au métal avec la fonction de travail dominante.

L'électrification de contact pour deux métaux est assez simple ; cependant, quand un isolant est impliqué, la théorie devient plus complexe. Bien qu'il existe une controverse sur le mécanisme du transfert de charge pour un contact non métallique (par exemple transfert d'électrons, transfert d'ions ou réaction chimique au site de contact). La fonction de travail d'un isolant ne peut pas être mesurée directement.

L'état de surface (par exemple la rugosité et la géométrie), l'environnement (par exemple l'air ou le vide) et d'autres conditions physiques influencent directement la fonction de travail d'un isolant.

Pour un isolant, une "fonction de travail efficace", mesurée à une condition spécifique, est utilisée à la place de la fonction de travail du métal [33].

I.1.6.4. Modèle de transfert de charge pour isolant-métal et isolant-isolant

Le modèle de transfert de charge typique appliqué à deux matériaux en contact est connu sous le nom de modèle de condensateur (CM). Le modèle du condensateur décrit le contact entre les deux matériaux en termes de condensateur.

Les surfaces de contact sont considérées comme étant les deux plaques dans le condensateur, et la charge est transférée en raison de la différence de potentiel des deux plaques ou matériaux. La différence de potentiel totale associée au modèle du condensateur V_{CM} lorsque les particules sont en contact peut être exprimée comme suit :

$$V_{CM} = V_c - V_e - V_b + V_{ex} \quad \text{I.10}$$

Où V_c calculé à partir de l'équation I.8 et basé sur les fonctions de travail effectif, V_e et V_b sont les différences de potentiel dues à la charge d'image et la charge d'espace, respectivement, et V_{ex} est la différence de potentiel causée par des facteurs externes, par ex. un champ électrique imposé [34,35].

La charge d'image se produit lorsque le champ électrique d'une charge ponctuelle induit une charge sur son environnement. La charge d'espace se produit lorsque plusieurs charges ponctuelles agissent ensemble pour former un nuage de charge. Les termes V_e et V_b sont tous deux négatifs car les deux inhibent le transfert de charge. Le transfert de charge dans le modèle de condensateur peut alors être représenté par :

$$\Delta q_{CM} = K_c * C * V_{CM} \quad \text{I.11}$$

Où K_c est l'efficacité de charge et C est la capacité entre les deux matériaux.

Dans le cas d'un contact métal-métal, K_c est égal à un, C est égal à C_0 , et $V_e = V_b = 0$. De plus, si $V_{ex} = 0$, alors l'équation I.11 se réduit à l'équation I.8 qui décrit le transfert de charge pour les contacts métal-métal en l'absence d'un champ électrique externe.

PARTIE 2. LES ONDES MOBILES ET LA DIELECTROPHORESE

Avec les explorations de plus en plus de la lune, Mars et d'autres planètes et la popularité croissante de l'énergie solaire dans la production sociale, la technologie de dépoussiérage dans les panneaux solaires a attiré beaucoup d'attention et d'investigation. Le dépoussiérage électrostatique est une méthode électrique d'échantillonnage [36]. Lorsque Clark PE, Minetto. FA et Keller. J [37] ont étudié la stratégie d'atténuation de la poussière qui travaille sur la surface lunaire, ils ont suggéré qu'il existe probablement deux mécanismes de charge de particules sur la lune : 1. chargement triboélectrique, 2. photoémission des électrons de la surface des particules par rayonnement UV.

Donc, s'il y a un fort potentiel sur la surface des panneaux solaires, les poussières chargées et non chargées seront attirées vers les panneaux à cause des forces électrostatiques. Ensuite, les particules de poussière seront finalement chargées par les panneaux solaires, de sorte qu'elles ont la même charge électrique et les forces électrostatiques entre elles sont répulsives. Cependant, cette stratégie ne peut pas être utilisée dans le système PV, à cause de l'effet de la pluie sur la terre [38].

Parmi toutes les technologies de dépoussiérage connues, un intérêt croissant a été porté à la technologie de dépoussiérage par rideau électrique, en raison de son rendement élevé, propre, sans contact et aucun dommage aux panneaux solaires, et d'autres avantages. Donc, il est devenu un point chaud de la zone de recherche de dépoussiérage [39].

Les électrodes de fourche sont composées d'une série d'électrodes parallèles plus et moins alternées, décalées, dont certains articles les appellent "courbure électrique". Le rideau électrique est divisé en deux catégories, l'un est le rideau électrique à ondes stationnaires, qui

est connecté à une alimentation électrique monophasée, et l'autre est le rideau électrique à ondes mobiles, qui est connecté à une alimentation polyphasée en courant alternatif [40,41].

Le dépoussiérage électrique a été proposé pour la première fois par Tatom et al. (1967) [42]. Masuda et al. [43] ont étudié le mouvement de particules de poussière dans le champ électrique de l'électrode à fourche.

Schmidin [44], Melcher et al. [45] ont exploré une grande diversité d'application de dépoussiérage électrique avec des électrodes à fourche.

Mazumder et al. [46] ont mis en avant le concept d'écran électrodynamique flexible (EDS) basé sur la technologie de rideau électrique à ondes mobiles, et ont étudié l'efficacité de l'élimination de la poussière dans l'environnement martien, et ont proposé la faisabilité de l'EDS appliquée au système photovoltaïque en enlevant la poussière sur les panneaux solaires.

L'influence de la force électrostatique et de la force de diélectrophorèse dans le rideau électrique sur l'enlèvement de la poussière a été étudiée par Calle, C. I. et al et le rideau électrique a été appliqué à l'exploration spatiale [47].

Weiss et Thibodeaux [48] ont suggéré l'utilisation d'un rideau électrique pour la séparation de particules de tailles et de charges différentes, avec application au tri des graines à partir de sous-produits dans les procédés agricoles.

Yen et Hendricks [49] ont également fait des travaux sur des rideaux électriques inclinés ; cependant, leurs expériences ne contiennent que les fils d'électrode, sans matériaux diélectriques, tant de particules tombent simplement à travers le rideau.

Masuda et al. [50] ont appliqué le rideau électrique pour la séparation par la taille et la charge des particules en suspension dans un liquide.

L'effet de la géométrie des électrodes sur l'efficacité de séparation a été examiné par Machowski et Balachandran [51].

Kawamoto [52] décrit diverses technologies qui utilisent des rideaux électriques pour séparer des particules de différentes tailles, y compris un rideau électrique incliné, un rideau électrique en forme de tube incliné, un rideau électrique en spirale et un système de séparation à rouleaux. Dans le rideau électrique incliné, Kawamoto observe que de grosses particules tombent au fond du rideau en raison de la gravité, mais que de plus petites particules sont transportées vers le haut du rideau.

Un certain nombre d'études computationnelles a également été réalisé pour le transport de particules électriques à rideaux. Gartstein et Shaw [53] et Kawamoto et al. [54] ont étudié le mouvement des particules non adhésives sur un rideau électrique. En utilisant une méthode à élément discret à sphère dure qui, par construction, peut prendre en compte des collisions de particules impliquant pas plus de deux particules ne touchant pas la surface diélectrique.

Liu et Marshall [41] ont mis au point une méthode de discrètement de la sphère souple pour le mouvement des particules adhésives sur un rideau électrique, ce qui peut expliquer

les collisions impliquant deux particules ou plus qui peuvent également toucher la surface diélectrique. Cette méthode a été utilisée pour examiner les effets de la collision de particules et de l'adhérence sur le transport sur un rideau horizontal et a ensuite été appliquée pour étudier le mouvement des particules sous rideau électrique à ondes stationnaires.

I.2.1. Les ondes mobiles

En général, le principe du mouvement des particules peut être décrit comme suit : si une particule diélectrique est exposée à un champ électrique qui oscille avec la période T , les multi-pôles induits oscillent également avec la même période. Dépendamment du retard entre le champ imposé et le moment induit supérieur ou inférieur à $T / 2$, la particule diélectrique est attirée soit vers les maxima de champ ou les minima de champ. Le désavantage de la diélectrophorèse commune est que les emplacements de ces points d'attraction sont prédestinés par la configuration d'électrode. Si un de ces points est atteint par la particule, le mouvement cesse [55].

Une possibilité de surmonter cette limitation pour les arrangements multi-électrodes linéaires est de changer le champ correspondant à la localisation des particules. Ceci rend possible une translocation de particules par paliers en déplaçant le point d'attraction dans la chaîne d'électrode. Ce principe peut encore être amélioré avec les points qui se déplacent assez lentement pour que la particule suive.

Par contre, l'idée de la diélectrophorèse par ondes mobiles est de générer des points d'attraction qui se propagent continuellement autant que la vitesse de la particule.

I.2.2. Diélectrophorèse

La diélectrophorèse ne nécessite pas que la particule possède une charge électrique fixe, mais repose plutôt sur la génération de charges de surface induites liées aux propriétés diélectriques intrinsèques de la particule et de son milieu environnant. Ces charges induites confèrent à la particule les propriétés d'un grand moment dipolaire.

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

La taille et la forme de la particule est un facteur de contrôle pour la diélectrophorèse. Des efforts importants sont nécessaires pour observer le mouvement diélectrophorétique des objets de taille moléculaire.

I.2.3. Théorie de la diélectrophorèse

Les phénomènes électrocinétiques ont été utilisés pendant des décennies pour manipuler des particules. L'une des premières techniques encore largement utilisées est l'électrophorèse [56]. L'électrophorèse est le mouvement de particules chargées électriquement sous l'influence d'un champ électrique DC uniforme dans l'espace [57].

L'électrophorèse peut être utilisée pour séparer des particules chargées, telles que l'ADN et d'autres macromolécules, en fonction de leur charge nette et de leur taille. Ces propriétés déterminent la vitesse à laquelle les particules traversent un milieu et peuvent être utilisées pour fractionner des populations de particules en fonction de leur espèce. L'inconvénient de l'électrophorèse est qu'elle ne peut être utilisée qu'avec des particules ayant une charge nette, ce qui exclut son utilisation sur une grande classe de particules biologiques telles que les cellules entières et les virus.

La diélectrophorèse (DEP) est l'utilisation de champs électriques à courant alternatif pour contrôler le mouvement des particules [58]. Contrairement à l'électrophorèse, la diélectrophorèse peut être utilisée sur des particules sans charge nette.

Lorsqu'une particule électriquement neutre est placée en présence d'un champ électrique spatialement non uniforme, la particule devient polarisée. Du fait de cette polarisation (Figure I.6), les charges négatives inhérentes à la particule sont séparées d'une faible distance des charges positives.

Puisque les particules sont neutres, les deux charges sur le corps sont opposées mais d'amplitude égale et peuvent être modélisées comme un dipôle.

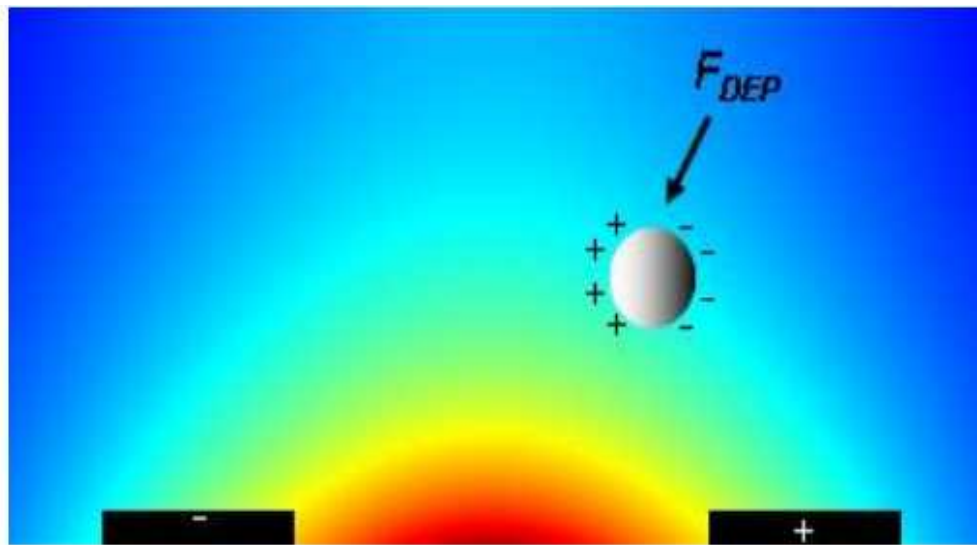


Figure I.6 : Particules électriquement neutres deviennent polarisées en présence d'un champ électrique spatialement non uniforme et le moment dipolaire induit résulte en une force de translation qui s'exerce sur la particule.[56]

La force sur un dipôle infinitésimal dans un champ électrique $\vec{E}$ est décrite par l'expression :

$$\vec{F}_{dipole} = \vec{p}_{eff} * \nabla \vec{E} \quad I.12$$

Où p_{eff} est le moment dipolaire effectif. D'après l'équation (I.12), la force est proportionnelle au gradient du champ électrique ; par conséquent, il n'y a pas de force nette sur un dipôle à moins que le champ électrique imposé de l'extérieur ne soit non uniforme.

Pour le cas d'une sphère en suspension dans un milieu diélectrique, le moment dipolaire effectif est :

$$\vec{p}_{eff} = 4 * \pi * r_p^3 * \epsilon_m * \left(\frac{\epsilon_p^* - \epsilon_m^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_m^*} \right) * \vec{E} \quad \text{I.13}$$

Où $\vec{E} = \frac{q}{4 * \epsilon_0 * \pi * d^2}$ et r_p est le rayon de la particule, ϵ_m est la permittivité du milieu et ϵ_p^* indique la permittivité complexe de la particule. La permittivité complexe est une fonction de la conductivité σ d'un objet et à une fréquence angulaire de ω du champ, elle est donnée par :

$$\epsilon^* = \epsilon - j \frac{\sigma}{\omega} \quad \text{I.14}$$

À partir des équations (I.12) et (I.13), l'expression de la force moyenne dans le temps exercée sur la particule dans un champ AC spatialement non uniforme est :

$$\langle \vec{F}_{DEP} \rangle = 2 * \pi * \epsilon_m * r_p^3 * \Re[K_{CM}] * \nabla E_{RMS}^2 \quad \text{I.15}$$

$$K_{CM} = \frac{\epsilon_p^* - \epsilon_m^*}{\epsilon_p^* + 2\epsilon_m^*} \quad \text{I.16}$$

Le terme K_{CM} est connu sous le nom de facteur Clausius-Mossotti [59] et est une mesure des permittivités relatives entre la particule et le milieu environnant. Les équations (I.14) et (I.15) montrent que ce facteur détermine la direction de la force diélectrophorétique.

Lorsque le signe de $\Re[K_{CM}]$ est positif, la particule est plus polarisable que son milieu environnant et subit ce que l'on appelle la diélectrophorèse positive (p DEP). Tout en subissant une diélectrophorèse positive, le vecteur de force est dirigé le long du gradient d'intensité du champ électrique ∇E_{RMS}^2 . Dans ces conditions, les particules sont attirées par les maxima d'intensité du champ électrique et repoussées des minima. Le contraire se produit lorsque $\Re[K_{CM}]$ est négatif. C'est ce qu'on appelle la diélectrophorèse négative (n DEP).

En substituant l'équation (I.13) à (I.15), les limites de haute et basse fréquence pour $\Re[K_{CM}]$ sont trouvées pour être :

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \Re[K_{CM}] = \frac{\sigma_p - \sigma_m}{\sigma_p + 2\sigma_m} \quad \text{I.17}$$

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} \Re[K_{CM}] = \frac{\epsilon_p - \epsilon_m}{\epsilon_p + 2\epsilon_m} \quad \text{I.18}$$

Les équations (I.17) et (I.18) montrent que la différence relative de conductivité domine le comportement à basse fréquence de $\vec{F}_{DEP}$, tandis que les effets de polarisation diélectrique, caractérisés par la permittivité, sont plus significatifs aux hautes fréquences.

Ces équations montrent également que $\Re[K_{CM}]$ est borné $-\frac{1}{2} < \Re[K_{CM}] < 1$ quelle que soit la fréquence. La figure I.7 montre un exemple de spectre diélectrophorétique avec $\sigma_p < \sigma_m$ et $\epsilon_p > \epsilon_m$. Dans ce cas, les particules se déplaceraient sous l'influence des forces nDEP aux basses fréquences et des forces pDEP à toutes les fréquences supérieures à la fréquence de passage à zéro de $\Re[K_{CM}]$.

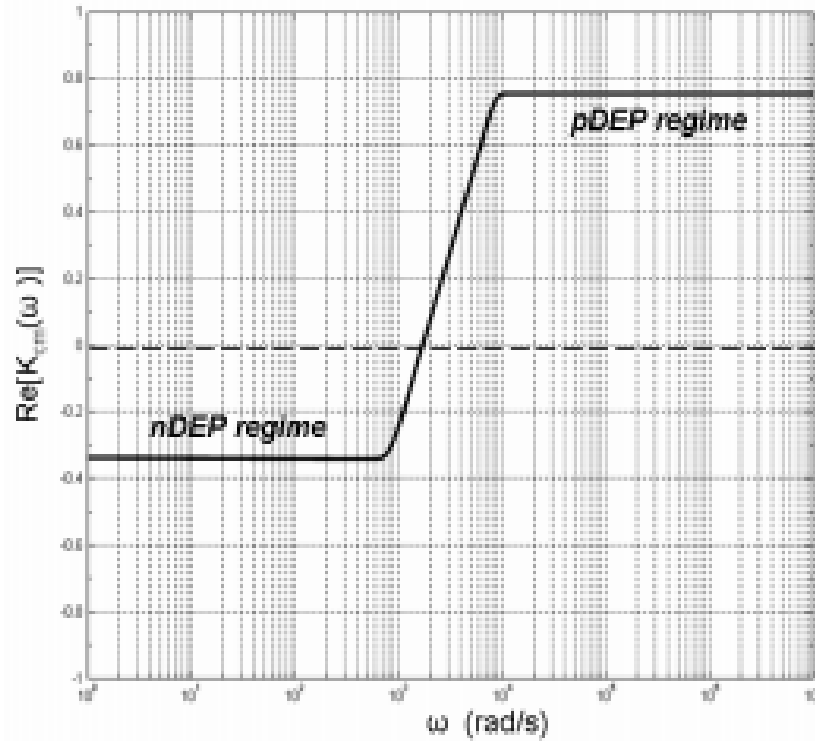


Figure I.7 : Exemple de spectre diélectrophorétique lorsque $\sigma_p < \sigma_m$ et $\epsilon_p > \epsilon_m$

I.2.3.1. Diélectrophorèse à ondes mobiles

La diélectrophorèse à ondes mobiles est une forme de diélectrophorèse dans laquelle le champ électrique alternatif est spatialement non uniforme en amplitude et en phase [58]. Si l'on prend en considération à la fois les composantes en phase et hors phase du moment dipolaire de la particule, l'expression complète de la force moyenne dans le temps sur une particule due à la diélectrophorèse est :

$$\langle \vec{F}_{DEP} \rangle = 2 * \pi * \epsilon_m * r^3 * \left[\Re(K_{CM}) * \nabla(E_x^2 + E_y^2 + E_z^2) + \Im(K_{CM}) * (E_x^2 \nabla \phi_x + E_y^2 \nabla \phi_y + E_z^2 \nabla \phi_z) \right] \quad I.19$$

Où ϕ est la phase du champ électrique AC.

Typiquement, les configurations d'ondes mobiles utilisent un réseau d'électrodes linéaires comme le montre la figure I.16. Dans ce cas, les électrodes sont pilotées par des signaux de tension alternative, chaque électrode ayant un décalage de phase constant par rapport à son voisin. Cela provoque l'uniformité de l'amplitude du champ électrique le long de l'axe des abscisses x. De plus, en raison de la symétrie, l'amplitude du champ électrique le long de l'axe z est également constante, donc :

$$\nabla E_x^2 = \nabla E_z^2 = 0 \quad I.20$$

De même, la phase du champ est constante autour des axes y et z, donc :

$$\nabla \phi_y^2 = \nabla \phi_z^2 = 0 \quad I.21$$

Par conséquent, l'équation de la force moyenne par diélectrophorèse par ondes mobiles est :

$$\langle \vec{F}_{DEP} \rangle = 2 * \pi * \epsilon_m * r^3 * [\Re(K_{CM}) * \nabla(E_y^2) + \Im(K_{CM}) * (E_x^2 \nabla \phi_x)] \quad 1.22$$

Donc les forces de diélectrophorèse par ondes mobiles sont constituées d'un composant de l'axe des y qui fait léviter la particule verticalement avec une force proportionnelle au gradient d'amplitude du champ et une force horizontale qui déplace la particule le long de l'axe des x avec une force proportionnelle au produit de l'intensité du champ électrique et du gradient de phase. Pour le cas illustré à la figure 1.8, le gradient de phase est égal à $2\pi / 4d$ radians par mètre, où d est le pas entre les électrodes. En termes plus généraux, l'équation 1.22 peut aussi être exprimée simplement en termes de ses deux composantes de force primaires :

$$\langle \vec{F}_{DEP} \rangle = \vec{F}_{DEPy} + \vec{F}_{TWDEPx} \quad 1.23$$

Où $\vec{F}_{DEPy}$ est généralement appelé composante de force de la diélectrophorèse (DEP) [59] et $\vec{F}_{TWDEPx} = \vec{F}_{TWDEPx}$ est connue sous le nom de composante de force de diélectrophorèse d'onde progressive (TWDEP).

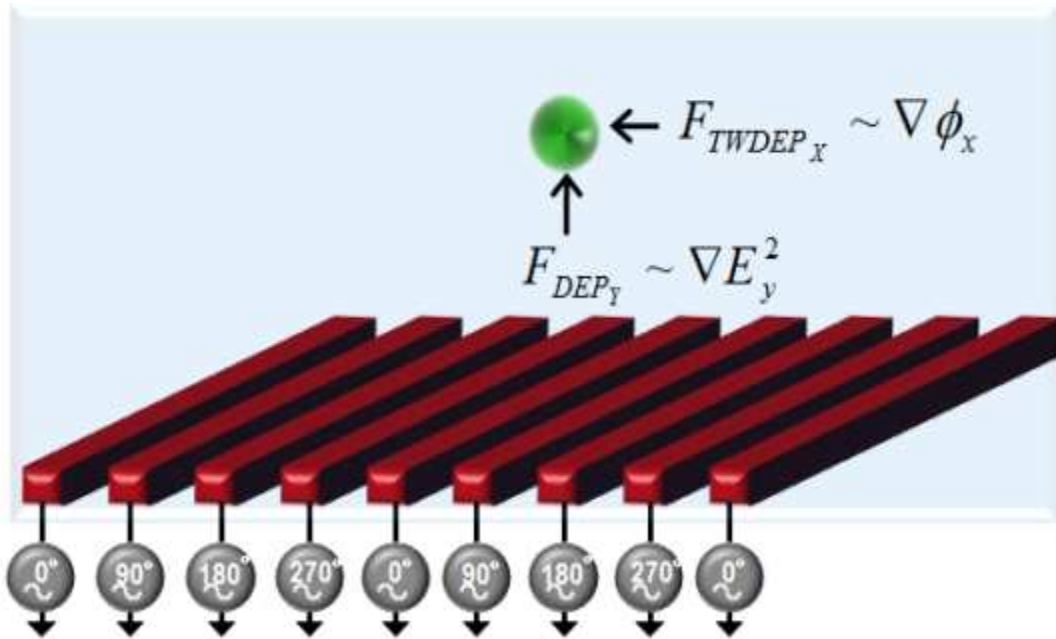


Figure 1.8 : Configuration de l'électrode utilisée pour la diélectrophorèse en ondes mobiles

La diélectrophorèse par ondes progressives est également dépendante de la fréquence, encapsulée par le facteur Clausius-Mossotti.

La composante verticale de la force est proportionnelle à la partie réelle de K_{cm} ($\Re(K_{CM})$) et la composante horizontale est proportionnelle à sa partie imaginaire ($\Im(K_{CM})$).

Les figures I.9 et I.10 montrent des spectres typiques pour les parties réelles et imaginaires du facteur Clausius-Mossotti pour une particule homogène. Ces spectres auront des caractéristiques uniques en fonction du type de particule, mais en général, il y a certaines caractéristiques de la partie imaginaire du Clausius-Mossotti qui le rendent tout à fait différent de la partie réelle.

Dans la plupart des cas, l'amplitude de la partie imaginaire tend vers zéro aux hautes et basses fréquences, et la magnitude atteint des pics à des fréquences correspondant aux points d'inflexion dans la partie réelle du facteur de Clausius-Mossotti. Ces fréquences sont communément appelées fréquences de croisement.

En termes de manipulation de particules, ceci impose que la gamme de fréquence dans laquelle les particules présentent un mouvement latéral sur l'axe des abscisses soit beaucoup plus étroite qu'avec la diélectrophorèse traditionnelle. De plus, contrairement à son homologue réel, dans la plupart des cas, la partie imaginaire du facteur Clausius-Mossotti ne peut changer de signe en fonction de la fréquence, ce qui signifie que pour un gradient de phase donné, différentes particules se déplaceront latéralement dans la même direction.

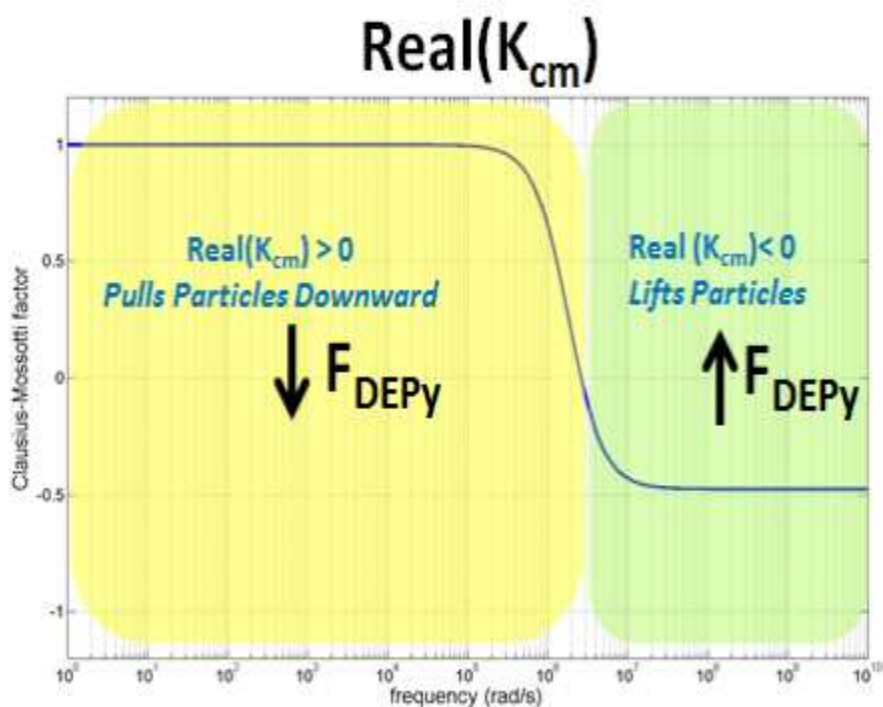


Figure I.9 : Spectre typique pour la partie réelle du facteur de Clausius-Mossotti pour une particule homogène

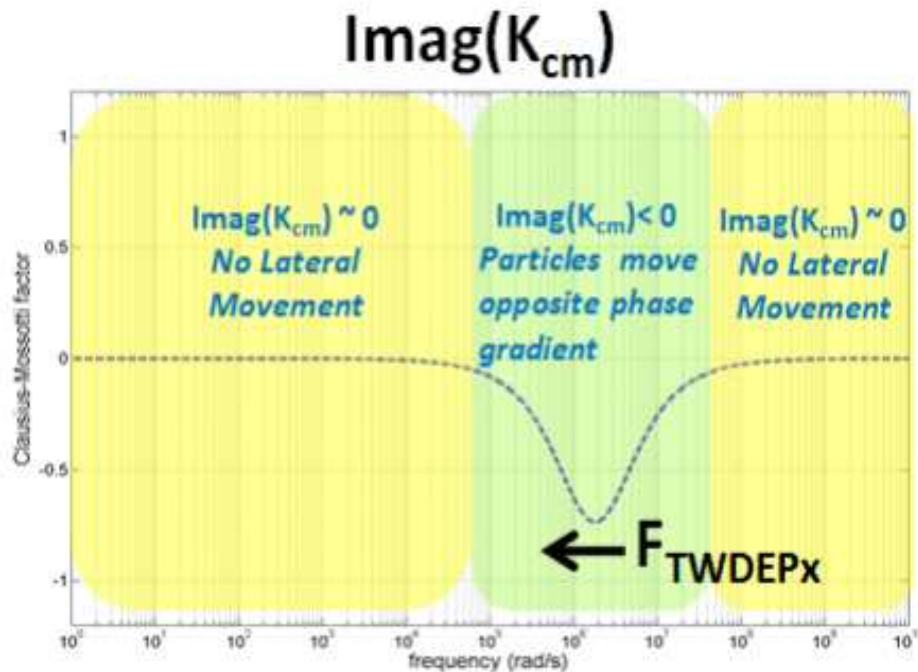


Figure I.10 : Spectre typique de la partie imaginaire du facteur de Clausius-Mossotti pour une particule homogène

La diélectrophorèse par ondes mobiles présente un certain nombre d'avantages par rapport à la diélectrophorèse AC conventionnelle.

Tout d'abord, elle offre un niveau supérieur de contrôle de mouvement. Avec la diélectrophorèse par ondes mobiles, les composantes de force en phase et hors phase sont simultanément exercées sur les particules, permettant un contrôle précis du mouvement des particules autour de deux axes.

Un autre avantage de la diélectrophorèse par ondes mobiles est que les séparations de particules réalisées avec cette méthode présentent un degré de sélectivité supérieur à celui de la diélectrophorèse AC traditionnelle car l'incorporation de la partie imaginaire du facteur Clausius-Mossotti ajoute un facteur de différenciation supplémentaire.

I.2.3.2. Procédés basés sur la diélectrophorèse pour séparer des particules

Il existe de nombreuses méthodes de séparation des particules basées sur la diélectrophorèse dans la littérature, chacune avec ses propres avantages et limites [60,61].

La plupart des techniques fonctionnent en exerçant simultanément des forces de signe opposé sur des particules de types différents, ce qui les amène à être attirées ou repoussées d'un endroit particulier [62,63]. Ces techniques sont connues sous le nom de méthodes d'affinité diélectrophorèse différentielle (figure I.11). Elles fonctionnent en réglant la fréquence du champ électrique à une valeur qui est entre les fréquences de croisement de deux types de particules dissemblables.

Dans le cas de la diélectrophorèse AC, les particules d'un type subissent une diélectrophorèse positive et se déplacent vers les maxima du champ local, alors que l'autre type subit une diélectrophorèse négative et est éloigné des maxima.

Dans le cas de la diélectrophorèse par ondes mobiles, les séparations d'affinité sont réalisées en fonctionnant à des fréquences telles que la partie imaginaire du facteur Clausius-Mossotti présente des signes différents pour les types de particules et se déplace latéralement dans des directions opposées. Dans les deux cas, ces fréquences n'existent pas toujours.

En raison de sa simplicité, les méthodes d'affinité peuvent être très efficaces si les propriétés électriques des deux types de particules sont très différentes et ont des fréquences de transition significativement différentes. Cependant, il existe des limitations s'il n'y a pas de différence significative dans les caractéristiques électriques des particules.

Les méthodes d'affinité de diélectrophorèse différentielle reposent fortement sur une sélection minutieuse des solutions tampons. Les équations (I.17) et (I.18) montrent qu'il est nécessaire d'ajuster la permittivité et la conductivité de la solution de sorte que les réponses en fréquence des particules de types différents aient des signes différents à une fréquence donnée. Cela devient impossible si les particules sont trop similaires. De plus, dans des applications réelles, il peut ne pas y avoir la liberté d'ajuster la conductivité du tampon. Par exemple, dans de nombreux essais, en raison de biocompatibilité, il est nécessaire de placer les cellules dans un tampon de pH et / ou de concentration ionique très spécifique.

Un autre gros inconvénient des méthodes d'affinité diélectrophorèse est qu'elles ne peuvent pas supporter des séparations avec plus de deux types de particules pour un tampon donné.

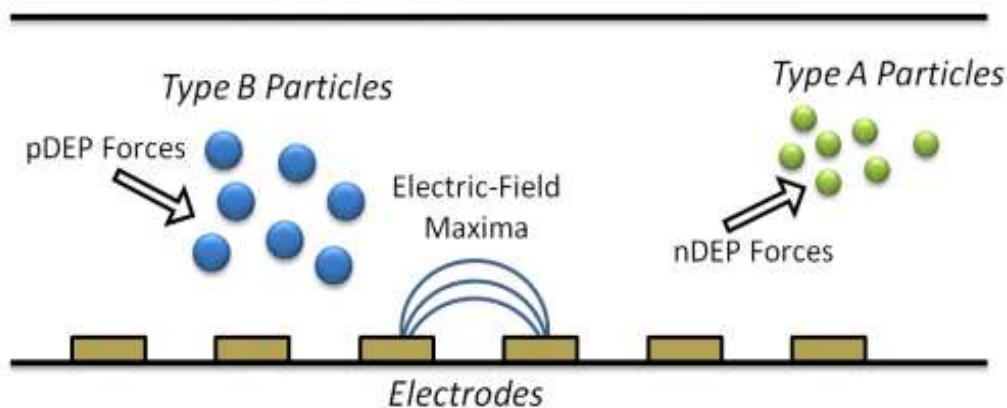


Figure I.11 : Séparation de particules par affinité diélectrophorétique différentielle. Les particules de type A sont repoussées des maxima locaux du champ E par des forces de diélectrophorèse négatives tandis que les particules de type B subissent simultanément une diélectrophorèse positive et y sont attirées [56]

Une autre classe populaire de techniques de séparation par diélectrophorèse est basée sur le fractionnement du flux de champ (figure I.12), où les forces diélectrophorétiques sont utilisées conjointement avec les forces de traînée fluide pour fractionner un échantillon [64].

Un flux continu entraîné par la pression est utilisé pour transporter des échantillons au-dessus d'un réseau d'électrodes. Les forces de diélectrophorèse sont appliquées en conjonction avec cet écoulement et provoquent un déplacement à des vitesses différentes des particules ayant des propriétés électriques différentes.

Au fil du temps, les particules migrent en fonction du type. Cette approche a l'inconvénient de nécessiter des micro-fluidiques complexes. Il est également déraisonnable d'utiliser cette technique pour séparer des particules de composition similaire.

Si les types sont presque identiques, alors ils vont voyager à la même vitesse, ce qui signifie qu'ils doivent voyager pour une très longue distance avant que toute séparation distincte puisse être observée.

Une conséquence de ceci est que la taille du réseau d'électrodes utilisé doit croître lorsque la différence électrique relative entre les particules diminue. Si les différences sont trop faibles, le nombre d'électrodes requis serait déraisonnable.

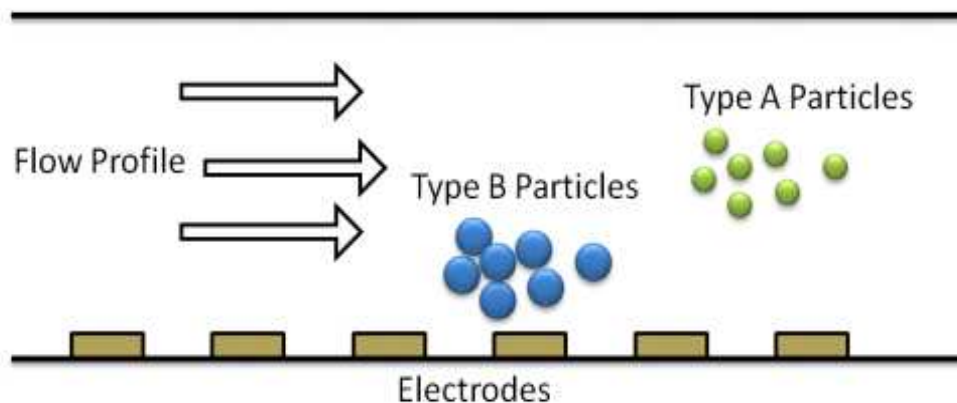


Figure I.12 : Séparation des particules par fractionnement sur le terrain. En raison des différences de caractéristiques électriques, les particules de type A se déplacent nettement plus vite que le type B et se séparent de celles-ci [56]

I.2.3.4. Caractérisation diélectrophorétique de particules

La clé de l'utilisation de la diélectrophorèse comme moyen de séparation des particules consiste à avoir des modèles précis de la réponse des particules d'un certain type en présence d'un champ électrique alternatif.

Cette réponse est caractérisée par le facteur Clausius-Mossotti, KCM . Ce dernier détermine l'amplitude et la direction de la force diélectrophorétique exercée sur les particules en fonction de la fréquence et de la phase du champ.

Puisque les propriétés du champ et du milieu sont typiquement contrôlées, une connaissance précise du KCM peut être utilisée comme un moyen pour caractériser la réponse en fréquence individuelle d'une particule.

Il existe un grand nombre de types de particules et une grande variété de modèles analytiques qui peuvent être utilisés pour modéliser leurs propriétés diélectriques.

1.2.4. Applications de la diélectrophorèse

La diélectrophorèse peut être utilisée pour manipuler, transporter, séparer et trier différents types de particules [55]. Puisque les cellules biologiques ont des propriétés diélectriques, la diélectrophorèse [65,66] a de nombreuses applications médicales. Des prototypes qui séparent les cellules cancéreuses des cellules saines ont été réalisés [67]. Les plaquettes ont été séparées du sang total avec un trieur de cellules DEP activé [68]. Le DEP est utilisé dans des domaines tels que le diagnostic médical, la découverte de médicaments, la thérapie cellulaire et la filtration des particules.

Le plus d'efforts dans l'étude du DEP a été orienté vers la satisfaction des besoins non satisfaits dans les sciences biomédicales.

Le DEP a permis de caractériser et de manipuler des particules biologiques comme les cellules sanguines, les cellules souches, les neurones, les cellules β du pancréas, l'ADN, les chromosomes, les protéines et les virus.

Le DEP peut être utilisé pour séparer des particules ayant des polarisabilités de signe différentes lorsqu'elles se déplacent dans des directions différentes à une fréquence donnée du champ AC appliqué. Le DEP a été appliqué pour la séparation des cellules vivantes et mortes, les cellules vivantes restantes après la séparation [69], les cellules cancéreuses du sang, les souches de bactéries, le virus [70,71] du sang et les globules rouges et blancs. Le DEP peut également être utilisé pour détecter l'apoptose peu de temps après l'induction du médicament en mesurant les changements dans les propriétés électro-physiologiques [72].

L'utilisation de matériaux photoconducteurs permet l'induction localisée des forces diélectrophorétiques par l'application de la lumière. De plus, on peut projeter une image pour induire des forces dans une zone d'illumination à motifs, permettant des manipulations complexes. Lors de la manipulation de cellules vivantes, la diélectrophorèse optique fournit une alternative non dommageable aux pinces optiques, car l'intensité de la lumière est environ 1000 fois inférieure.

Les dispositifs basés sur le DEP offrent plusieurs avantages clés par rapport aux méthodes traditionnelles qui rendent le DEP particulièrement attrayant pour la séparation des bio-agents, notamment : (1) faible consommation d'énergie, (2) haute viabilité, haute efficacité, séparations à haute résolution, (3) degré d'adaptabilité pour diverses menaces, et (4) applicabilité aux virus et aux toxines [73].

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons passé en revue des notions élémentaires et principales du transport pneumatique et les ondes mobiles.

Le transport pneumatique est l'un des procédés industriels qui confère le plus de charge électrique aux solides divisés. Cette charge reste en général une nuisance pouvant par exemple influencer la coulabilité, créer des décharges ou même des explosions dans les conduits. Lors de l'écoulement d'une poudre dans une conduite, ces contacts peuvent être de nature particule-particule ou particule-paroi. En ce qui concerne l'opération du transport pneumatique en phase diluée, les collisions particule-paroi jouent un rôle prédominant.

La diélectrophorèse (DEP) utilise la polarisabilité d'objets à l'échelle colloïdale diélectrique pour piloter leurs mouvements sous un champ électrique alternatif non uniforme. Il permet une approche réversible et non invasive de la manipulation de particules colloïdales. Le DEP exige que les particules aient une taille comprise entre des centaines de nanomètres et des dizaines de micromètres et une constante diélectrique opposée au milieu liquide, ce qui pourrait alors permettre une manipulation relativement sophistiquée d'une grande variété d'objets à l'échelle colloïdale, tels que des cellules, des micro-organismes, colloïdes polymères, et beaucoup plus. Cette capacité unique fait du DEP un excellent outil pour des applications dans des domaines tels que la recherche biomédicale et la science des matériaux.

Le chapitre suivant présentera principalement le logiciel LABVIEW que nous avons utilisé dans ce travail pour mener à bien cette étude. Une liste non exhaustive des définitions sur l'instrumentation virtuelle sera aussi décrite.

CHAPITRE II : INSTRUMENTATION VIRTUELLE

CHAPITRE II : INSTRUMENTATION VIRTUELLE

Un système de matériel possède des caractéristiques propres qui ne sont jamais entièrement conformes aux valeurs théoriques et qui sont très difficiles à reproduire. L'instrumentation virtuelle se distingue d'une simulation par la réalisation des expérimentations matérielles dans des conditions réelles et en tenant compte des facteurs physiques qui interviennent. Par rapport à la simulation, la validité des résultats est intrinsèque [1].

Pour faire un suivi en ligne des expériences du transport pneumatique et des ondes mobiles, on a utilisé des dispositifs semi-automatiques en mariant le virtuel et la réalité, c'est-à-dire relié les dispositifs expérimentaux à l'ordinateur tout en faisant le contrôle, le traitement et l'analyse des données en même temps que les expériences.

II.1. Instrumentation virtuelle

Destiné aux ingénieurs et aux scientifiques, un instrument de mesure traditionnel est un appareil qui consiste à afficher, dans une unité de mesure choisie, la valeur numérique de la grandeur physique mesurée.

Par une approche établie depuis le milieu des années quatre-vingt, l'instrumentation virtuelle repose sur l'association d'un logiciel personnalisable et d'un matériel de mesure modulaire multifonction. Elle permet de créer des systèmes de mesure définis par les utilisateurs, appelés instruments virtuels [74].

II.1.1. Définition de l'instrumentation virtuelle

L'instrumentation virtuelle utilise intensivement la représentation graphique. Au lieu d'instruments de mesure, l'utilisation d'un ordinateur est indispensable pour modifier, contrôler les paramètres d'une expérimentation, traiter les données et afficher les résultats. Cet aspect apporte une souplesse de fonctionnement considérable et un coût beaucoup moins élevé qu'avec des instruments conventionnels.

Un instrument virtuel se subdivise en quatre parties : un ordinateur personnel, un logiciel spécifique, une interface de communication normalisée et un équipement de matériel pour l'acquisition de données ou le contrôle d'appareils [1].

Les étapes de l'utilisation de l'instrument virtuel (figure II.1) :

- a) La transformation des variables physiques d'un système en signaux électriques qui sont amplifiés et filtrés avant d'être converti en données numériques pour le traitement et l'analyse avec un ordinateur. Pour le contrôle, c'est une autre procédure puisque les signaux électriques sont transformés en données en provenance de l'ordinateur.
- b) L'utilisation d'un lien de communication matériel et un logiciel standardisé pour recevoir ou transmettre les données.
- c) La filtration et l'analyse des données pour en extraire l'information pertinente et faire l'enregistrement des résultats au besoin.
- d) Les données recueillies et analysées sont présentées de façon graphique et numérique pour gérer l'acquisition des données et le contrôle du système physique [1].

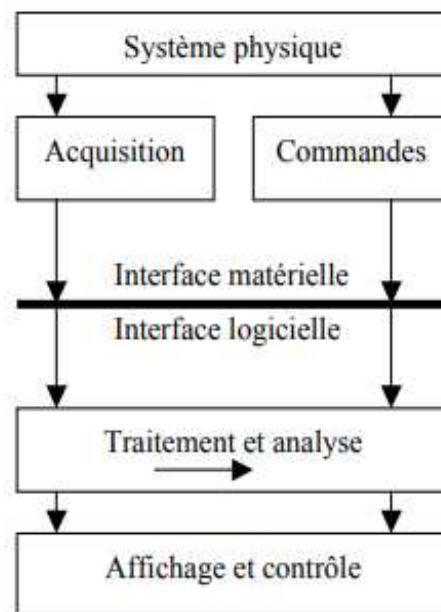


Figure II.1: Etapes de l'utilisation de l'instrument virtuel

II.1.2. Avantages de l'instrumentation virtuelle

Les avantages par rapport à un système conventionnel sont nombreux dont on peut citer :

- Une représentation graphique élaborée et un affichage simple et facile à manipuler.
- Une transparence complète avec le matériel. La communication avec le matériel est standardisée.
- Une grande souplesse de manipulation et une grande capacité d'analyse des éléments du système physique.
- Un coût très bas et une grande facilité d'adaptation à différentes situations.

- Une très grande modularité.
- Une intégration naturelle au travail en réseau et à distance [1].

II.1.3. L'instrumentation virtuelle et le transfert des connaissances

La perspective cognitiviste, dont l'appellation renvoie au terme cognition (connaissance dans le sens de processus et de produit) privilégie l'étude du fonctionnement de l'intelligence, de l'origine de nos connaissances ainsi que des stratégies employées pour assimiler, retenir et réinvestir les connaissances. Elle s'intéresse essentiellement à la perception, le traitement en mémoire, le langage et ce, en regard du fonctionnement du cerveau.

Le cognitivisme et les connaissances sont catégorisés en trois niveaux :

1. les connaissances déclaratives : les faits, les règles, les lois et les principes ;
2. les connaissances procédurales : les étapes pour réaliser une action ;
3. les connaissances conditionnelles : le quand et le pourquoi d'une action.

Les connaissances conditionnelles correspondent à la structuration des savoirs, elles servent au transfert des connaissances d'une situation à une autre ou d'un contexte à un autre, elles déterminent l'action la plus adéquate à appliquer pour résoudre un problème dans des contextes différents, selon Tardif [1].

II.1.4. Démarche heuristique et interactivité

L'instrumentation virtuelle favorise la formulation d'hypothèses et la création de modèles en permettant d'en faire immédiatement la vérification et la validation. Elle permet de développer l'intuition et la démarche heuristique (l'heuristique est la psychologie de la découverte, abordée par différents mathématiciens).

Selon Bruner " La démarche heuristique est une méthode non rigoureuse de solution d'un problème par rapport à la méthode analytique qui consiste à suivre rigoureusement un algorithme. Dans bien des cas, un algorithme n'est pas disponible tandis que l'on peut toujours faire appel à une démarche heuristique et cette dernière permet souvent de découvrir plus rapidement une solution [75] ".

II.2. logiciel LABVIEW

LABVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) est un langage de programmation dédié au contrôle d'instruments et l'analyse de données. Contrairement à la nature séquentielle des langages textuels, LABVIEW est basé sur un environnement de programmation graphique utilisant la notion de flot de données pour ordonnancer les opérations [76].

L'idée de LABVIEW est de remplacer les instruments de mesures et d'analyse d'un laboratoire par un ordinateur muni de cartes spécifiques et d'un logiciel approprié. Ces cartes permettent de convertir des signaux électriques provenant de capteurs en données numériques. LABVIEW contient une gamme d'outils pour l'acquisition, l'analyse, l'affichage et l'enregistrement des données, ainsi que des outils pour l'aider à mettre au point le programme [77].

II.2.1. Création d'un VI

Les VI, sigle de "Instruments Visuels", comportent trois parties : la face avant, le diagramme ainsi que l'icône et son connecteur.

II.2.1.1. Face avant

La face avant comporte des indicateurs et des contrôles qui sont les entrées et les sorties du VI.

Les boutons poussoirs ou rotatifs sont par défaut des contrôles. Les graphiques, voyants, vumètres sont par défaut des indicateurs.

Les contrôles simulent les entrées des instruments virtuels et fournissent les données au diagramme. Les indicateurs simulent la réponse des instruments et affichent les données acquises ou engendrées par les VIs.

- **Contrôles et indicateurs numériques**

Les deux objets les plus couramment utilisés sont les contrôles et les indicateurs numériques, représentés par la figure II.2.



Figure II.2 : Contrôles et indicateurs

Pour saisir ou modifier la valeur d'un contrôle numérique, on peut utiliser les flèches d'incrément ou entrer une valeur avec l'outil texte.

- **Contrôles et indicateurs booléens**

À utiliser pour saisir et afficher des valeurs binaires. Les objets booléens les plus communs sont les interrupteurs à bascules et les diodes LED.

- **Configuration des contrôles et des indicateurs**

Pour configurer les contrôles et indicateurs, on utilise leur menu contextuel, accessible par un clic droit sur l'objet concerné.

II.2.1.2. Diagramme

Le diagramme est composé de nœuds, terminaux, connexions comme le montre la figure II.3 :

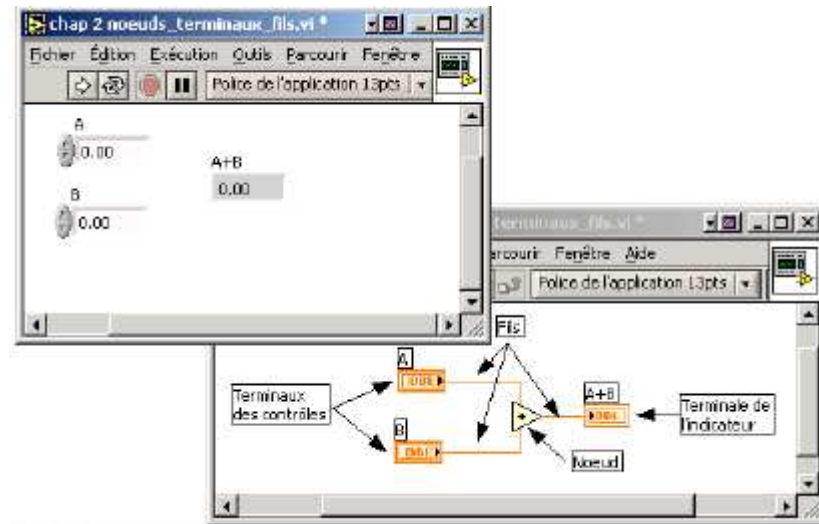


Figure II.3 : Contrôles et leurs terminaux

II.2.1.3. Nœuds

Les nœuds sont des objets sur le diagramme. Ils possèdent des entrées et/ou des sorties et effectuent des tâches spécifiques lorsqu'un VI fonctionne. Ils sont équivalents à des fonctions dans les langages textuels.

II.2.1.4. Terminaux

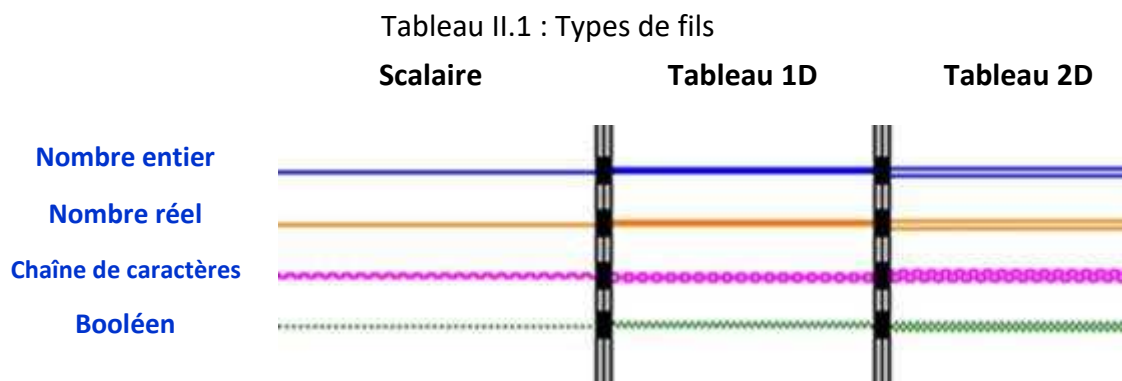
Les objets situés dans la face avant apparaissent comme des terminaux dans le diagramme. Les terminaux reflètent le type de données du contrôle ou de l'indicateur. Ainsi le terminal situé ci-dessous représente un contrôle numérique, défini comme un réel en double précision.

Les terminaux sont des ports de communication entre la face avant et le diagramme. Ils sont équivalents aux paramètres et aux constantes dans les langages textuels. Les données rentrées dans les contrôles de la face avant entrent dans le diagramme par les terminaux. La fonction addition produit une nouvelle donnée qui arrive sur le terminal de l'indicateur et s'affiche dans la face avant.

Les connecteurs des opérateurs peuvent être visualisés en sélectionnant l'option terminale visible du menu contextuel.

II.2.1.5. Fils

Les fils transfèrent les données dans le diagramme, ils sont ainsi analogues aux variables dans les langages textuels. Chaque fil provient d'une seule source mais peut être réuni à beaucoup de VIs ou de fonctions destinées à les traiter.



II.2.2. Création d'un sous-VI

Après avoir créé un VI, son icône et son connecteur, il est possible de l'utiliser dans un autre VI. Un VI inclus dans un autre VI est appelé sous VI. Il correspond à une fonction dans un langage textuel.

Le nœud d'appel du sous VI correspond à l'appel de la fonction. L'usage de sous VI augmente la lisibilité, la réutilisation de code et le débogage.

La comparaison entre le code de la figure II.4 et le diagramme montre l'analogie entre les approches.

Function Code	Calling Program Code
<pre>function average (in1, in2, out) { out = (in1 + in2) / 2.0; }</pre>	<pre>main { average (point1, point2, pointavg) }</pre>
SubVI Block Diagram	Calling VI Block Diagram

Figure II.4 : Sous VI = fonction

II.2.2.1. Icône et connecteur

Après avoir créé une face avant et son diagramme, il faut personnaliser l'icône associée et son connecteur.

II.2.2.2. Création de l'icône

Chaque VI possède une icône dans le coin supérieur droit de la face avant et du diagramme. L'icône est la représentation graphique du VI. Si un VI est utilisé en tant que sous VI, il est identifié par son icône.

L'icône par défaut est représentée à gauche. On doit utiliser l'éditeur d'icône pour personnaliser l'icône en sélectionnant **Editer** l'icône dans le menu contextuel de l'icône par défaut.

On utilise aussi les outils situés sur la droite pour concevoir l'icône dans la zone d'édition. L'éditeur d'icônes permet de concevoir des icônes à partir de motifs prédéfinis, d'ajouter du texte, des images d'une bibliothèque, de concevoir l'icône à partir de plusieurs couches avec des transparences.

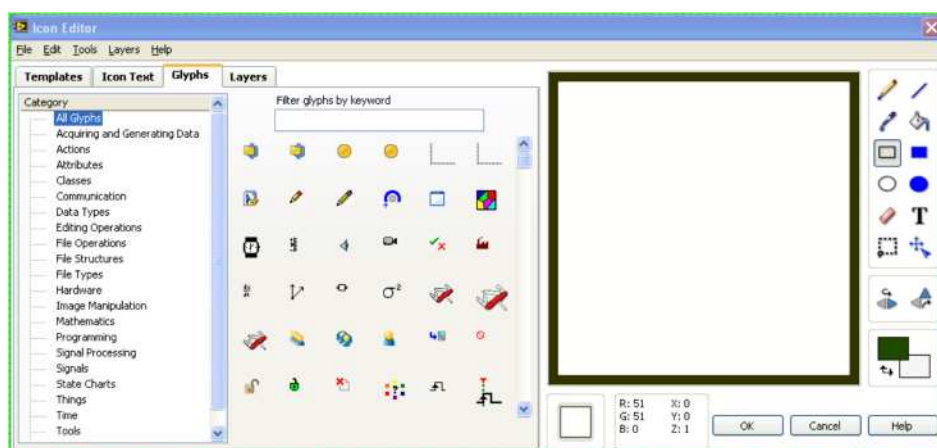


Figure II.5 : Editeur d'icônes

II.2.2.3. Définition du connecteur

Pour utiliser un sous VI il faut définir un connecteur. Le connecteur est un ensemble de terminaux qui correspondent à tout ou une partie des contrôles et indicateurs du VI à la façon des paramètres passés dans l'appel d'une fonction en langage textuel. Le connecteur définit ainsi les entrées/sorties du VI.

Pour visualiser les bornes du connecteur, on doit effectuer un clic droit sur l'icône dans la face avant, choisir l'option **Visualiser** le connecteur. Chaque rectangle sur le connecteur représente une connexion. Le nombre de connexions par défaut est égal au nombre de contrôles et d'indicateurs de la face avant.

II.2.2.4. Création d'un sous VI à partir d'une sélection

Il est possible de créer un sous VI en sélectionnant une partie de diagramme. LABVIEW crée automatiquement un sous VI contenant les contrôles et les indicateurs nécessaires. D'un point de vue conceptuel il ne semble pas que cette fonctionnalité fournisse un code bien réfléchi !

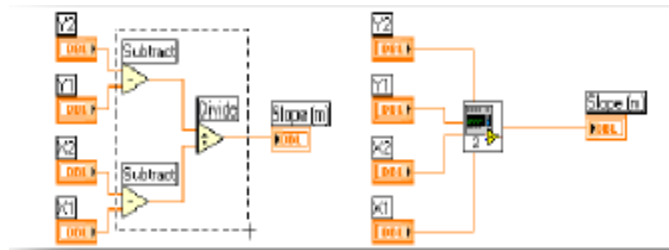


Figure II.6 : Création d'un sous VI à partir d'une sélection

II.2.3. Boucles

II.2.3.1. Boucle de répétition conditionnelle (while)

Elle est identique à une structure de type Faire...Répéter tant que, la boucle "While" exécute le code contenu dans son cadre tant qu'une condition est Vraie ou Fausse.

La souris est utilisée pour définir la zone de code à répéter. Lors du relâchement du bouton de la souris, la zone sélectionnée, enfermée à l'intérieur de la structure sera répétée. Il est possible d'enrichir le code contenu dans la boucle en y déposant d'autres VIs, fonctions ou structures.

La condition d'arrêt, présentée ci-dessous, permet de contrôler l'exécution de la boucle. La condition par défaut est de continuer si c'est vrai. D'un clic droit il est possible d'inverser cette condition.

- **Graphes déroulants**

Les graphes déroulants (figure II.7) sont des indicateurs numériques destinés à afficher l'évolution d'une (ou plusieurs) variable(s) sur une (ou plusieurs) courbe(s). L'axe des abscisses X a donc, pour échelle, un numéro d'ordre d'arrivée du point. Les graphes déroulants sont situés dans la palette **Graphes**.

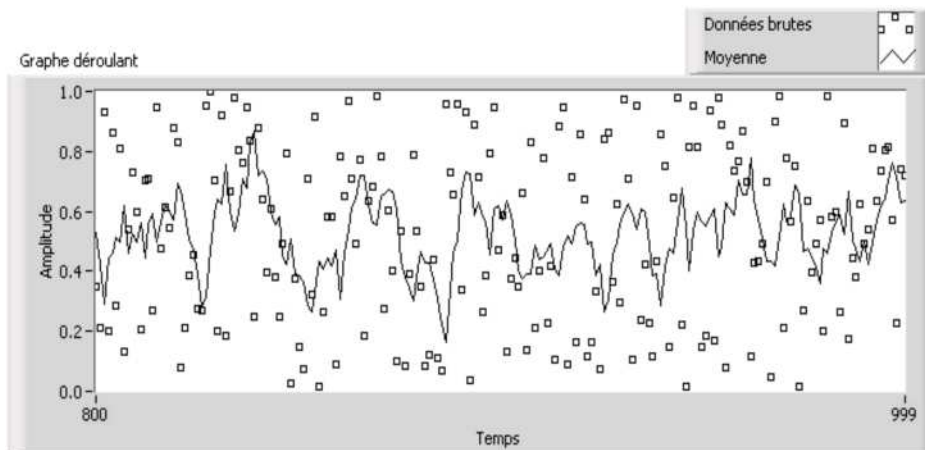


Figure II.7 : Graphe déroulant

- **Registres à décalages**

Les registres à décalages sont présents uniquement dans les boucles, et permettent à une itération I , de connaître la valeur d'une variable évaluée à l'itération $I-1$ (mais aussi $I-2$, $I-3...$).

Les registres à décalage apparaissent sous la forme d'une paire de terminaux. Le registre de droite reçoit des données de l'intérieur de la boucle, ces données sont transférées au registre de gauche au début de l'itération suivante. Le registre de gauche est alors une source de données pour les éléments de l'intérieur de la boucle.

L'illustration de la figure II.8 montre le fonctionnement du registre à décalage :

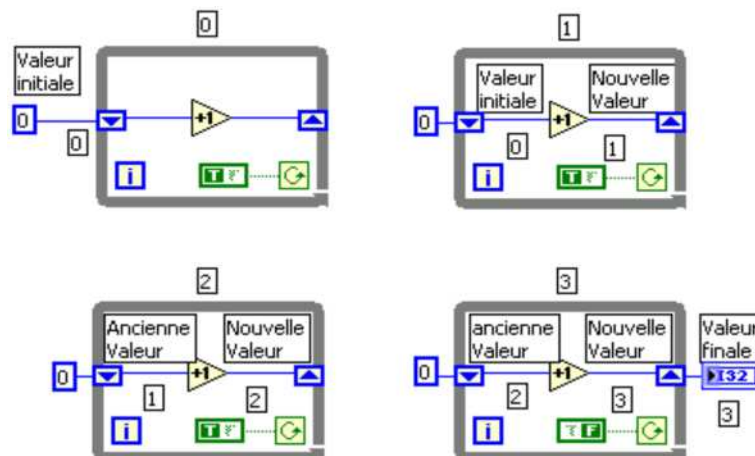


Figure II.8 : Registres à décalage

- **Nœuds de rétroaction (feedback node)**

Si un grand nombre de registres à décalage est utilisé, le diagramme s'encombre rapidement. Il est possible de transformer les registres à décalages en nœud de rétroaction (figure II.9) par un clic droit sur le registre en sélectionnant **Remplacer** par un nœud de rétroaction.

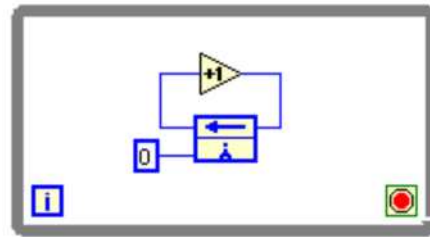


Figure II.9 : Nœuds de rétroaction (feedback node)

II.2.3.2. Boucles for

La boucle d'itération ou boucle for (figure II.10) exécute un nombre de fois déterminé la partie de diagramme qu'elle englobe. Une fois lancée, il est possible d'arrêter l'itération prématurément (équivalent du break), il faut au préalable afficher le terminal de condition d'arrêt avec un clic droit en bordure du cadre de la boucle.

L'entrée N correspond au nombre d'itérations à faire. Le terminal i correspond quant à lui, au numéro de l'itération en cours. La boucle suivante tire 100 nombres aléatoires.

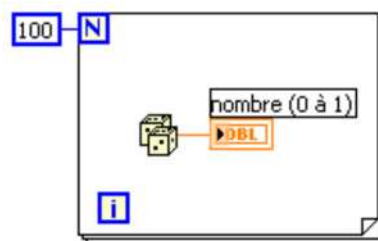


Figure II.10: Boucles for

II.2.4. Tableaux, graphes et clusters

II.2.4.1. Tableaux

Les tableaux sont des groupements ordonnés de données de même type. La dimension d'un tableau est le nombre d'indices définissant un élément : (1 dimension, le tableau contient 1 seule colonne, 2 dimensions : ligne/ colonne, 3 dimensions : ligne/ colonne/ profondeur...). Chaque élément est ainsi repéré de façon unique par ses coordonnées. Les tableaux peuvent contenir n'importe quel type d'éléments (diodes, interrupteurs...), excepté d'autres tableaux.

- **Boucles et tableaux 2D**

Pour construire un tableau 2D, il suffit d'imbriquer deux boucles FOR (figure II.11). La boucle intérieure crée les colonnes et la boucle extérieure crée les lignes. L'augmentation de l'épaisseur des fils de liaisons avec le nombre de dimensions du tableau. Le tableau 2D peut être également créé en ajoutant les lignes les unes aux autres.

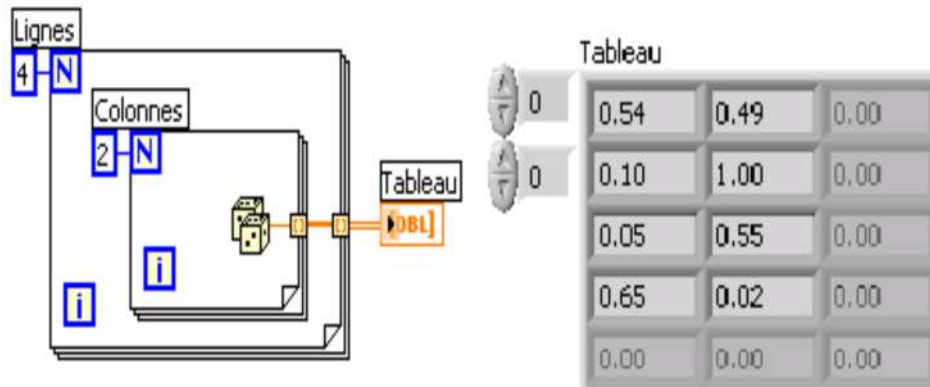


Figure II.11 : Boucles et tableaux 2D

II.2.4.2. Graphes en fonction du temps

Les VIs utilisant des graphiques collectent généralement les données dans des tableaux, les traitent puis les affichent. L'illustration de la figure II.12 montre les éléments d'un graphe :

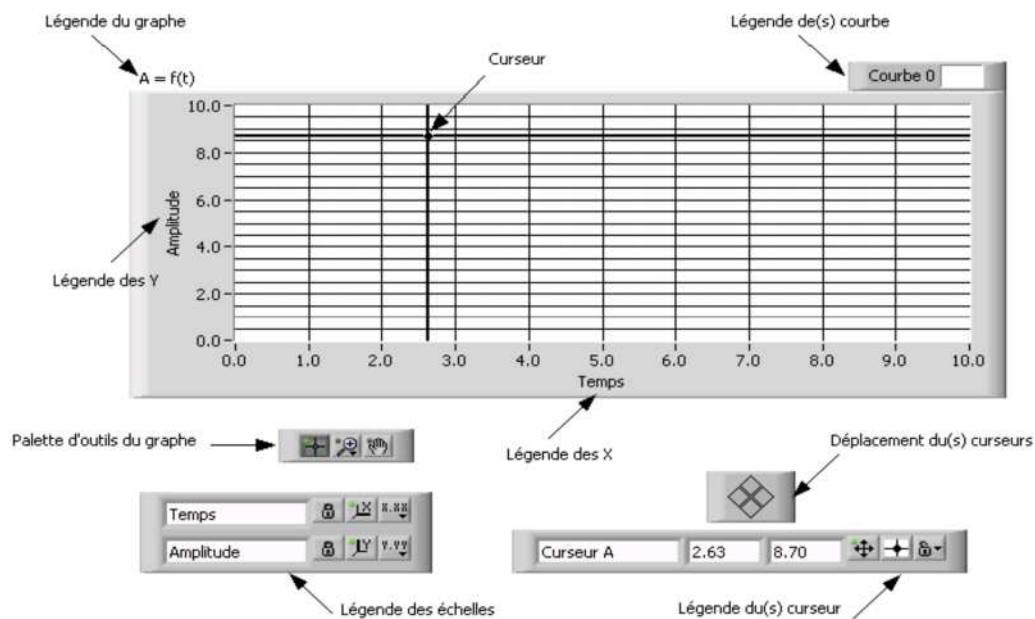


Figure II.12 : Graphes en fonction du temps

II.2.4.3. Clusters

Les clusters sont des assemblages d'éléments disparates qui sont l'équivalent des structures en langage C. Ils permettent de rassembler dans une même connexion des données de types différents ayant une relation plus ou moins proche entre elles (préférable pour l'analyse), par exemple Nom, Prénom, Âge.

Il est important d'utiliser les clusters pour deux raisons :

- Regrouper les données dans des ensembles structurellement cohérents ;

- Diminuer le nombre des connexions des VIs, limité à 28.

Remarques : Il est impossible de regrouper des contrôles et des indicateurs dans le même cluster. Il est possible d'assembler et de désassembler les éléments d'un cluster, soit comme en C, par leur nom, soit par leur ordre.

II.2.5. Structures de choix et séquences

II.2.5.1. Structure de choix

La structure de choix correspond à la structure " if...then...else " utilisée dans les langages textuels.

Elle comporte un sélecteur de choix dans sa partie centrale supérieure (le " case " du C) et une entrée de sélection (le " Switch " du C) en forme de point d'interrogation. Les flèches de part et d'autre du sélecteur de choix permettent de faire défiler les divers cas possibles.

Le code de chaque cas est écrit dans la case correspondante, une seule case est visible à la fois à l'écran, elle est détaillée à l'impression.

II.2.5.2. Séquences

Une séquence est un artifice pour imposer l'ordre d'exécution de VI n'ayant pas de liaison (s'il y avait des liaisons, l'ordre d'exécution serait imposé par le flux de données). Sur le plan graphique, son cadre ressemble à une diapositive, les diapositives sont placées les unes derrière les autres ; l'exécution commence par le code contenu dans la première (n°0) puis continue dans l'ordre 1, 2, 3...

Un sélecteur de séquences permet d'écrire le code dans la séquence choisie, il est possible d'enlever, d'ajouter, de déplacer des séquences par le biais du menu contextuel du sélecteur.

Il existe aussi des séquences " à plat " (figure II.13) qui offrent une vision plus claire des opérations séquentielles, mais plus encombrantes. Il est possible via le menu local de passer d'une représentation à l'autre.

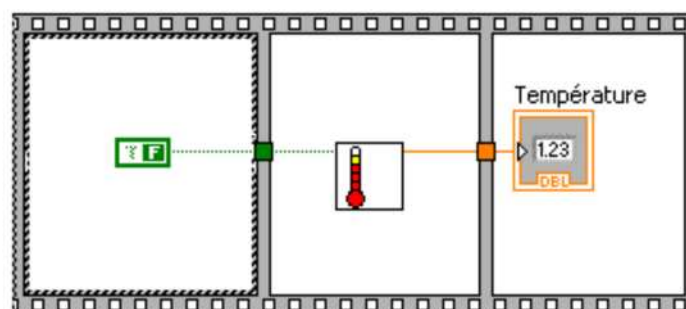


Figure II.13 : Séquences à plat.

II.2.6. Chaînes et entrées/sorties sur fichier

II.2.6.1. Chaînes

Les chaînes sont des suites de caractères ASCII, affichables ou non. Elles permettent de transférer facilement des données entre des matériels quelconques. Les fonctions principales dans cette optique sont :

- Créer et manipuler des chaînes.
- Convertir des nombres en chaînes et réciproquement.
- Enregistrer et lire des fichiers ASCII.

II.2.6.2. Entrées/sorties (E/S) sur fichier

Les fonctions E/S sur fichier permettent de gérer toutes les opérations sur fichiers, notamment :

- Ouverture/fermeture de fichiers ;
- Lecture/écriture ;
- Lecture/écriture au format tableur ;
- Déplacement, effacement, création de répertoires ;
- Changement d'attributs ;
- Gestion de fichiers de configuration (.ini).

II.3. Cartes utilisées avec dispositifs

LABVIEW intègre l'acquisition, l'analyse, le traitement et la présentation de données.

Pour l'acquisition de données et le contrôle d'instruments, LABVIEW supporte les standards RS-232/422, USB, IEEE 488 (GPIB) et VXI/PXI, ainsi que les cartes d'acquisition de données.

Pour l'analyse et le traitement des données, la bibliothèque d'analyse étendue contient les fonctions pour la génération et le traitement de signaux, filtres, fenêtres, statistiques, régression, algèbre linéaire et arithmétique matricielle.

LABVIEW intègre un grand nombre d'éléments de présentation tels les graphes déroulants, les graphes XY, les abaques de Smith, jauges, cadrans à aiguille...

Pour acquérir des données et les faire traiter, il faut relier l'ordinateur aux instruments de mesure par des cartes ou des ports USB.

Le matériel connecté utilisé dans les dispositifs expérimentaux débouche sur :

II.3.1. Carte GPIB (General Purpose Interface Bus)

Le bus GPIB a été inventé par Hewlett-Packard en 1974 pour simplifier l'interconnexion des instruments de test avec les ordinateurs. Le nouveau bus HP-IB devait utiliser un câble standard pour interconnecter de multiples instruments à l'ordinateur. Chaque instrument devait avoir sa propre interface et devait savoir répondre à certaines commandes. Le bus GPIB a été formellement adopté en tant que standard IEEE 488 en 1978. Ce standard fut amélioré et a conduit à la norme IEEE 488.1, qui élimine le besoin de trouver le bon type de connecteur et détermine à quelle broche, chaque ligne de signal est connectée.

Le GPIB est donc un bus ainsi qu'un système d'interface très usité, de par le fait qu'il a été standardisé et qu'il couvre une large gamme de produits (figure II.14).



Figure II.14 : Carte GPIB

De plus, les extenseurs du bus GPIB lui permettent d'utiliser un grand nombre d'instruments en même temps, et ce, sur des distances de plus en plus longues, en gardant toujours un taux de transfert de données important : environ 1 M octets par seconde [78].

II.3.2. Port USB RS232

La transmission d'informations nécessite l'utilisation d'un langage commun (écrit ou oral) ou d'un code commun. Il en est de même pour la transmission d'informations numériques entre deux postes de travail ou entre un poste de travail et un équipement, ce qui nécessite l'utilisation de règles communes : type de liaison, " vitesse " de transmission, format des données transmises, détection d'erreurs ... Même si ce type de communication est peu à peu remplacé par l'USB, la liaison série de type RS232 est encore très utilisée dans l'industrie, mais aussi pour la configuration de matériels informatiques professionnels (figure II.15).

En effet, la plupart des composantes (commutateur administrable, routeur...) d'un système de gestion de réseau informatique professionnel contiennent une liaison série de type RS232 (figure II.15 –a-). Ceci permet, lors du "plantage" du système par exemple, aux techniciens et ingénieurs réseaux, d'intervenir en utilisant de simples commandes en lignes.

C'est la raison pour laquelle, se trouve encore la traditionnelle prise SUB-D mâle à 9 contacts (figure II.15 –b-) en façade des matériels réseaux professionnels [79].



Figure II.15 : Port série RS-232

De plus, le parc informatique des établissements devrait, pendant encore quelques années, permettre de mettre en œuvre ce type de connexion. Lorsqu'aucun microordinateur n'est équipé que d'une liaison série RS232, il est tout à fait possible d'obtenir une liaison série RS232 à partir d'un câble convertisseur USB/RS232 (figure II.16) [79].



Figure II.16 : Port série RS-232/USB.

II.3.3. Electromètre Keithley 6514

L'électromètre est un instrument propre à mesurer les différents degrés d'électricité qu'un corps peut avoir, il est néanmoins hors de doute qu'on peut juger par l'impression que font les étincelles, si l'électricité est forte ou faible [80].

L'électromètre modèle 6514 combine des capacités d'interfaçage flexibles avec une sensibilité de courant, la capacité de mesure de charge, la résolution et la vitesse qui sont égaux ou supérieurs aux électromètres antérieures. Le modèle 6514 intègre les interfaces IEEE-488, RS-232 et d'E/S numériques qui le rendent simple pour configurer les systèmes entièrement automatiques, les systèmes rapides pour les tests faible niveau (figure II.17).

- Bruit <1fA ;

- Impédance d'entrée $>200\text{T}\Omega$ pour les mesures de tension ;
- Mesure de charge de 10fC à $20\mu\text{C}$;
- Rapide - jusqu'à 1200 mesures/seconde ;
- Interfaces facilement avec les commutateurs, les ordinateurs et les gestionnaires de composants ;
- Annule facilement les offsets de tension et courant ;
- Sensibilité de courant, couplée avec charge basse tension ;
- Mesures de courant d'obscurité de photodiodes ;
- Mesure la charge transmise au toner pour photocopieur ;
- Mesures de dosimétrie des rayonnements.



Figure II.17: Electromètre Keithley 6514

II.3.4. Balance OHAUS AX423

L'Adventurer de OHAUS se présente comme la balance idéale, alliant caractéristiques innovantes à des capacités de pesage fonctionnelles et simples. Elle intègre toutes les applications nécessaires pour le pesage de routine et les activités de mesure. Équipée notamment d'un écran tactile couleur, d'applications de mise en conformité BPL/BPF, de deux ports USB et d'une cage de pesée astucieuse, l'Adventurer est la balance la plus complète de sa catégorie (Portée 420 g, précision 0.001 g, équipées d'une interface RS232) (Figure II.18).



Figure II.19 : Balance OHAUS AX423

II.3.5. Balance GM-500

C'est une balance digitale (figure II.20) de masse maximale 500 g, de précision 0,1 g et possède une liaison de RS232 avec l'ordinateur.



Figure II.20 : Balance GM-500

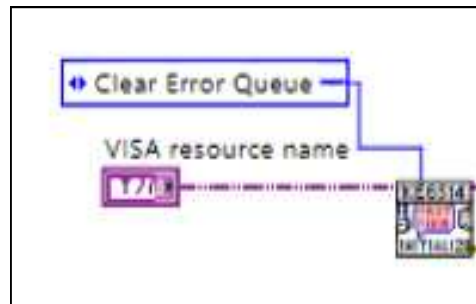
II.4. Programmes de LABVIEW utilisés dans les dispositifs

LABVIEW est un langage de programmation graphique qui utilise des icônes au lieu de lignes de texte pour créer des applications. À l'inverse des langages de programmation textuels dans lesquels des instructions déterminent l'exécution du programme, LABVIEW utilise une programmation par flux de données, ce flux déterminant l'exécution.

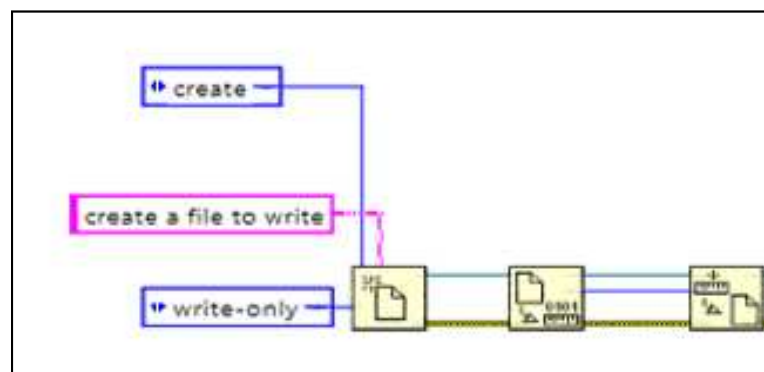
II.4.1. Programme développé pour le dispositif du transport pneumatique

➤ Le programme pour le dispositif du transport pneumatique Le programme est créé pour l'acquisition de la charge, la face-avant se compose de plusieurs parties (figure II.21) :

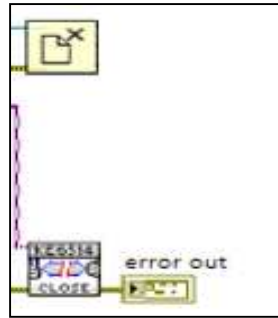
- La première partie est la détection de la carte GPIB qui est liée à l'instrument de mesure l'électromètre Keithley.



- La deuxième partie est la création d'un fichier pour l'enregistrement des données acquises.



- La troisième partie, constituée d'une boucle "while" dans les langages de programmation textuels, exécute le code qu'elle contient jusqu'à ce qu'une condition d'arrêt se produise.
- Dans Le code, il y'a l'acquisition de la charge et son déroulement dans un graphe après la création d'une phrase à l'aide de la fonction concaténation qui permet de joindre plusieurs chaînes (l'heure, la date et la charge) au sein d'une seule chaîne.
- La phrase est ensuite enregistrée dans le fichier créé, ce code est exécuté toutes les 100ms à l'aide d'une fonction.
- La quatrième partie est la fin de la programmation.



➤ Le diagramme (figure II.22) est constitué d'un graphe déroulant les données acquis ainsi que des indicateurs de la date, de l'heure, de l'erreur apparue lors de l'acquisition, de la charge et l'indicateur de la carte utilisée.

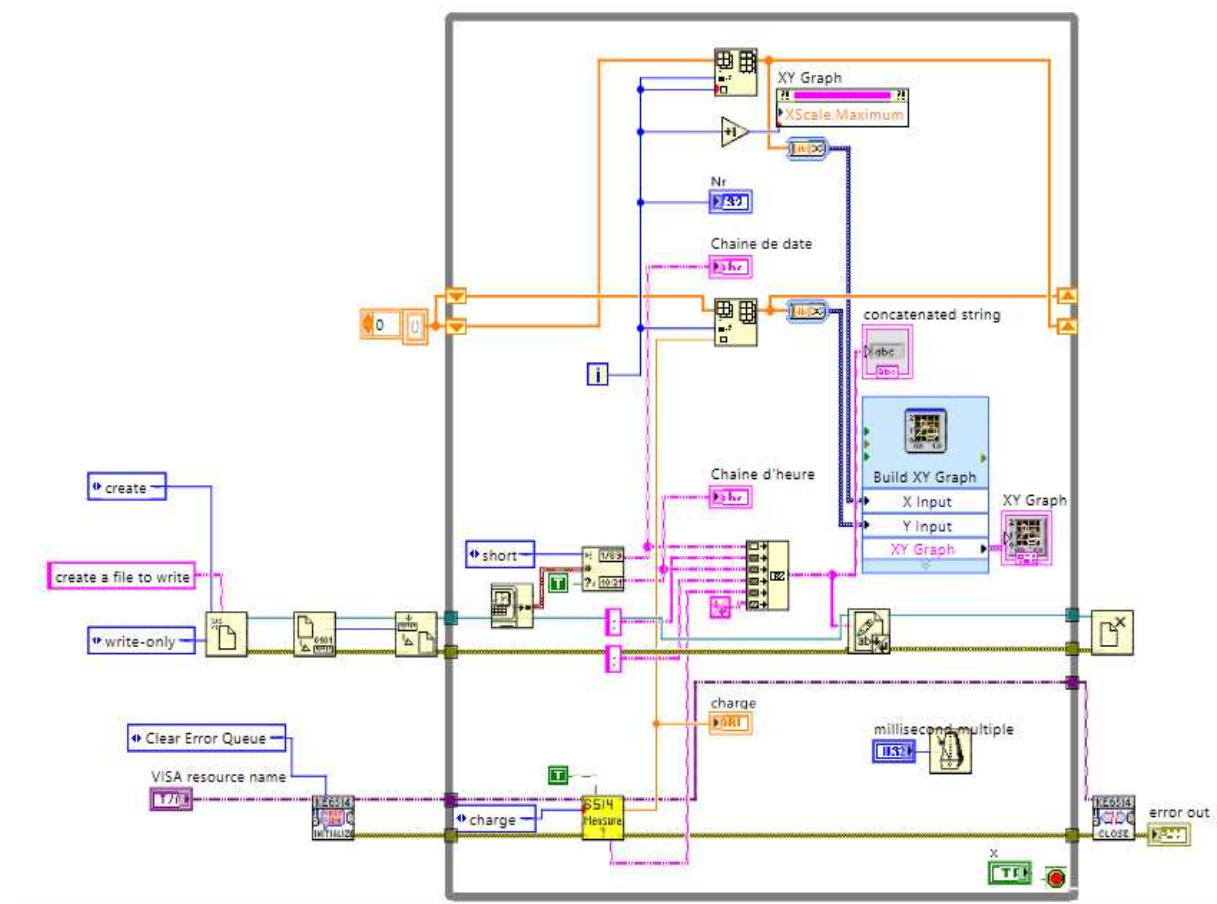


Figure II.21 : Programme utilisé pour l'acquisition de données dans le transport pneumatique (face-avant)

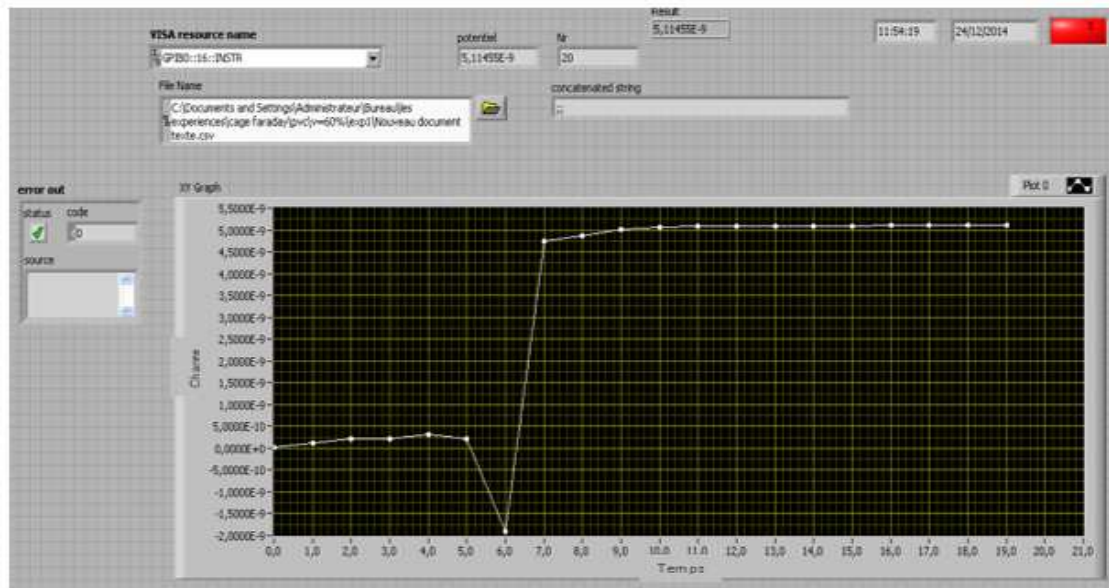


Figure II.22 : Programme utilisé pour l'acquisition de données dans le transport pneumatique (diagramme)

II.4.2. Programme développé pour le dispositif des ondes mobiles

- Etude de déplacement des particules de PA (figures II.23 et II.24)

Le programme utilisé est quasiment le même que pour le chargement par transport pneumatique.

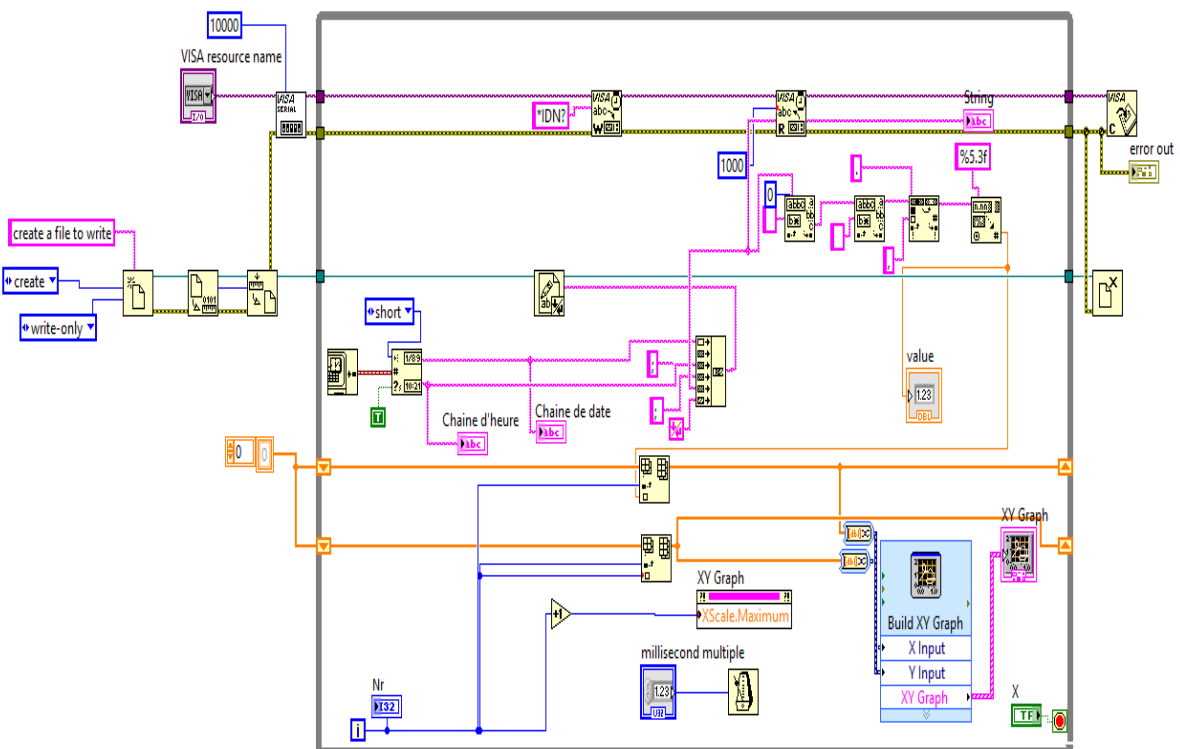


Figure II.23 : Programme utilisé pour l'étude de déplacement des particules (face-avant)

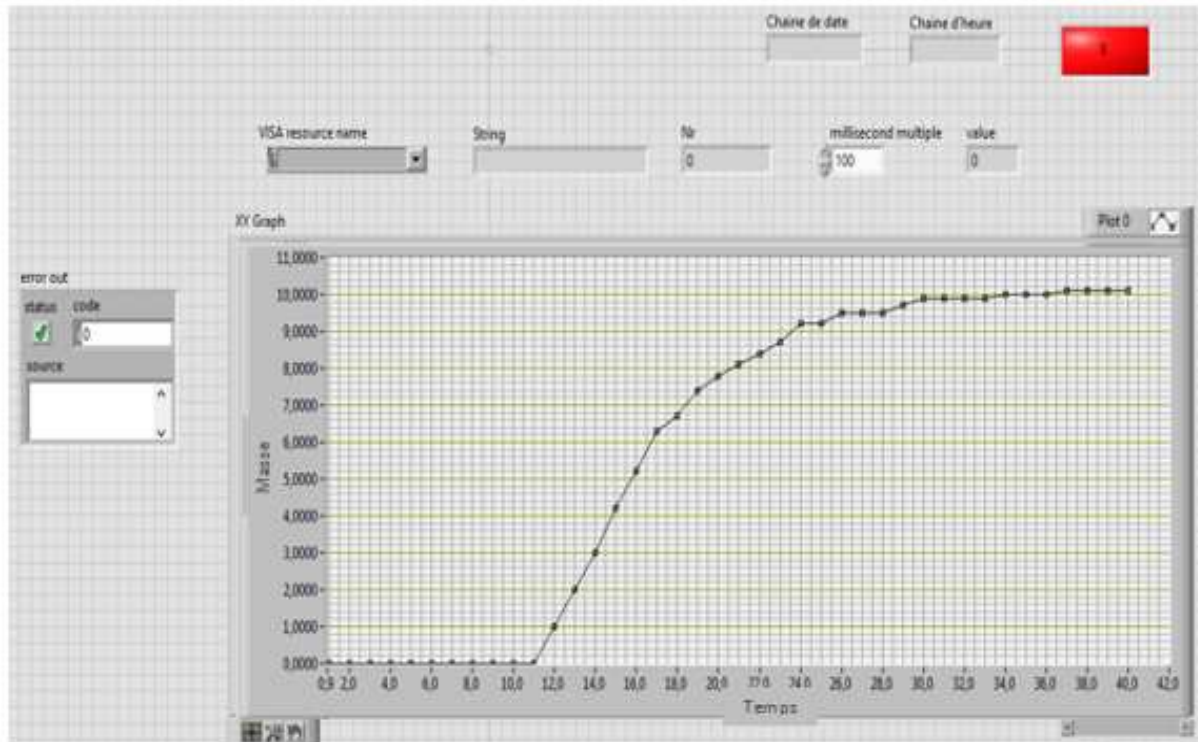


Figure II.24 : Programme utilisé pour l'étude de déplacement des particules (diagramme)

➤ Etude de déplacement des particules micronisées PVC

Le programme de la charge massique englobe les deux programmes utilisés auparavant (la charge et la masse) donc il y'a une liaison avec deux instruments de mesures (la balance et l'électromètre) (figures II.25-II.31).

La structure Stacked Sequence utilisée, empile chaque code pour qu'on puisse voir qu'un seul code à la fois et exécute code 0, puis code 1, et ainsi de suite jusqu'à ce que le dernier code soit exécuté (le code de la charge puis de la masse ensuite la charge massique jusqu'à l'enregistrement des données dans un fichier).

Dans les premiers programmes, il y'a la création d'un fichier d'enregistrement mais dans ce dernier, il y'a l'enregistrement dans un fichier déjà existant.

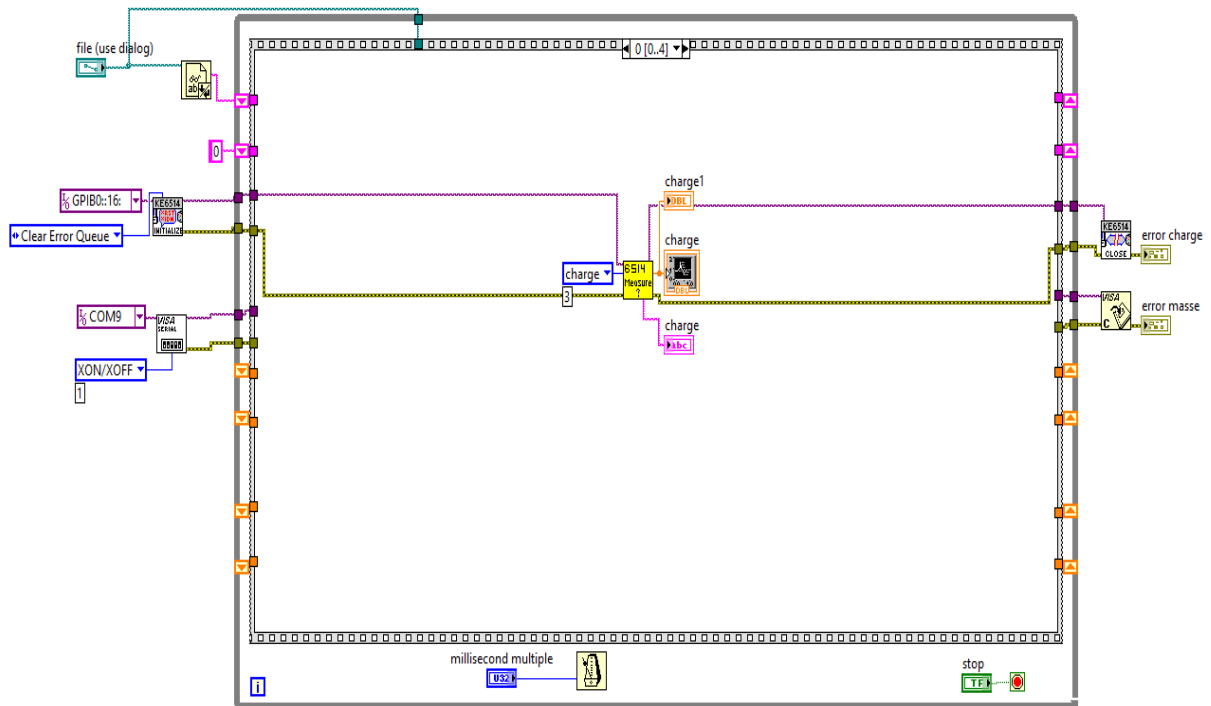


Figure II.25 : Face-avant du programme utilisé pour l'étude de déplacement des particules micronisées PVC (acquisition de charge)

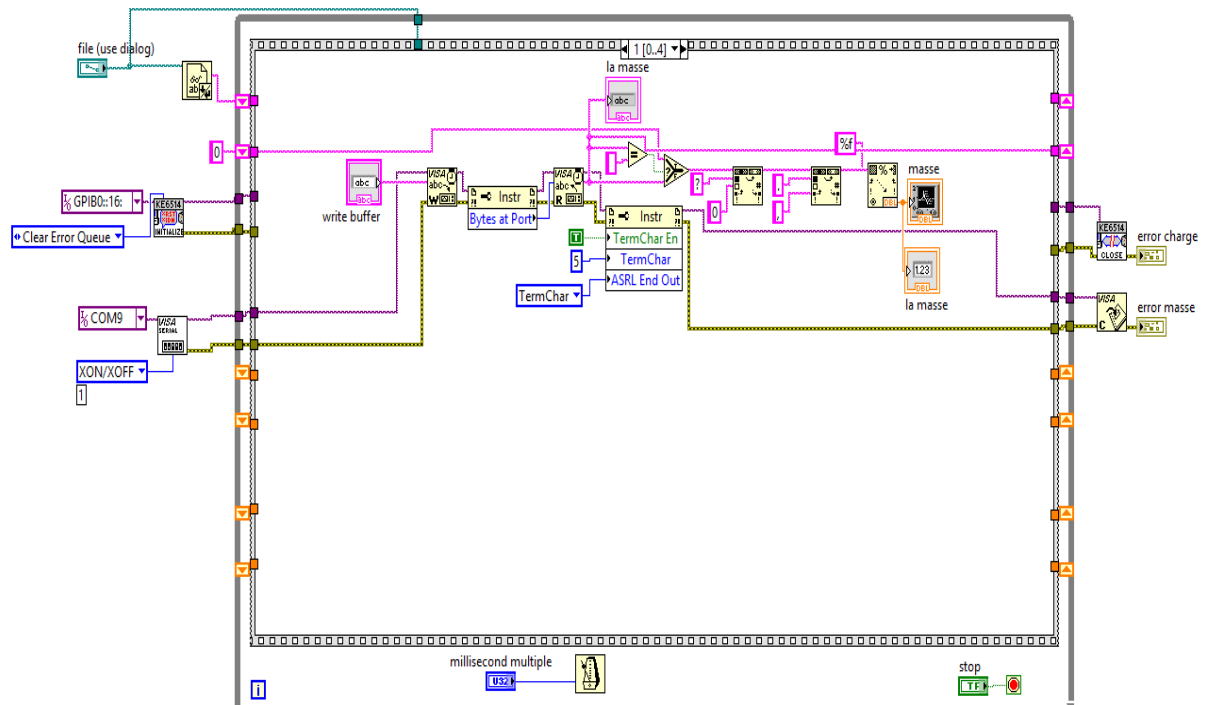


Figure II.262 : Face-avant du programme utilisé pour l'étude de déplacement des particules micronisées PVC (acquisition de masse)

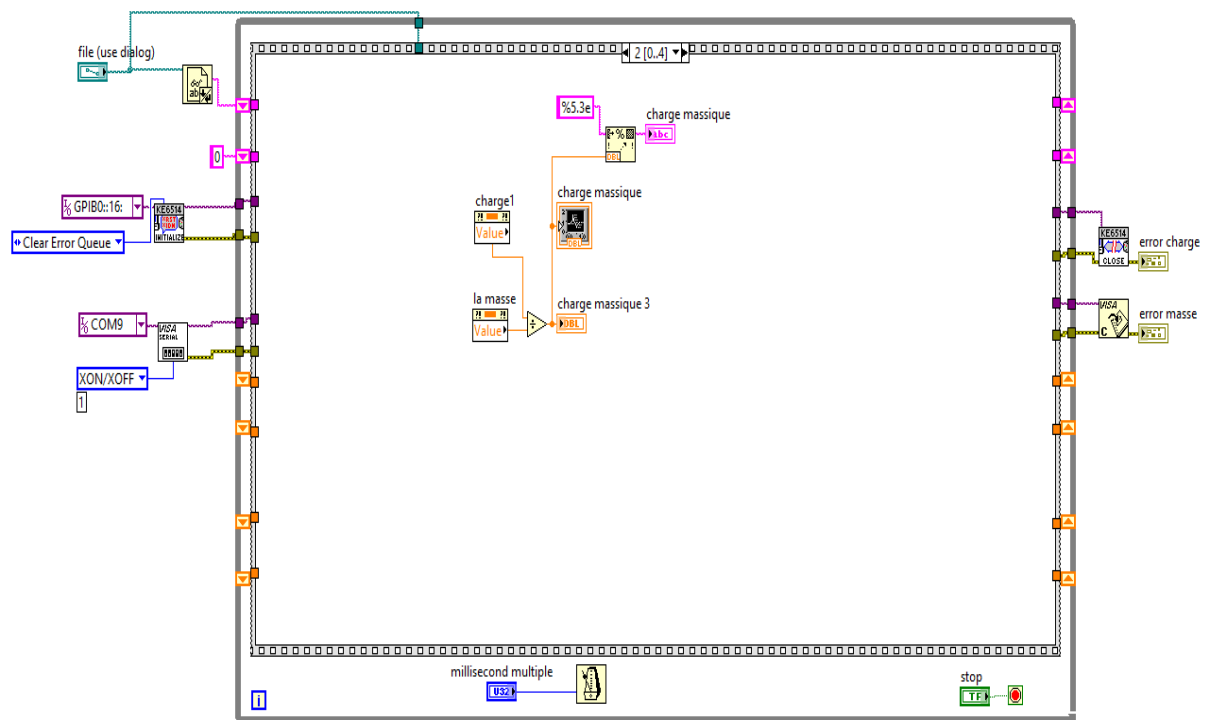


Figure II.27 : Face-avant du programme utilisé pour l'étude de déplacement des particules micronisées PVC (charge massique)

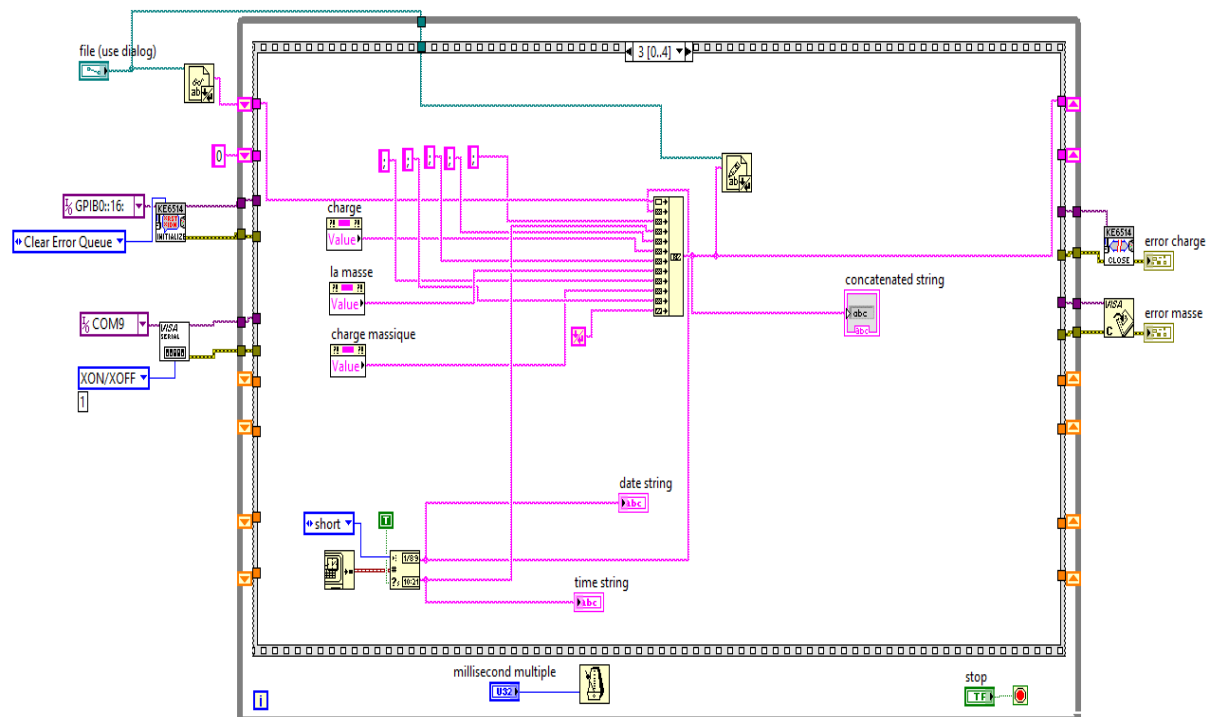


Figure II.28 : Face-avant du programme utilisé pour l'étude de déplacement des particules micronisées PVC (l'enregistrement dans un fichier)

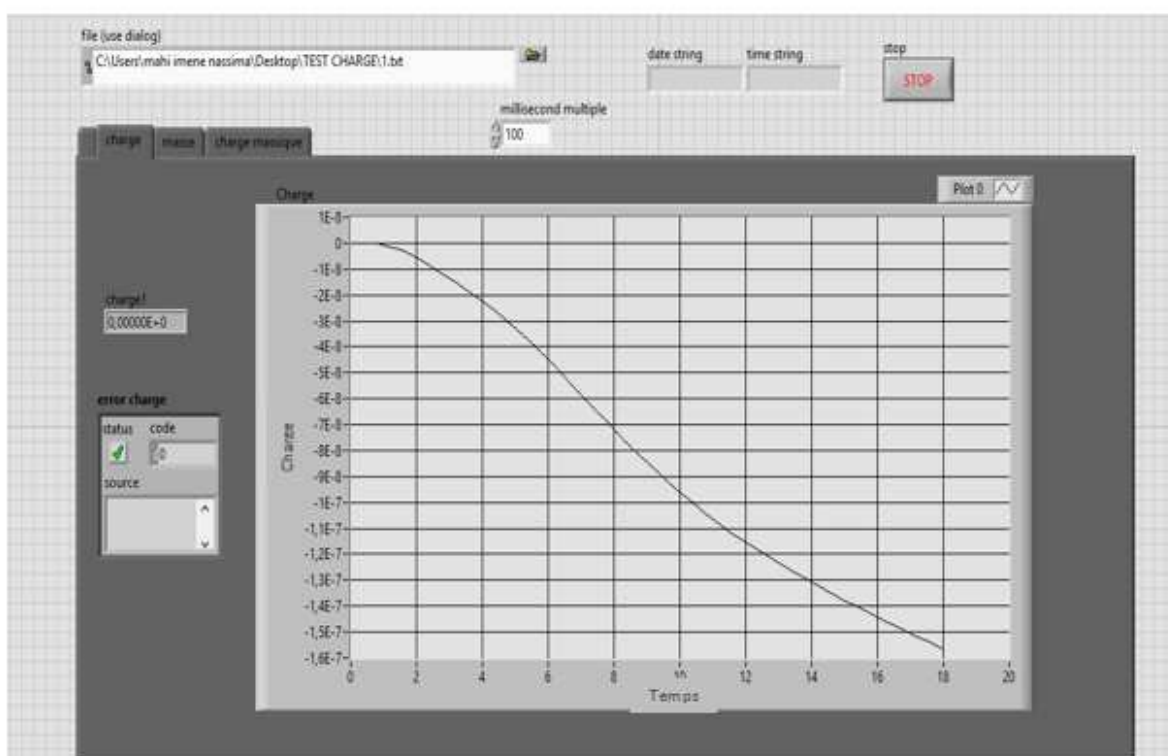


Figure II.293 : Diagramme du programme utilisé pour l'étude de déplacement des particules micronisées PVC (acquisition de charge)

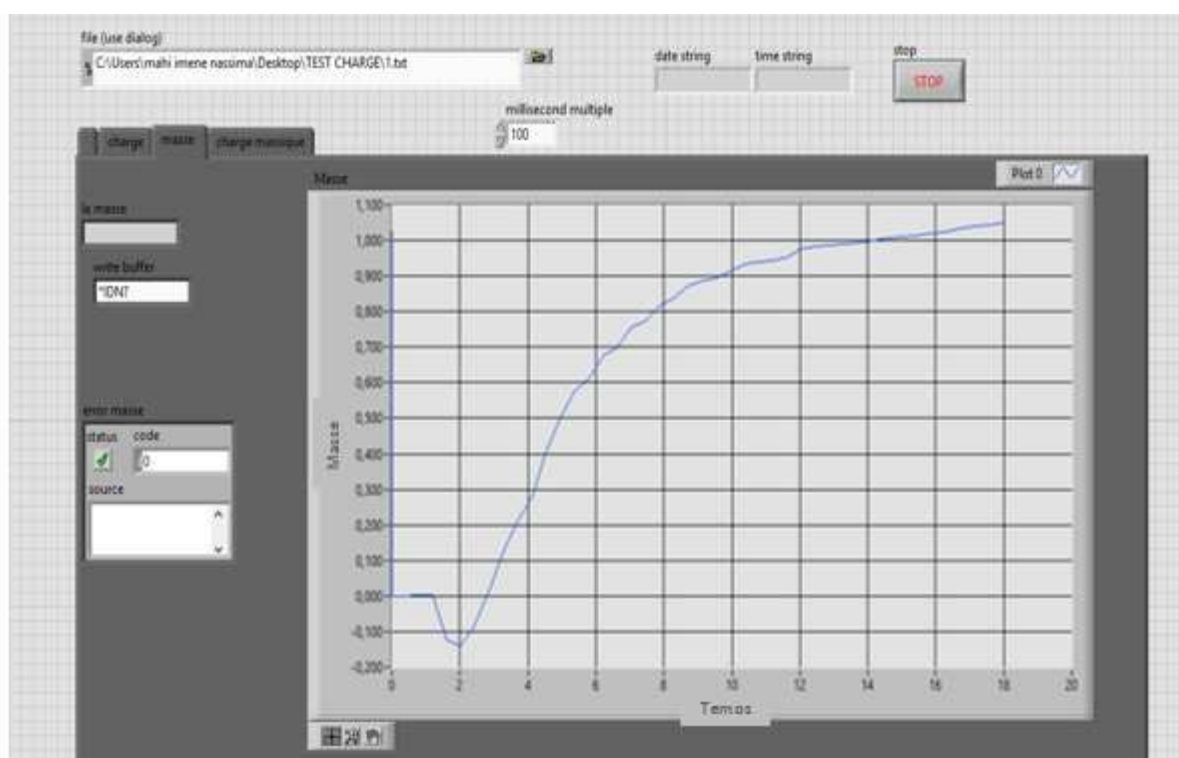


Figure II.30 : Diagramme du programme utilisé pour l'étude de déplacement des particules micronisées PVC (acquisition de masse)

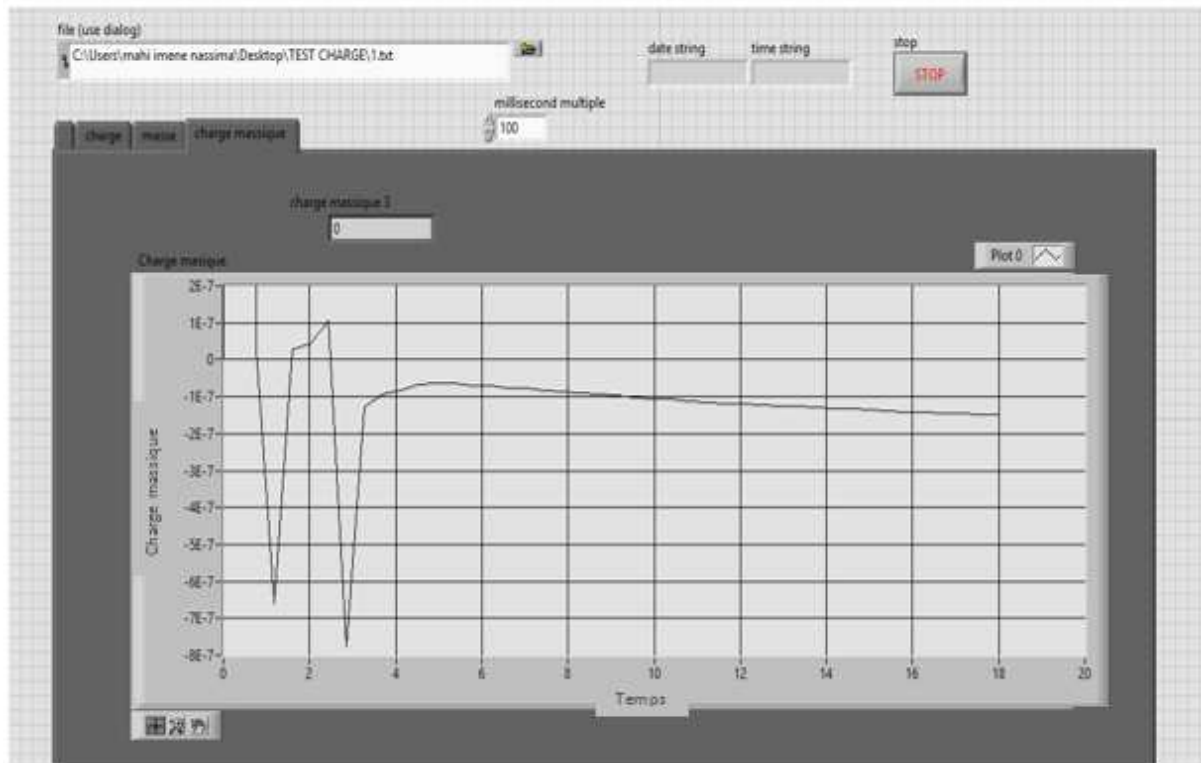


Figure II.31 : Diagramme du programme utilisé pour l'étude de déplacement des particules micronisées PVC (la charge massique)

Conclusion

La difficulté principale d'une expérimentation réside dans le traitement des données et leur compréhension. L'instrumentation virtuelle est un moyen pour leur donner de la signification. On peut automatiser un processus de mesures, conserver un historique de l'expérimentation, répéter une expérience en changeant des paramètres, comparer plusieurs situations entre-elles et tester très rapidement un prototype.

Ayant établi précédemment l'intérêt que présente l'instrumentation virtuelle avec une vue détaillée sur le logiciel LABVIEW, le prochain chapitre propose la représentation graphique pour illustrer des phénomènes abstraits difficiles à décrire dans une forme conventionnelle, permettant ainsi d'intégrer rapidement des phénomènes physiques et d'en extraire les éléments de base. On peut appliquer aussi directement les notions mathématiques nécessaires au développement d'un système de mesure ou d'un système de contrôle.

CHAPITRE III :
ETUDE DU MOUVEMENT
DES PARTICULES DANS UN
CONVOYEUR A ONDES
MOBILES

CHAPITRE III : ÉTUDE DU MOUVEMENT DES PARTICULES DANS UN CONVOYEUR À ONDES MOBILES

Le but de ce chapitre est de présenter une étude expérimentale pour étudier la dynamique du mouvement de particules du polyamide (PA) et du chlorure de polyvinyle (PVC) micronisées ($100\ \mu m$), en utilisant un convoyeur à ondes mobiles (COM) afin d'analyser leur vitesse et leur débit en fonction de la variation de la tension appliquée et de la fréquence de cette même tension. De plus, une nouvelle méthode de séparation a été testée pour le tri des particules de PA/ Bronze et des particules micronisées cuivre / PVC en utilisant la technique des ondes mobiles.

Toutes les expériences ont été réalisées dans des conditions stables de température ($20-25^{\circ}C$) et d'humidité (50-55%) ; de plus, chaque expérience a été répétée deux fois et la valeur moyenne a été utilisée pour le traçage.

III.1. Convoyeurs à ondes mobiles

Parmi les nombreuses solutions de transport de particules à partir d'une surface sans vibration mécanique, le convoyeur à ondes mobiles (COM), considéré comme l'un des plus performants [81]. Un tel convoyeur consiste en une série d'électrodes parallèles encastrées dans un matériau diélectrique et, pour empêcher l'étincelle entre des électrodes adjacentes, le convoyeur est revêtu d'un film isolant [82].

Les électrodes alimentées par un potentiel oscillant génèrent un champ électrique se propageant sur la surface du convoyeur [83]. Le COM a été utilisé dans plusieurs applications telles que le dispositif de transfert de toner chargé pour répandre le toner xérographique dans un film mince. D'autres applications comprennent un procédé d'auto-nettoyage tel que la surface des panneaux et des concentrateurs solaires [84], le transport des gouttelettes liquides [85], la classification granulométrique [86] et la séparation des particules [48].

Lorsqu'une tension déphasée est appliquée aux électrodes, les particules qui se polarisent obtiennent ainsi une charge électrostatique en contact avec le plan, puis les granules sont repoussées et transportées de la surface du COM. Les particules de poussière

doivent de préférence être chargées électriquement pour leur élimination par des forces électrostatiques et être balayées par le champ électrique alternatif multi-phasé.

III.2. Conception des convoyeurs à ondes mobiles

Différents dispositifs à petite échelle pour la micromanipulation de particules utilisent une onde progressive à champ électrique alternatif [87,88].

Des systèmes avec de nouvelles fonctionnalités de transport et de manipulation, qui instantanément génèrent des forces d'entraînement des particules grâce à l'activation du champ électrique, ont été conçus et produits. Dans une tentative d'expliquer les ondes mobiles, seulement des électrodes parallèles minces et longues avec un écart constant, qui forment le squelette du dispositif de panneau électrique, seront considérées dans ce travail.

Les hautes tensions équilibrées multi-phasées provenant d'une source programmable sont fournies à une série d'électrodes parallèles enrobées couvertes et protégées contre les étincelles électriques par un mince film isolant. A la surface des électrodes, un champ électrique de déplacement est créé autour des électrodes qui varient transitoirement en synchronisation avec la tension appliquée.

Les particules sur le mince film isolant au-dessus des électrodes de champ parallèles deviennent soit par triboélectricité ou par induction chargées par l'application de tensions aux électrodes.

Les forces dynamiques de cette onde générée par un champ de déplacement non uniforme dominent les forces d'adhésion et de gravitation agissant sur les particules chargées et les transportent dans une direction dans le plan perpendiculaire aux électrodes d'une manière progressive d'une l'électrode à l'autre électrode.

La force du champ électrique et sa force résultante agissant sur la particule dépendent de la tension appliquée. En conséquence, la régulation de l'amplitude offre un moyen d'accorder la force sur les particules. Par ce processus de transport, les particules produisent une vitesse de transport globale en proportion directe de la fréquence du champ électrique et l'écart inter-électrode.

Deux à trois amplificateurs de hautes tensions programmables sont connectés au convoyeur. Les figures III.1 et III.2 montrent le principe de la connexion des électrodes à chaque phase.

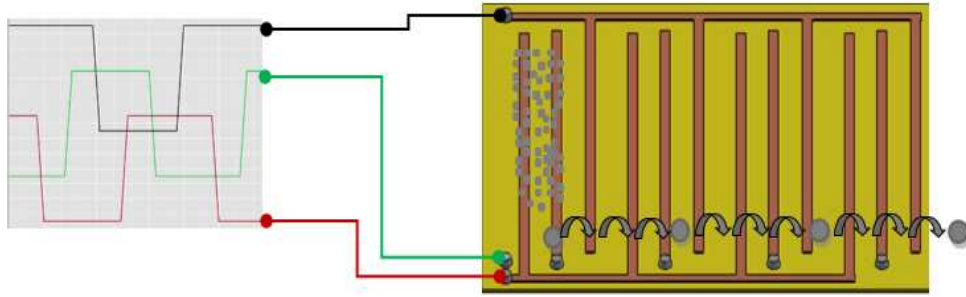


Figure III.1 : Dispositif du convoyeur triphasé.

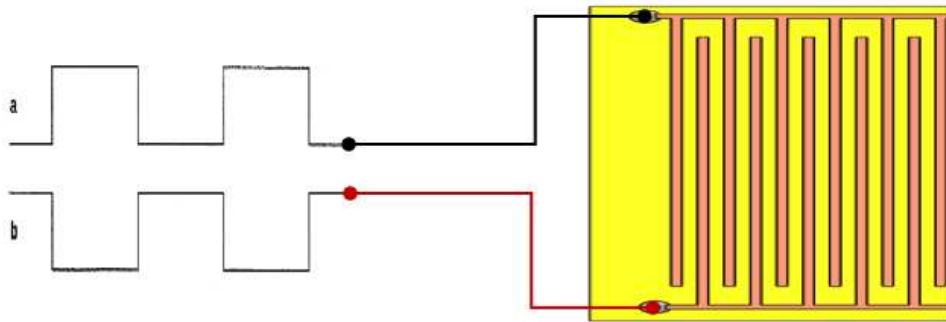


Figure III.2 : Dispositif du convoyeur biphasé.

Dans les tableaux III.1-III.2, une explication est donnée sur le déplacement des particules qui est synchronisé avec la séquence d'alimentation de la source de tension.

En conséquence, dans une période de trois phases, la particule est transportée plus rapidement le long d'une distance qu'une période biphasée.

Tableau III.1 : Séquence d'alimentation des tensions de profil rectangulaires triphasées

A	B	C	D	E	F
+	-	0	+	-	0
+	0	-	+	0	-
0	+	-	0	+	-
-	+	0	-	+	0
-	0	+	-	0	+
0	-	+	0	-	+

Tableau III.2 : Séquence d'alimentation des tensions de profil rectangulaires biphasées [87]

A	B	C	D	E	F
+	-	+	-	+	-
-	+	-	+	-	+

III.3. Convoyeurs utilisés

Les convoyeurs à ondes mobiles ont été construits à l'aide d'une plaque de circuit imprimé, de dimensions 256x126 mm², sur laquelle ont été tracées des électrodes de cuivre parallèles de 1 mm de largeur et 120 mm de longueur, séparées par un intervalle égal à 2 mm. Un film de ruban adhésif isolant en PVC d'une épaisseur de 28 µm recouvre le convoyeur pour minimiser le risque de formation d'étincelles entre les électrodes adjacentes (figure III.3).

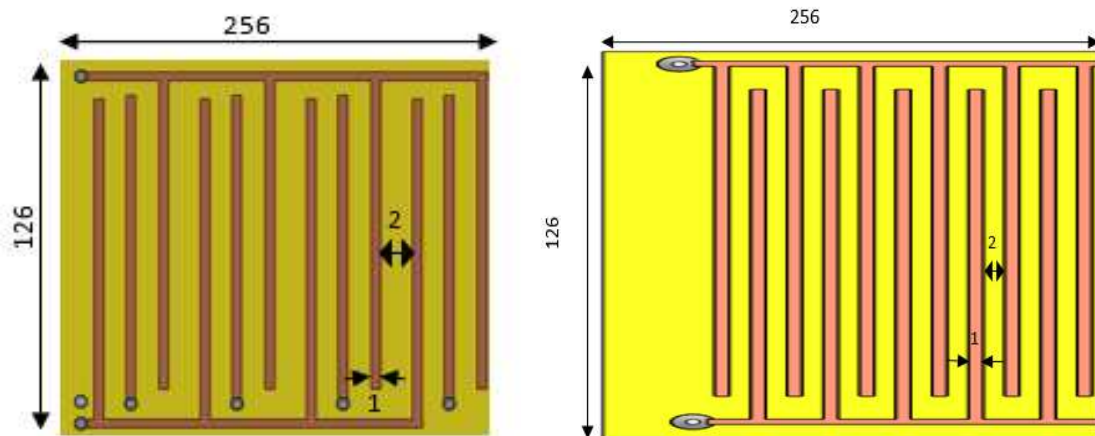


Figure III.3 : Dimensions du convoyeur à ondes progressives

(Toutes les dimensions en mm).

III.4. Échantillons utilisés

Le déplacement des matériaux dans un convoyeur à onde mobile dépend de plusieurs facteurs. L'objectif de ce travail est l'analyse du déplacement des particules de PVC et de PA et la séparation de particules micronisées PVC, cuivre, PA et bronze. Des convoyeurs triphasés alimentés par des amplificateurs de haute tension contrôlés par des générateurs de fonction, font l'objet de cette étude [89].

III.4.1. Polyamide (PA)

Il se caractérise par une haute résistance mécanique, rigidité, dureté, une faible reprise d'humidité, des bonnes propriétés de glissement, et une excellente résistance à l'usure. Ses bonnes caractéristiques permettent de l'utiliser dans les équipements chirurgicaux, le matériel informatique, les éléments d'accouplements, la construction mécanique, et même dans des milieux aqueux (figure III.4).



Figure III.4 : Échantillon des granules de polyamide (PA) utilisés.

Les principales caractéristiques des polyamides sont les suivantes :

- Résistance au vieillissement à haute température et sur de longues périodes ;
- Haute résistance mécanique et haute rigidité ;
- Ténacité fonctionnelle même à basse température ;
- Haute fluidité pour faciliter le remplissage des moules ;
- Résistance intrinsèque au feu ;
- Excellentes propriétés diélectriques ;
- Bonne résistance à l'abrasion ;
- Résistance chimique exceptionnelle ;
- Barrière ou résistance élevée aux produits chimiques, à l'essence, aux matières grasses ou aux produits aromatiques ;
- Haute barrière anti-oxygène ;
- Absorption d'eau ;
- Excellent équilibre coût/performance.

III.4.2. Bronze

Le bronze est un alliage métallique non ferreux. Autrefois, le nom de bronze était donné à tous les alliages du cuivre. Ainsi, certains " bronzes " datant du XVII^e siècle ne sont en fait que des laitons (figure III.5).

Aujourd'hui, l'emploi du terme bronze se restreint aux alliages de cuivre et d'étain. Mais, comme dans le cas du laiton, il serait plus exact de parler de bronzes au pluriel. En effet, les proportions de cuivre et d'étain contenus dans l'alliage peuvent varier. D'autres éléments (aluminium, plomb, béryllium, manganèse ou tungstène essentiellement) peuvent être ajoutés au mélange.

Les principales caractéristiques du bronze sont :

- une bonne résistance à l'usure ;

- une résistance acceptable à la corrosion mais qui ne permet pas son usage dans l'industrie navale ;
- une bonne conductivité électrique.



Figure III.5 : Échantillon des brins de Bronze utilisés.

III.4.3. Particules poudreuses du PVC

Le PVC, ces trois lettres proviennent de l'appellation anglaise "Poly Vinyl Chloride". Elles sont le symbole international du polychlorure de vinyle. Il s'agit d'un polymère thermoplastique de grande consommation (figure III.6).

Le PVC est issu principalement de deux matières premières, 57% de sel et 43% de dérivés du pétrole. Il se présente sous forme de poudre blanche. Cette dernière doit être additionnée à des produits permettant sa transformation en objets finis (Principalement des additifs : stabilisants, lubrifiants, plastifiants, pigments, charges, etc...).

De par ses additifs, le PVC peut se formuler en fonction des besoins. Ainsi, le PVC peut être rigide ou souple, transparent ou opaque, incolore ou teinté, compact ou cellulaire, ignifuge, antistatique, ...

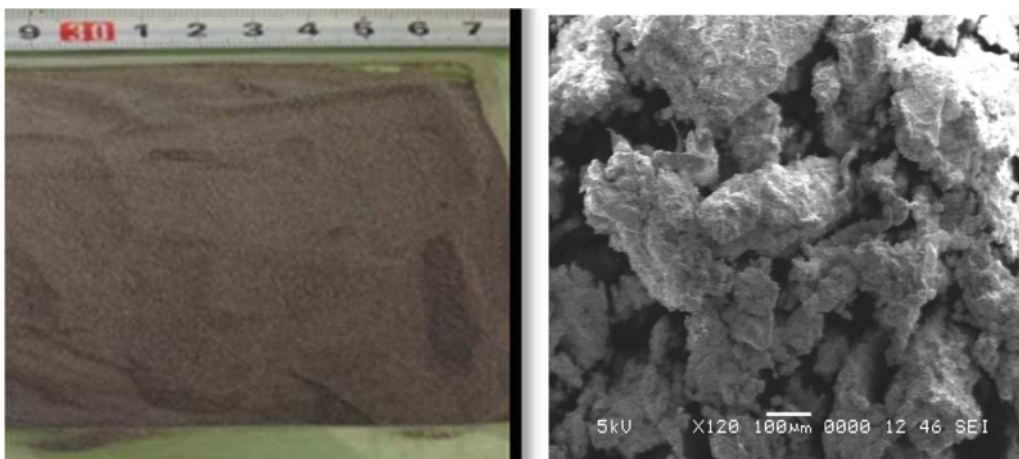


Figure III.6 : Représentation photographique des particules de PVC.

Le PVC est la troisième matière plastique la plus utilisée dans le monde, après le polyéthylène et le polypropylène. Il représente plus de 10% de la consommation de matières plastique au sein de l'Union Européenne.

Les secteurs d'activité les plus consommateurs de PVC sont la construction et l'emballage.

III.4.4. Cuivre

Le cuivre est l'un des rares métaux à se trouver naturellement dans la nature. Il a une couleur rouge ou orangée. Lorsqu'il s'oxyde, il donne du vert-de-gris. Le phénomène s'observe sur de nombreuses statues.

- Symbole : Cu ;
- Masse atomique : 63,546 kg;
- Série : métaux de transition ;
- Densité : 8,96 g/cm³ ;
- Point de fusion : 1.084,62 °C ;
- Point d'ébullition : 2.562 °C.

Un métal de couleur rouge ou orangée, le cuivre est ductile et malléable. Il possède une très grande conductivité électrique et présente une certaine résistance à la corrosion. Le cuivre présente aussi des propriétés anti salissures.

III.5. Dispositif expérimental

Dans le processus du transport des matériaux par ondes mobiles, on a utilisé deux dispositifs expérimentaux :

- Le premier est destiné à la séparation des particules PA et de bronze en utilisant deux convoyeurs triphasés et biphasés où chaque phase est alimentée par une haute tension rectangulaire d'amplitudes et de fréquences variables ; chaque convoyeur est posé sur un vibreur (figure III.7).

L'étude du déplacement de PA a été faite en utilisant un convoyeur triphasé ; le bac de la récupération est posé sur la balance reliée à l'instrument virtuelle.

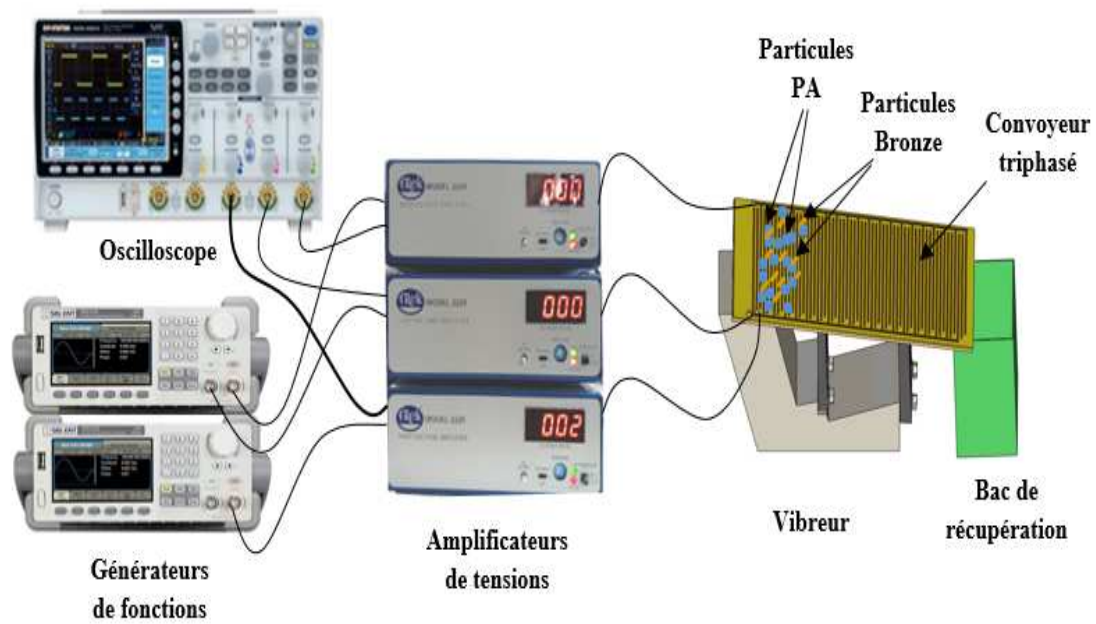
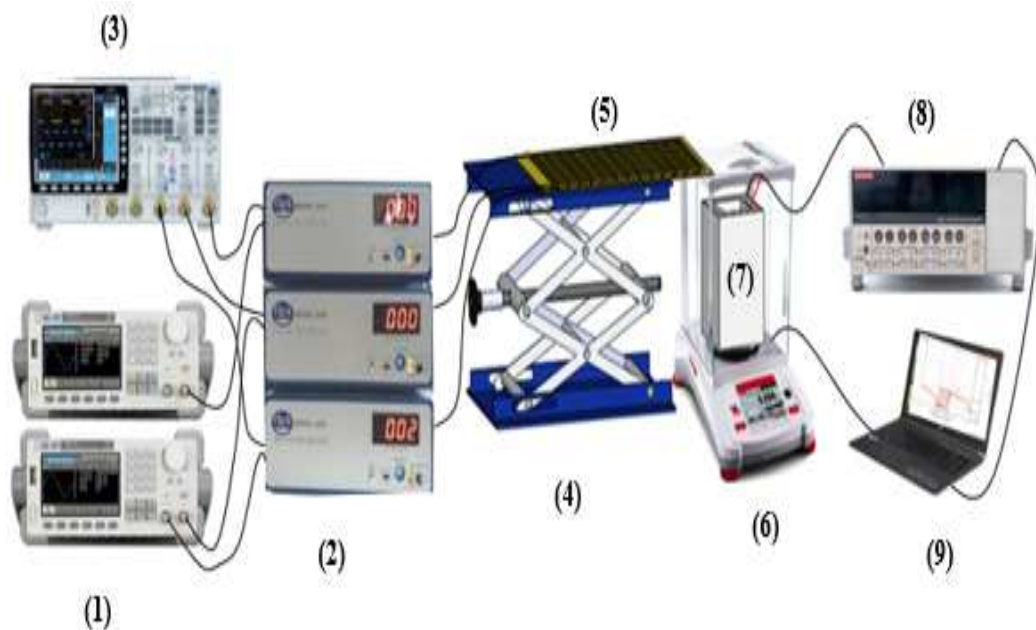


Figure III.7 : Représentation schématique de l'installation expérimentale pour l'étude du processus de déplacement et de séparation des particules PA et de bronze.

- Le deuxième dispositif est destiné à l'étude de déplacement des particules poudreuses PVC ($100\ \mu\text{m}$) ; dans ces expériences, on a utilisé un convoyeur triphasé où le produit est récupéré dans une cage faraday associée à l'électromètre, déposée sur balance. Les deux instruments sont reliés aux Vis. L'étude s'est focalisée sur la séparation des particules millimétriques de PVC avec des brins de cuivre (figure III.8).



a) Schéma descriptif du dispositif expérimental.



b) Représentation photographique du dispositif expérimental.

Figure III.8 : Représentation schématique de l'installation expérimentale pour l'étude du processus de déplacement des particules poudreuses PVC.

(1) Générateurs de fonctions, (2) Amplificateurs HT, (3) Oscilloscope, (4) support, (5) Convoyeur triphasé, (6) Balance, (7) Cage de Faraday, (8) Électromètre, (9) instrument Virtuel.

III.5.1. Matériels utilisés

a) Amplificateur de tension

L'amplificateur de tension (Trek, modèle 2220) est l'un des nombreux types de la série Trek 2200. Cette série d'amplificateurs haute tension de 40 watts offre des performances élevées. Le modèle 2220 (figure III.9) fournit un contrôle précis des tensions de sortie dans la plage de 0 à ± 2 kV CC ou crête AC avec une plage de courant de sortie de 0 à ± 20 mA crête AC et une large bande passante DC à 7,5 kHz (-3 dB).

Comme les autres modèles d'amplificateurs Trek, l'unité 2220 intègre des caractéristiques de haute performance telles que stabilité DC et large bande passante, signaux de sortie AC bien régulés et contrôlés, étages de sortie complètes à quatre états de classe AB, réglage de décalage DC avec panneau avant la mesure et l'arrêt automatique pour une protection contre les surtensions.



Figure III.9 : Amplificateur de tension (TREK, Modèle 2220).

L'étage de sortie coule ou alimente le courant en charges réactives ou résistives dans toute la plage de tension de sortie. Ceci est essentiel pour atteindre la réponse de sortie précise et les vitesses de balayage élevées requises par les charges réactives.

b) Générateur de fonction

Suite au lancement 2011 de la série SDG1000, SIGLENT a conçu une série multidirectionnelle / générateur de formes arbitraires de la série SDG5000. La série SDG5000 combine la technologie mature adoptée par le SDG1000, la technologie DDS avancée et les technologies SIGLENT développées de manière indépendante par Easy pulse. Il intègre sept fonctions d'instrument majeur en une seule (figure III.10).



Figure III.10 : Générateur de fonction Siglent SDG 1025.

Le dispositif est un générateur de fonction de 2 canaux, capable de produire deux différentes formes d'onde en même temps. Ces formes d'onde sont affichées sur le grand écran de l'affichage à cristaux liquides du dispositif, permettant à des utilisateurs de faire facilement des ajustements et de changer le type de forme d'onde, la fréquence et plus si nécessaire.

c) Oscilloscope à mémoire

L'oscilloscope à mémoire numérique de la série GDS-3000 est un outil puissant et complet qui permet d'aborder facilement des problèmes de mesure complexes (figure III.11).

La série GDS-3000, avec une bande passante maximale de 500 MHz, est équipée d'une fréquence d'échantillonnage en temps réel allant jusqu'à 5 GSa/s (Gega SAmplés per Second) et d'un taux d'échantillonnage équivalent de 100 GSa/s. Le grand écran LCD TFT SVGA de 8 pouces, combiné à la technologie avancée de traitement de signal numérique VPO, fournit des détails et une clarté minutieuse pour les formes d'onde affichées.



Figure III.11 : Oscilloscope à mémoire (Gw Instek GDS-3154).

d) Cage de Faraday

La cage de Faraday est l'un des dispositifs les plus courants pour mesurer la charge des particules tribo-électrisées. Elle est constituée de deux cylindres conducteurs concentriques séparés par un isolant.

Le cylindre extérieur est relié à la terre, non seulement pour éviter que les charges extérieures ne soient mesurées mais aussi pour réduire toutes perturbations électriques extérieures (figure III.12).

Le produit dont on doit mesurer la charge est introduit dans le cylindre intérieur. Ce dernier est isolé de la terre et connecté à un électromètre dont le rôle est de mesurer la charge électrique qui s'y répartit sur la surface extérieure par répulsion électrostatique (les charges de même signe se repoussent le plus loin possible sur la surface).



Figure III.12 : Cage faraday.

e) Thermo hygromètre numérique

Une telle étude expérimentale n'est réalisable que lorsqu'il s'agit d'une humidité relative idéale, ce qui exclut en particulier toute mesure où l'humidité (HR%) est inconvenable (figure III.13).



Figure III.13 : Thermo hygromètre numérique Amprobe TH-3

Donc, on doit la mesurer avant chaque série d'expériences, utilisant un thermo hygromètre numérique (Lutron TH-3007SD) qui présente les caractéristiques principales suivantes :

- Un double fonctionnement : mesure de l'humidité et de la température simultanément ;
- La sonde est intégrée à l'appareil ;
- Une commutation des mesures entre degrés Celsius et Fahrenheit ;
- Une mémoire de mesure intégrée (maintien des données MIN et MAX) ;
- La coupure automatique de l'alimentation.

III.6. Protocole expérimental

III.6.1. Avec vibration de convoyeur

Des expériences ont été effectuées en variant la fréquence de l'alimentation de convoyeur qui était fixé sur une plaque vibrante pour plusieurs valeurs de la tension pour les convoyeurs biphasé et triphasé. Le déplacement de PA est de 10 g et la séparation du mélange bronze et polyamide a aussi une masse de 10 g ce qui équivaut à 50% de chaque produit.

III.6.2. Sans vibration du convoyeur

Les mêmes expériences ont été renouvelées en variant la fréquence pour une valeur de tension avec le convoyeur triphasé pour le déplacement du PVC et la séparation du

mélange de Cuivre et de PVC d'une masse de 0,5 g. Cette expérimentation a été élaborée avec 50% de chaque produit.

III.7. Étude de déplacement des particules de PA et PVC

III.7.1. Déplacement des particules PA

En disposant les particules PA de 1 mm de diamètre sur le convoyeur triphasé alimenté, on a constaté qu'il n'y avait pas de mouvement. On était donc contraint de déposer le convoyeur sur un vibreur incliné de 30°.

Le produit avait été récupéré avec la balance reliée à l'instrument virtuel pour évaluer la vitesse de déplacement en fonction de la fréquence et la tension appliquée au convoyeur triphasé.

Les mesures permettant d'identifier le déplacement des particules PA, effectuées sous une tension de 0,4 kV et 1,4 kV en maintenant la même fréquence 40 Hz, sont données respectivement aux Figures III.14 et III.15.

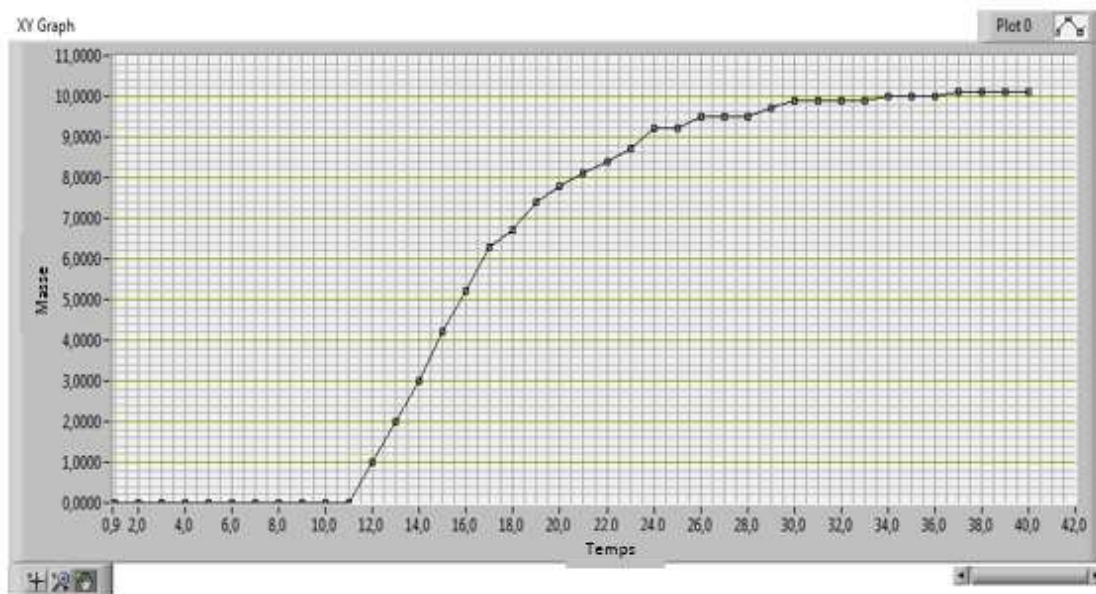


Figure III.14 : Déplacement des particules de PA pour une fréquence de 40 Hz sous une tension de 0,4kV.

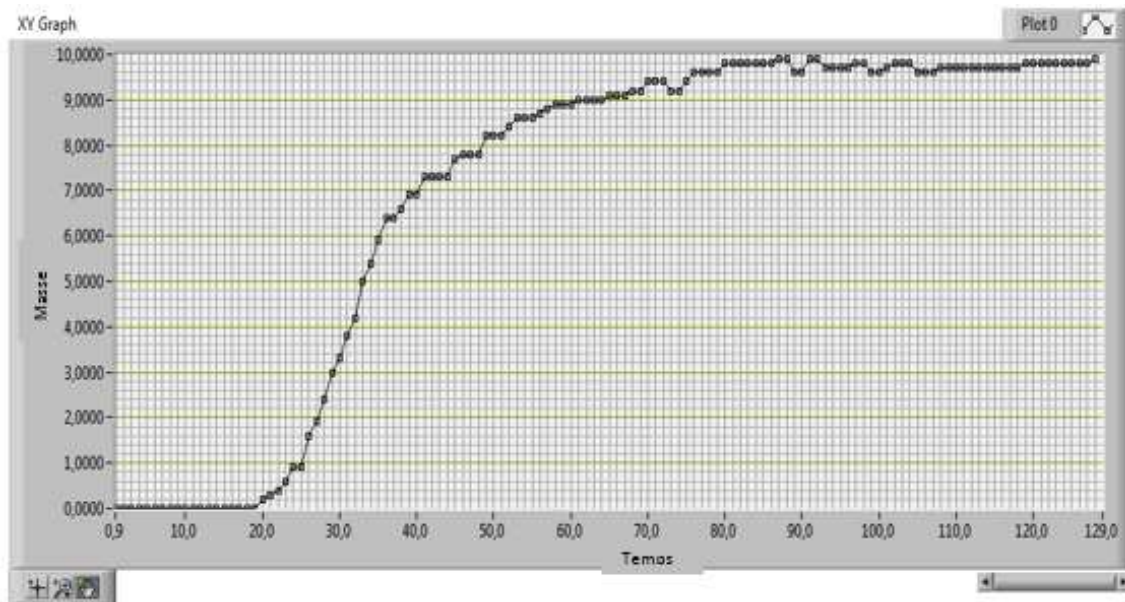


Figure III.15 : Déplacement des particules de PA pour une fréquence de 40 Hz sous une tension de 1,4kV.

D'après les figures III.14 et III.15, on remarque qu'il y'a une différence dans le temps de déplacement des particules où ce déplacement est plus rapide pour la tension de 0,4 kV.

Ce phénomène est dû à la taille et la forme des particules puisque la diélectrophorèse associée aux ondes mobiles agit seulement sur les particules millimétriques et sphériques, cela est démontré dans la section suivante.

Nous avons ainsi tracé l'évolution du temps de déplacement des particules de PA en fonction de la fréquence pour les 4 valeurs de tensions choisies (Figure III.16). Les courbes montrent que plus la tension et la fréquence augmentent plus le déplacement est lent, cela est dû à la taille des particules. D'un autre côté, il semble que la polarisation des particules a un effet contraire sur les granules millimétriques, car il se produit une force d'attraction entre les électrodes et le granule qui a une charge de signe opposé par rapport au potentiel de l'électrode.

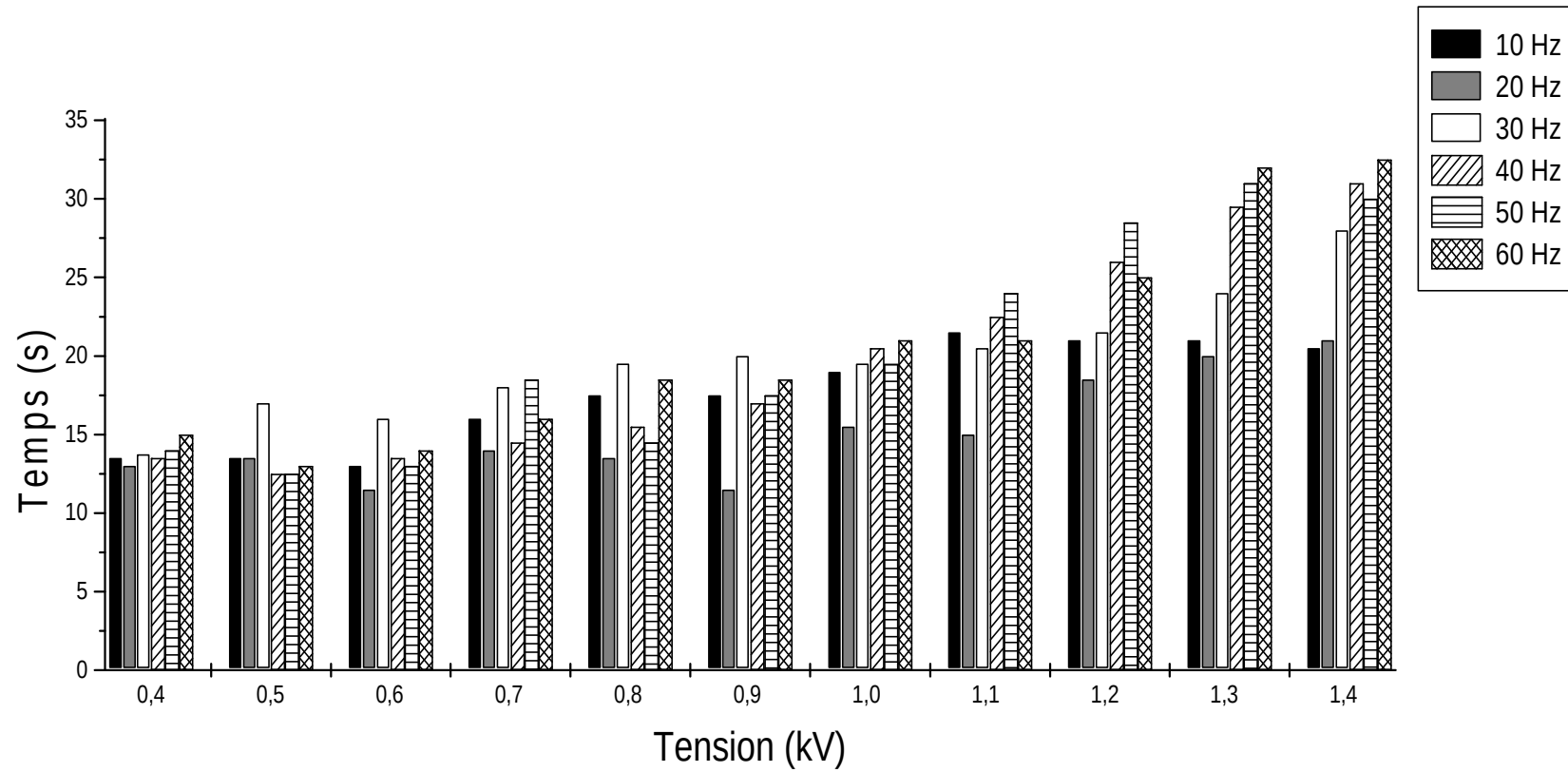


Figure III.16 : Evolution du temps de déplacement des particules de PA en fonction de la tension pour différentes fréquences.

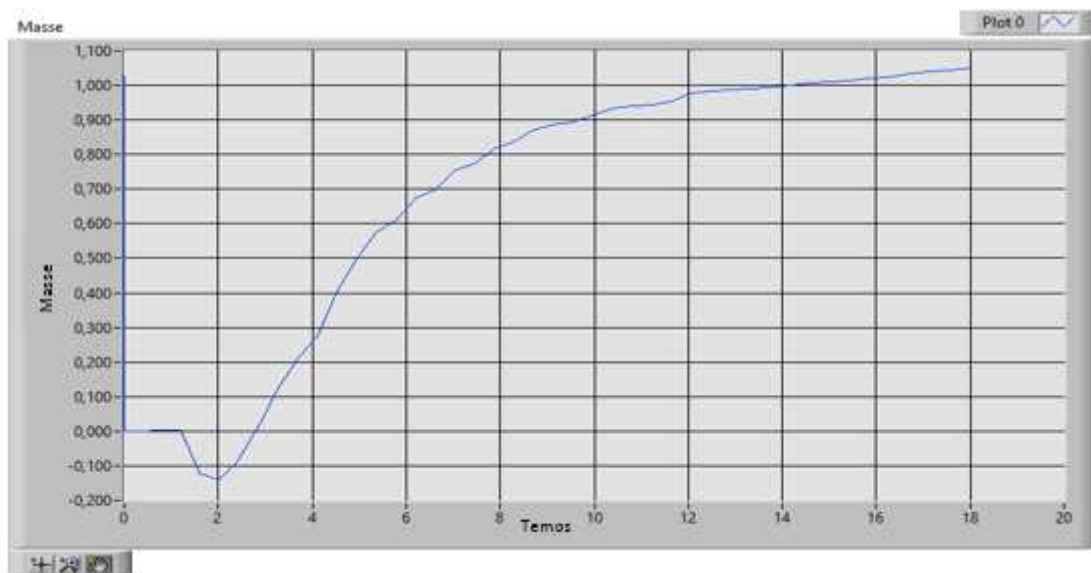
Ces résultats montrent qu'il existe une force d'attraction appliquée sur les grands plastiques. Une charge est produite sur la particule par polarisation et s'en suit alors une force appliquée par le champ électrique polyphasée. L'action est contraire par rapport au déplacement des particules micronisées qu'on observe généralement sur les COM, cela serait dû à la taille des granules qui fait que celle-ci touche les deux électrodes adjacents au même temps.

Dans d'autres études où la méthode des éléments finis a été utilisée pour le calcul de la force diélectrophorétique pour des particules ayant un grand volume et non-sphériques, une hypothèse a été tirée : le sphéroïde prolata (allongé) serait attirée vers l'électrode et sera maintenue in situ par les forces DEP [90].

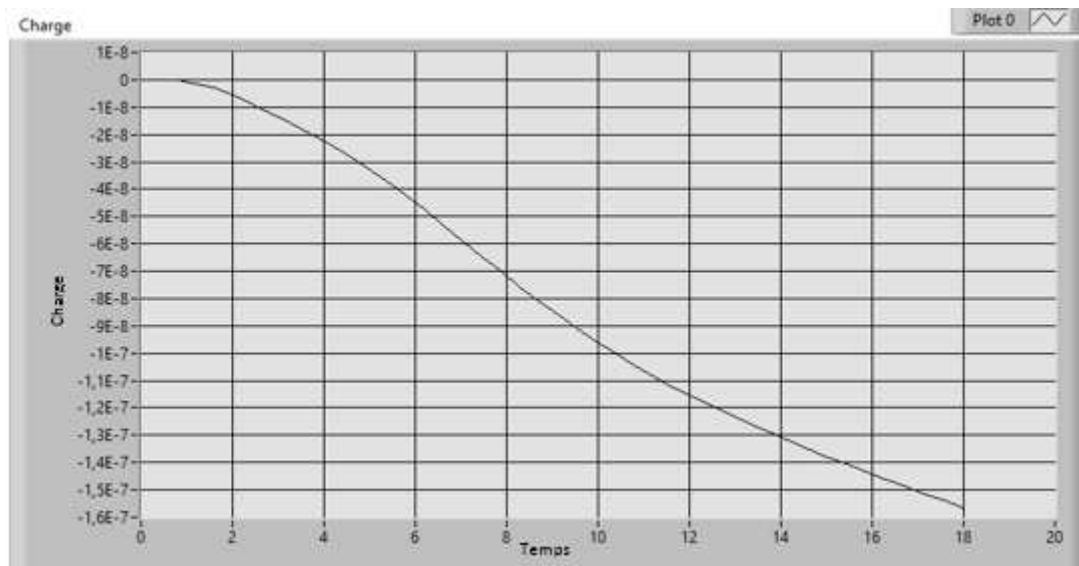
III.7.2. Étude de déplacement des particules micronisées de PVC

On notera que pour toutes les expériences réalisées, chaque échantillon déposé sur le convoyeur est d'une masse totale $m = 2$ g et la masse déplacée récupérée dans la cage de Faraday varie à peu près de 800 et 1100 mg. Les particules restantes, qui se sont déplacées vers d'autres côtés (côté gauche, vers le haut et vers le bas) du convoyeur, ne sont pas récupérées dans la cage de Faraday. Le mouvement des particules dans les autres côtés du convoyeur a également été observé par d'autres auteurs qui ont supposé qu'un tel mouvement pouvait être provoqué par un réentraînement des particules.

Chaque échantillon d'une masse $m = 2$ g a été déposé sur la même partie rectangulaire définie du côté gauche du convoyeur. À la fin de chaque expérience, la masse et la charge triboélectrique des particules sont récupérées sur le côté droit du convoyeur.



(a)



(b)

Figure III.17 : Diagrammes typiques de (a) la masse m et (b) de charge Q affichés par le logiciel LABVIEW ($U = 1,4$ kV ; $f = 50$ Hz).

La figure III.17 montre des diagrammes typiques de LABVIEW affichés pour $U = 1,4$ kV et $f = 50$ Hz, de la masse déplacée m et de la charge électrique Q . Selon ces diagrammes qui indiquent que la balance et l'électromètre commencent l'enregistrement presque au même moment qui est presque égal à 1s, nous avons remarqué que l'évolution de m et Q n'est pas exactement similaire.

En fait, dès que le convoyeur est allumé, presque toutes les particules se déplacent en une seule vague dans l'air plutôt que de glisser sur la surface du convoyeur. Les particules restantes, qui sont plus fortement attachées au convoyeur, ont besoin d'une plus longue durée pour se détacher et se mettre en mouvement, ce qui explique la charge électrique plus élevée acquise par l'effet triboélectrique à la fin de l'expérience.

La charge électrique acquise par les particules atteint seulement 50% de sa valeur maximale ($Q = 70$ de $160\eta C$, Figure III.17 b) alors que près de 80% de la masse totale est déplacée à $t = 8$ s ($m = 800$ g de 1050 g, Figure III.17 a)

➤ Variation de la masse en fonction de la tension et de la fréquence

La figure III.18 représente la variation de la masse transportée m pour différentes valeurs de la tension U et de la fréquence f .

Les expériences ont été faites en variant la fréquence qui s'étale de 20 jusqu'à 60 Hz et la tension appliquée qui varie de 0,8 à 1,4 kV. Le choix a été porté sur cette gamme de fréquences et de tensions parce qu'il n'y avait pas de mouvement pour des faibles valeurs de tensions et de fréquences.

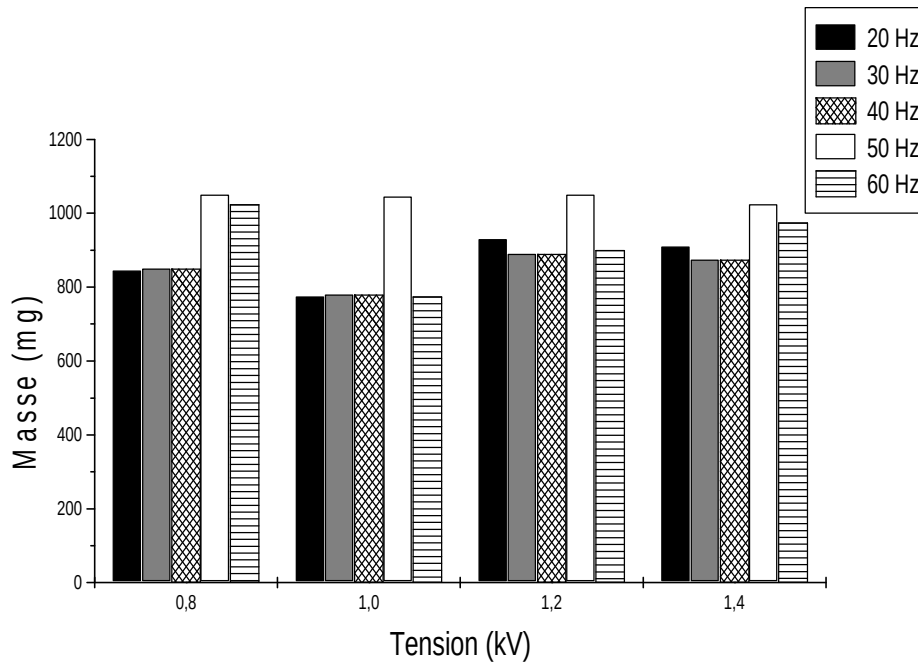


Figure III.18 : Variation de la masse déplacée pour différentes valeurs de la fréquence et de la tension appliquée.

Ces résultats montrent qu'aucun effet significatif de la tension U et de la fréquence f n'a été observé sur la masse déplacée. De plus, on voit bien que la masse m qui fluctue entre presque 800 et 1000 mg n'est affectée par ni par U ni par f , nous pouvons déduire que les deux facteurs (U et f) agissent plus sur le taux de mouvement des particules que sur la masse transportée en elle-même.

Par contre, dans d'autres travaux effectués au laboratoire, il a été observé que l'effet de la tension U devient significatif pour des valeurs supérieures à 1,4 kV.

➤ Diagramme de masse en fonction du temps pour $f=50$ Hz

Comme indiqué sur la figure III.20, la vitesse de déplacement des particules est fortement affectée par la tension U : la différence entre la durée $\Delta t = 37$ s et $\Delta t = 3$ s correspondant à $U = 0,8$ kV et $U = 1,4$ kV respectivement, est considérable.

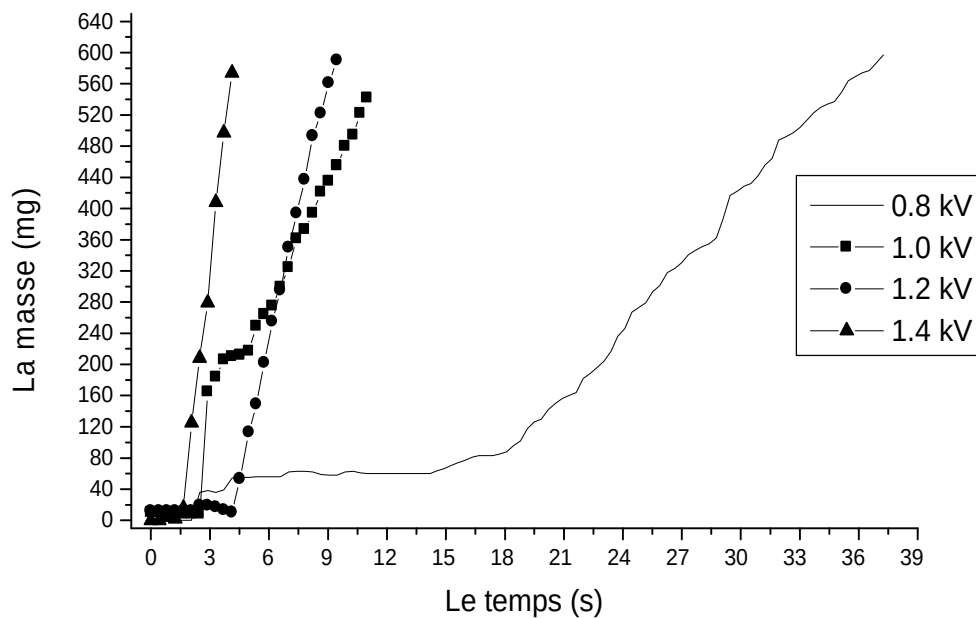


Figure III.19 : Diagramme de LABVIEW tracé jusqu'à 600 mg pour différentes valeurs de la tension ($f = 50$ Hz).

Ces courbes révèlent que pour une fréquence de signal $f = 50$ Hz, le taux de mouvement est 10 fois plus élevé pour $U = 1,4$ kV ($Q = 600/3 = 200$ mg / s) en comparaison avec $U = 0,8$ kV ($Q = 600 / 37 = 16$ mg / s).

En conséquence, nous pouvons conclure que l'effet du champ électrique est plus prédominant sur la force électrique qui détache la particule de la surface du convoyeur que sur la force diélectrophorétique elle-même. Nous prévoyons que le mouvement devrait être plus rapide pour des valeurs plus élevées de la tension appliquée ; mais, dans notre cas, il n'était pas possible d'appliquer une tension supérieure à 1,4 kV en raison de la rupture des étincelles entre les électrodes adjacentes.

➤ Diagramme de masse en fonction du temps pour $U=1.4$ kV

Le deuxième paramètre à étudier, concernant la variation de la masse en fonction du temps, est la fréquence du signal pour une tension fixe. Cette variation est illustrée par la figure III.20.

La durée augmente pour des faibles valeurs de la fréquence f qui varie de 20 à 40 Hz, par contre elle diminue brusquement entraînant un mouvement plus rapide des particules lorsque la fréquence augmente à 50 et 60 Hz. Ceci est probablement dû à la synchronisation entre l'inertie des particules et la relaxation de la polarisation qui serait optimale pour 50 et 60 Hz.

D'autres expériences effectuées pour des valeurs de fréquence supérieures à 60 Hz ont montré un mouvement beaucoup plus lent.

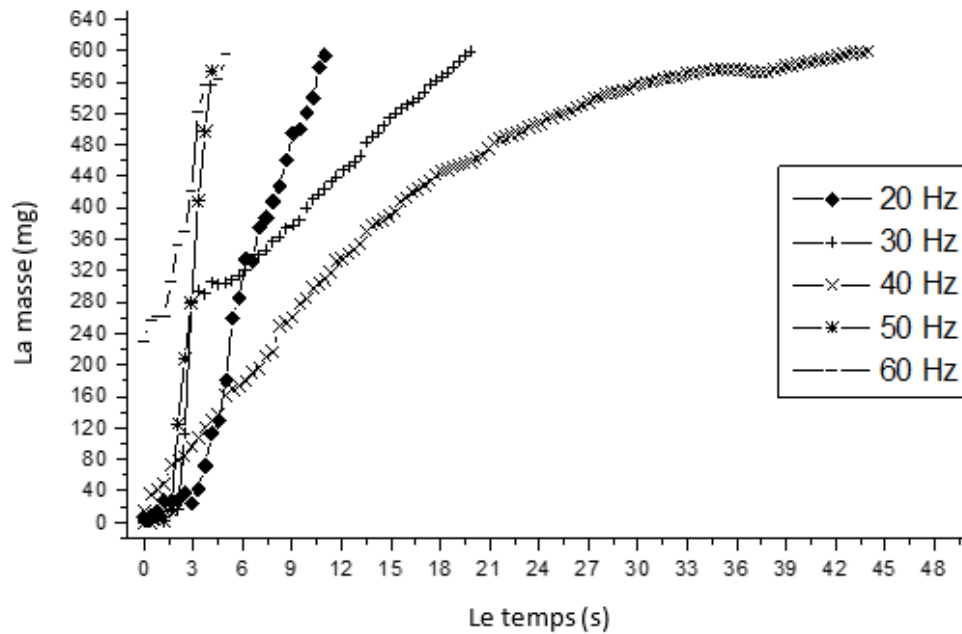


Figure III.20 : Diagramme de LABVIEW tracé jusqu'à 600 mg pour différentes valeurs de la fréquence ($U = 1,4$ kV).

➤ Influence du champ électrique sur la charge Q

Les résultats représentés dans la figure III.21 proviennent des mesures du rapport ($Q / m / t$) exprimé en ($\eta C / g / s$) pour plusieurs valeurs de la fréquence et différents niveaux de la tension appliquée.

Ces mesures sont utilisées pour analyser le taux de variation de la charge électrique par rapport au temps. Les résultats obtenus ont mis en évidence une découverte inattendue qui consiste en l'augmentation de la charge "triboélectrique" supposée Q avec la tension U .

En effet, si la charge gagnée par les particules était de nature triboélectrique provoquée par le frottement avec la surface du convoyeur, elle serait plus importante pour les plus petites valeurs de tension U pour lesquelles la durée du temps de parcours est plus élevée.

Les résultats obtenus montrent que la charge augmente avec l'intensité du champ électrique, suggérant que l'origine de cette charge serait plus vraisemblablement causée par des micro-décharges barrière diélectrique que par un frottement de contact avec la surface du convoyeur.

Les particules fines déposées sont chargées par le contact avec l'électrode et le micro-plasma généré sur la surface. Ces particules chargées se sont donc déplacées par les forces coulombienne et diélectrophorétique. Cette particularité a été confirmée par d'autres auteurs ayant utilisé des convoyeurs similaires [87,88].

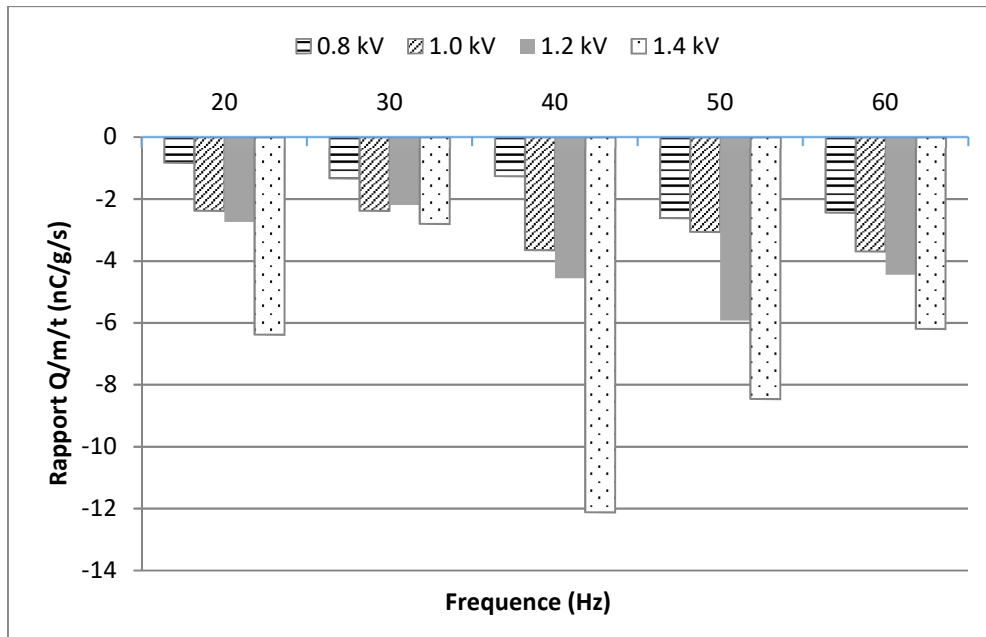


Figure III.21 : Évolution du rapport Charge / masse / t en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de la tension appliquée.

III.8. Étude de séparation de PA/bronze et du PVC/ cuivre

Les techniques de séparation des particules de métal/plastique utilisant des séparateurs électrostatiques sont généralement employées pour les granules de taille millimétrique.

III.8.1. Séparation des particules PA/ bronze

Après l'étude de déplacement des particules de PA, nous avons aussi réalisés des expériences de séparation de PA avec des brins de bronze en utilisant deux convoyeurs triphasé et biphasé en maintenant les mêmes conditions de travail : le convoyeur est mis sur un vibreur incliné de 30° tout en variant la fréquence de 10 à 60 Hz et la tension de 0,4 à 1,3 kV (ce n'était pas possible d'augmenter la tension à cause du claquage entre les électrodes).

Le déroulement des expériences est comme suit : la disposition des particules est dans l'extrémité gauche du convoyeur utilisé dans un intervalle de 2 cm, et on récupère les particules qui se déplacent après le déclenchement de la tension et du vibreur.

Cette étude porte sur la masse déplacée dans les bacs de récupération.

➤ Avec convoyeur triphasé

Une série d'essais fut conduite représentant la masse récupérée en fonction de la tension et de la fréquence.

Les résultats de la masse des particules de PA récupérés dans le collecteur sont illustrés à la figure III.22.

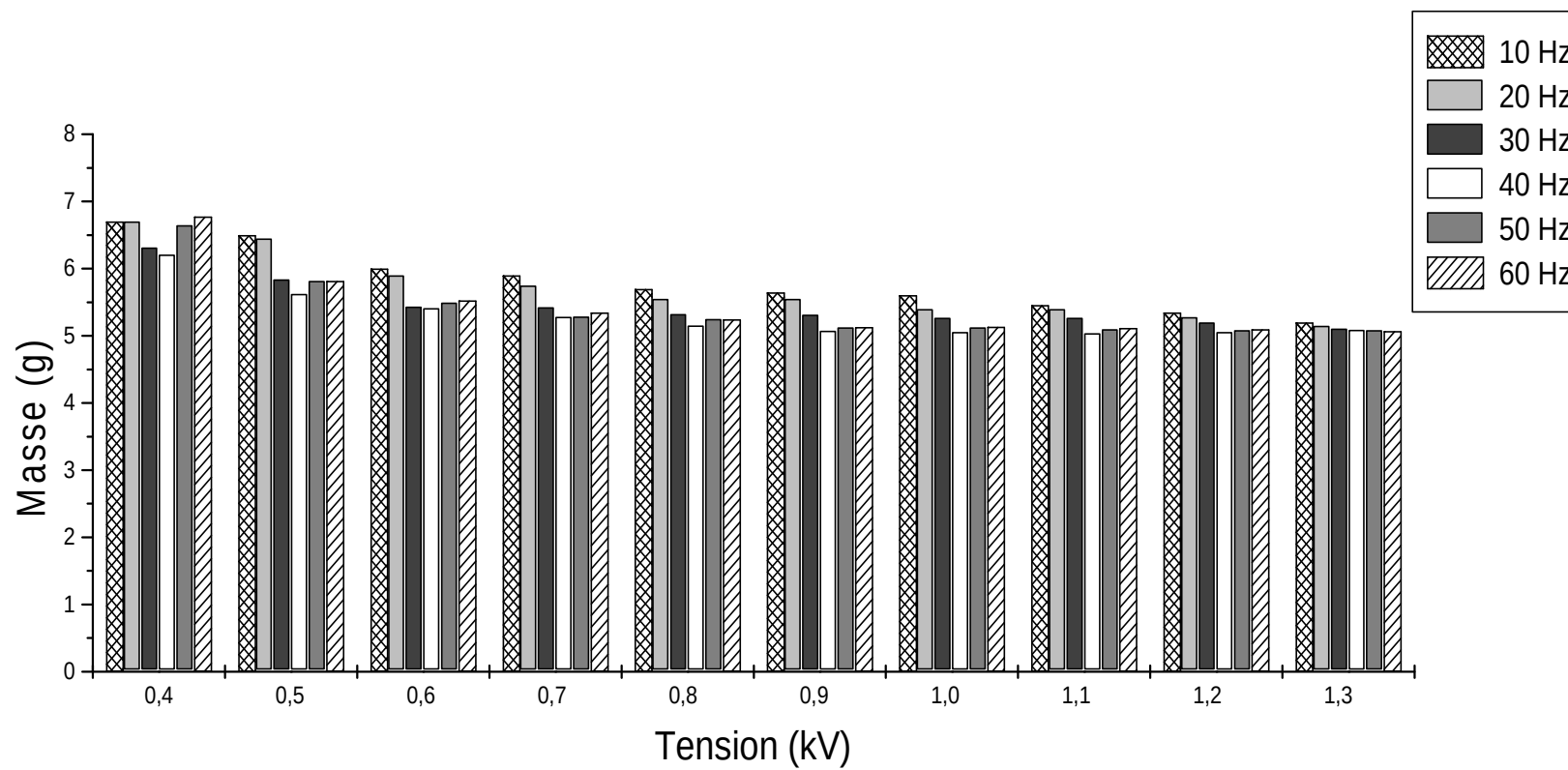


Figure III.22 : Variation de la masse de PA récupérée après séparation en utilisant un convoyeur triphasé.

➤ **Avec convoyeur biphasé**

Les résultats de pesée de la masse récupérée en fonction de la tension et de la fréquence sont montrés dans la figure III.23.

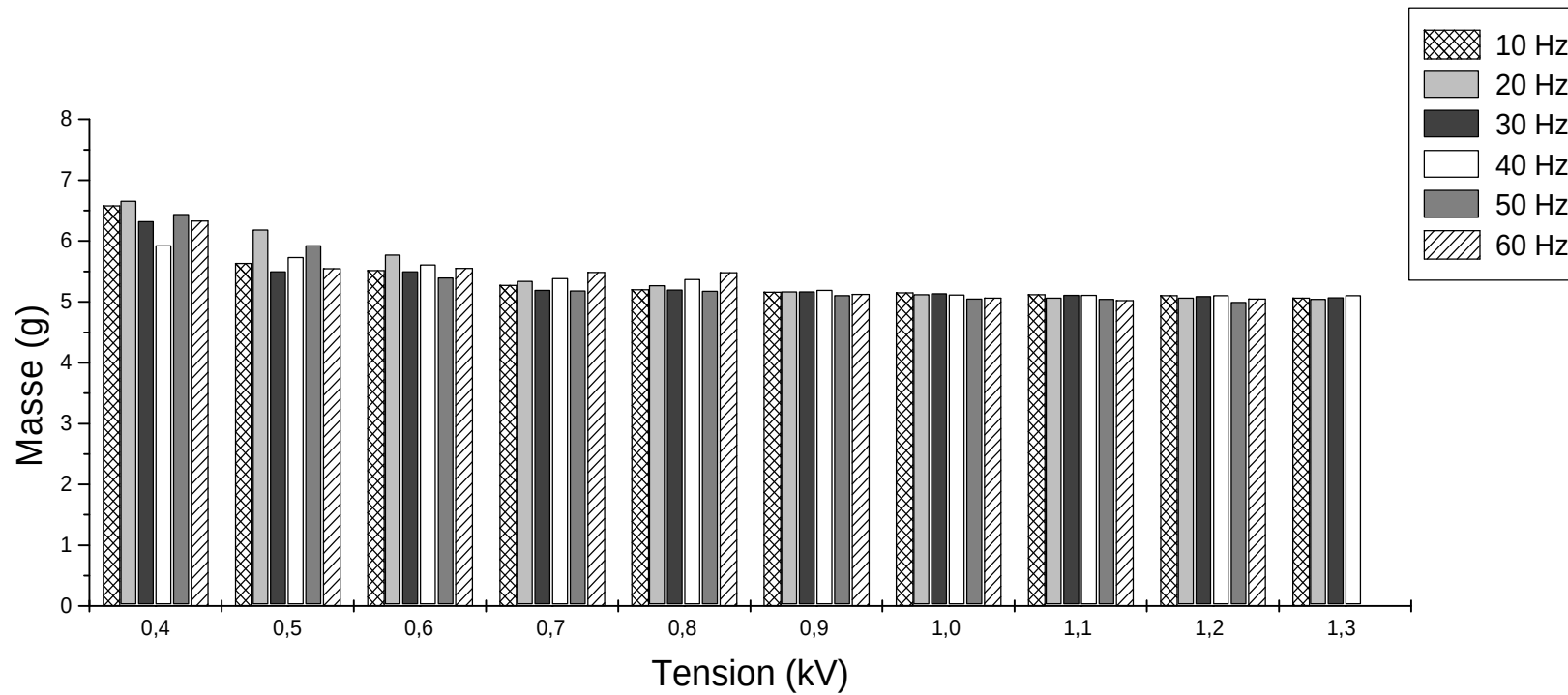


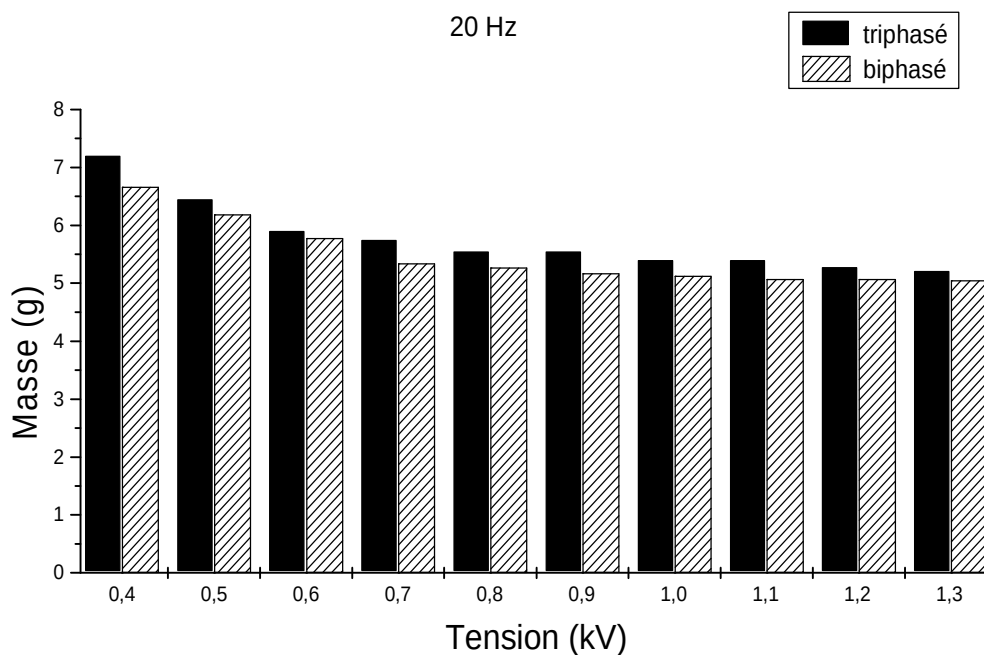
Figure III.23 : Variation de la masse de PA récupérée après séparation en utilisant un convoyeur biphasé.

Les deux séries d'essais (convoyeur triphasé et biphasé) donnant le même résultat, on a la confirmation que plus la tension augmente plus il y'a une meilleure pureté. Les deux figures (III.22 et III.23) révèlent que les histogrammes suivent la même évolution dans les deux cas. On obtient ainsi une fréquence optimale de fonctionnement de 40 Hz quelle que soit le convoyeur utilisé.

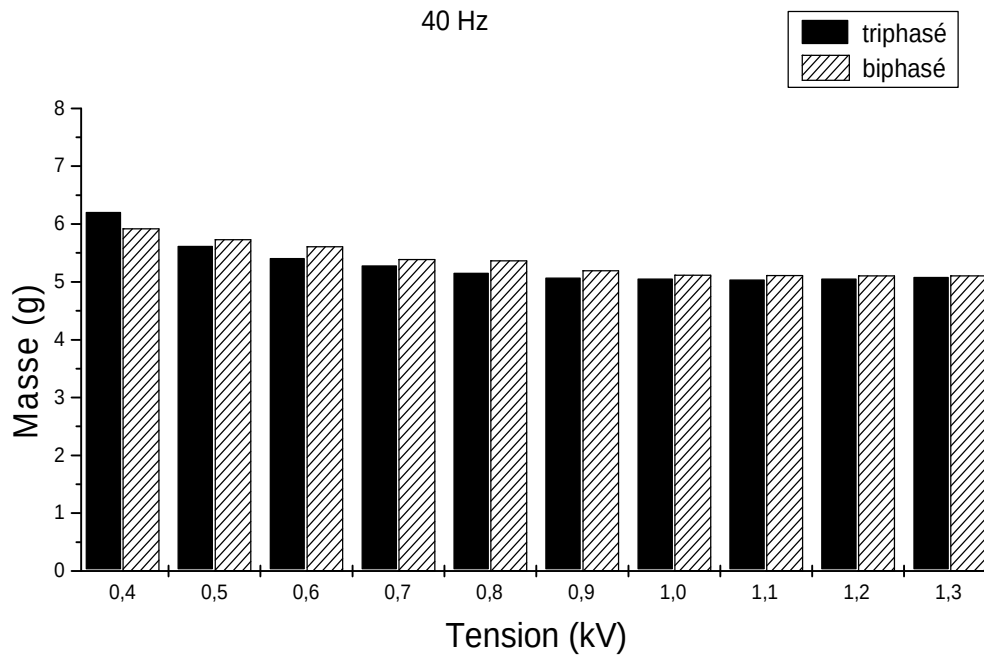
Dans le déroulement des expériences, nous avons remarqué un nouveau phénomène sur le comportement du métal sur les COM. Lorsque le COM vibre, les granules de PA se déplacent par vibration tandis que les particules du Bronze restent collées à la surface du convoyeur. Cette observation suggère qu'il y'a une force significative d'attraction appliquée sur les granules du métal, qui permet donc la séparation de ce mélange.

Cependant, les résultats apportés par les deux séries d'essais convergent et suggèrent que le bronze reste maintenu aux convoyeurs lorsque l'on augmente la tension appliquée et la fréquence. Contrairement au déplacement du PA, ce dernier entraînait avec lui quelques brins de bronze.

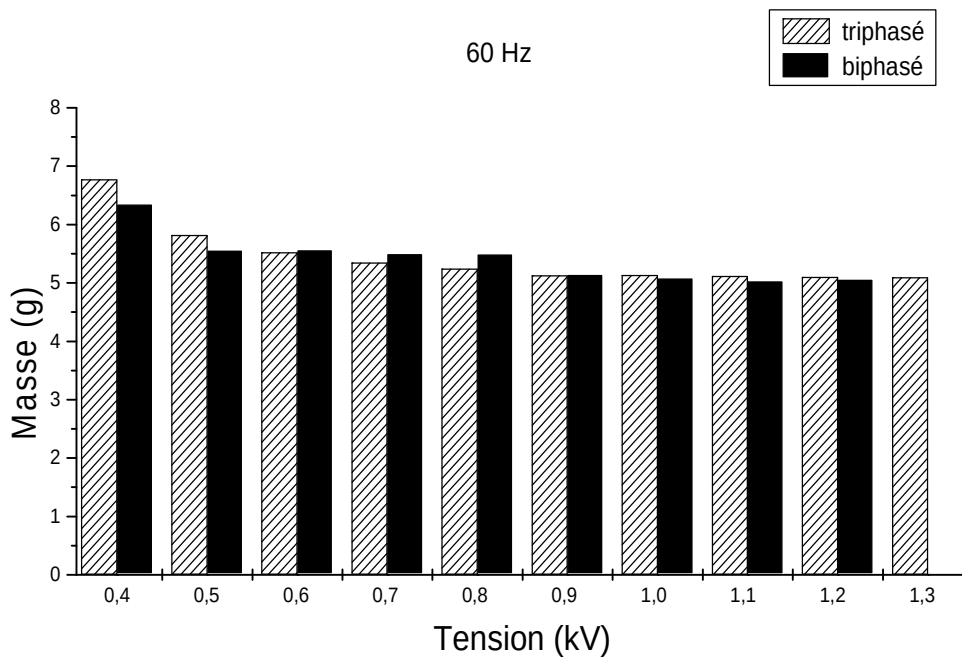
Nous allons comparer la masse déplacée dans les bacs de récupération pour les deux convoyeurs utilisés pour les trois fréquences 20 Hz, 40 Hz et 60 Hz.



(a)



(b)



(c)

Figure III.24 : Comparaison de masse entre les deux convoyeurs triphasé et biphasé utilisés pour différentes fréquences : (a) 20 Hz, (b) 40 Hz et (c) 60 Hz.

Les résultats montrent qu'il n'y a pas une grande différence entre le COM biphasé et triphasé.

III.8.2. Séparation du mélange de particules micronisées PVC / cuivre

Nous avons tenté de séparer un mélange granulaire de masse totale de 500 mg composé de 250 mg de particules micronisées de PVC et de 250 mg de particules de cuivre

avec une taille de particule moyenne d'environ 100 μm . Une tension U de 1400 V a été choisie représentant la valeur maximale possible ne provoquant pas de claquage entre les électrodes adjacentes.

Il a été observées que contrairement aux granulés de PVC, les particules de cuivre vibraient légèrement mais ne bougeaient pas. La force principale provoquant le mouvement des particules est la force diélectrophorétique appliquée aux particules isolantes à cause de la charge de polarisation acquise par ces particules. L'effet de polarisation n'étant spécifique qu'aux particules isolantes, la force diélectrophorèse n'agit pas sur les granules métalliques.

À la fin de chaque expérience, la masse de particules de cuivre mélangées avec la petite quantité restante de particules de PVC sur le convoyeur a été mesurée. La figure III.26 montre les résultats obtenus en termes de pureté du cuivre en fonction des six valeurs de fréquence déjà choisies auparavant.

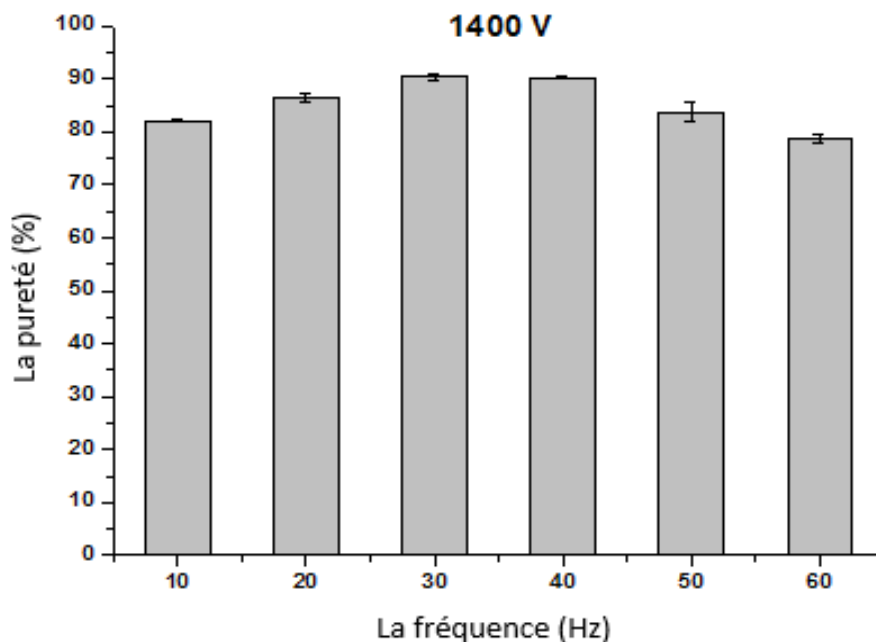


Figure III.25 : Variation de la Pureté du produit de cuivre après séparation en fonction de la fréquence.

La diminution de la pureté du cuivre correspond à l'augmentation de la masse restante de particules de PVC sur le convoyeur, cette masse est supérieure à la celle des particules obtenue précédemment lors de l'utilisation de particules de PVC uniquement. Dans le cas du produit mélangé, certaines particules de PVC restent collées sur le transporteur emprisonné entre les granules de cuivre, ce qui diminue la pureté du cuivre.

Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons mené une étude expérimentale pour analyser la dynamique du mouvement des particules sur un convoyeur à ondes mobiles en utilisant le VI. Les séries d'essais que nous avons effectuées ont permis d'établir les points suivants :

- L'utilisation de l'instrumentation virtuelle a permis de connaître le taux de déplacement et l'évolution de la charge des particules millimétriques et micronisées dans le temps en fonction de divers facteurs.

- La masse déplacée n'est pas significativement affectée par la tension et la fréquence. Les deux facteurs agissent plus sur le taux de mouvement des particules que sur la masse transportée elle-même, dans les limites des facteurs analysés.

- L'effet du niveau de tension est plus prédominant sur la force électrique qui détache la particule de la surface du convoyeur que sur la force diélectrophorétique elle-même.

- Le convoyeur de champ multi-phases peut être utilisé efficacement pour la séparation de mélanges granulaires comprenant des particules de métal et de plastique micronisées.

- Une application typique du procédé de séparation TWC pourrait également être utilisée par exemple pour récupérer des déchets industriels nécessitant un broyage fin afin de dissocier complètement le métal et la matière plastique.

Le chapitre suivant est consacré à l'utilisation du VI pour la mesure de la charge dans le transport des particules dans une canalisation.

CHAPITRE IV :
IDENTIFICATION DU PRODUIT
GRANULAIRE PAR LA MESURE
DE LA CHARGE ELECTRIQUE

CHAPITRE IV : IDENTIFICATION DU PRODUIT GRANULAIRE PAR LA MESURE DE LA CHARGE ELECTRIQUE

Les phénomènes triboélectriques résultant des impacts entre les particules et la paroi sont connus pour affecter l'efficacité des systèmes de transport en phase diluée de type à aspiration. Cependant, cette charge triboélectrique pourrait être utilisée comme une "image" du produit granulaire passant à travers le tuyau. Le but de ce chapitre est d'étudier la faisabilité de la mesure de la charge triboélectrique acquise pour l'utilisation en tant que capteur de détection électrostatique pour l'identification du produit qui traverse le pipeline. Des informations utiles sur le produit ont pu être déduites telles que la nature (plastique ou métal), la composition (échantillon simple ou binaire), la taille granulométrique

Dans notre travail on évalue les effets de deux facteurs qui influencent sur la charge des particules dans ces installations : le débit de matériau et le débit d'air dans une conduite équipée d'un moteur triphasé asynchrone à cage d'écureuil dont le rôle d'aspirateur.

L'étude concerne le comportement des particules millimétriques (PVC, PC, PEHD blanc, PEHD noir et cuivre), et aussi du PVC poudre gris provenant des déchets industriels. Les essais ont été réalisés avec un tube cylindrique en Aluminium.

Les systèmes de transport pneumatique en phase diluée de type aspirateur sont typiquement utilisés pour le transport de poudres et de matériaux granulaires [91]. Plusieurs phénomènes triboélectriques se produisent dans les conduits à travers lesquels ces matériaux sont transportés [92], où l'échange de charges électriques se produit après des collisions entre particules-particules ou entre particules-parois [93]. La charge et sa polarité acquises par la particule varient en fonction de la nature des tuyaux et des matériaux transportés [94,95].

Le but de ce travail est d'étudier la faisabilité de l'utilisation de la mesure de charge triboélectrique pour l'identification et le contrôle des produits circulant dans la conduite [96]. Une telle charge qui est communément considérée comme une source de décharge électrostatique est mesurée afin de déduire des informations utiles sur le matériau granulaire.

L'influence de certains facteurs tels que la nature du produit (métal ou plastique), la composition (simple ou binaire) et la taille des particules ont été analysées [97].

Les expériences ont été réalisées avec des particules de plastique de taille mm et μm , en utilisant un tube en aluminium de 1,9 mètre de long. Ils ont simulé les conditions de fonctionnement des systèmes de transport pneumatique en phase diluée par aspiration intermittente habituellement utilisés pour alimenter une classe de procédés industriels.

IV.1. Echantillons utilisés

IV.1.1. Polycarbonate (PC)

C'est un matériau qui présente d'excellentes propriétés mécaniques et une bonne résistance thermique jusqu'à 120°C . Comme il est transparent, on l'utilise pour le capotage de machines et pour la fabrication des casques de moto ou des boucliers de police (tableau IV.1).

Tableau IV.1: Caractéristique principales du polycarbonate (PC)

Densité [g/cm^3]	1.2
Couleur	Orange
Forme	cylindrique
Taille [mm]	1-2
Masse [mg]	25
Absorption d'eau à 23°C HR 50 % [%]	0.15
Résistance à la traction [N/mm^2]	70
Rigidité diélectrique [kV/mm]	30
Résistivité transversale [Ω/cm]	10^{15}
Constante diélectrique	3

Il sert aussi à la fabrication des CD et des DVD, des vitrages des guichets à l'épreuve des balles et des phares, feux arrière et clignotants de voitures (Figure IV.1).



Figure IV.1 : Echantillon des granules de polycarbonate (PC)

IV.1.2. PEHD

Les polyéthylènes sont des plastiques semi-cristallins. Les polyéthylènes présentent une structure moléculaire simple. Les segments CH₂ sont alignés selon une disposition simple. La longueur des chaînes détermine principalement les propriétés du polyéthylène. Le matériau PE-HD se distingue par une résistance élevée pour une bonne rigidité, ainsi que par une transformation sans complication.

La plage de température d'utilisation va de -50°C à +80°C. Le PE-HD possède une bonne résistance chimique et une grande résistance au fendillement par contrainte envers de nombreux fluides organiques et inorganiques.

Tableau IV.2 : Les caractéristiques électriques du PEHD

Constantes diélectriques à 1 MHz	2,3-2,4
Facteur de dissipation à 1 MHz	$1-10 \times 10^{-4}$
Résistance diélectrique (kV * mm ⁻¹)	22
Résistivité de surface (Ohm/carré)	10^{13}
Résistivité volumique (Ohm*cm)	$10^{15}-10^{18}$

On a utilisé d'autres particules telle que : les granules de PVC et du Cuivre ainsi que les particules poudreuses de PVC décrites dans le chapitre 3.

IV.2. Dispositif expérimental

L'installation utilisée pour les expériences, peut être divisée en trois entités fonctionnelles distinctes : la partie d'admission des matériaux granulaires, le dispositif de transport et l'instrumentation de mesure (Figure IV.2).

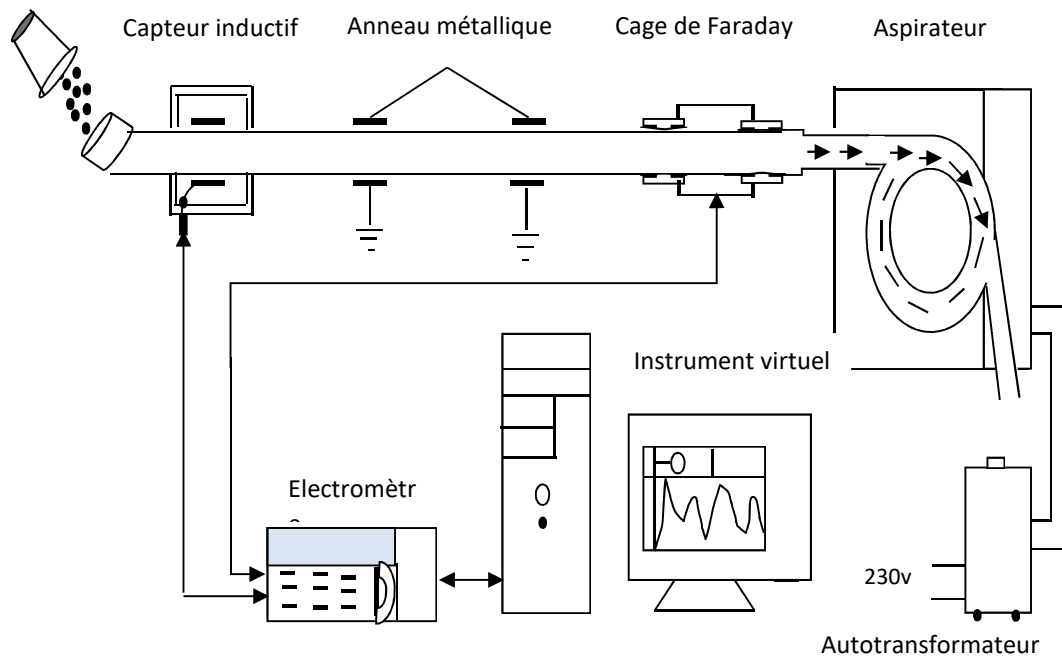


Figure IV.2 : Représentation schématique de l'installation expérimentale pour l'étude du processus de charge des matériaux granulaires

Les expériences ont été réalisées dans des conditions ambiantes stables (température 18-20°C, humidité relative 40-50%) sur l'installation de laboratoire. Le dispositif comprend un tube droit en Aluminium (longueur : 1,9 m, diamètre intérieur : 40 mm) et une unité d'aspiration dont le débit d'air a été modifié à l'aide d'un variateur de vitesse électronique en faisant varier la fréquence. À un débit d'air nominal correspondant à une fréquence $f = 50$ Hz, la vitesse de rotation du moteur d'aspiration maximale est de 2860 tr/min (Figure IV.3).

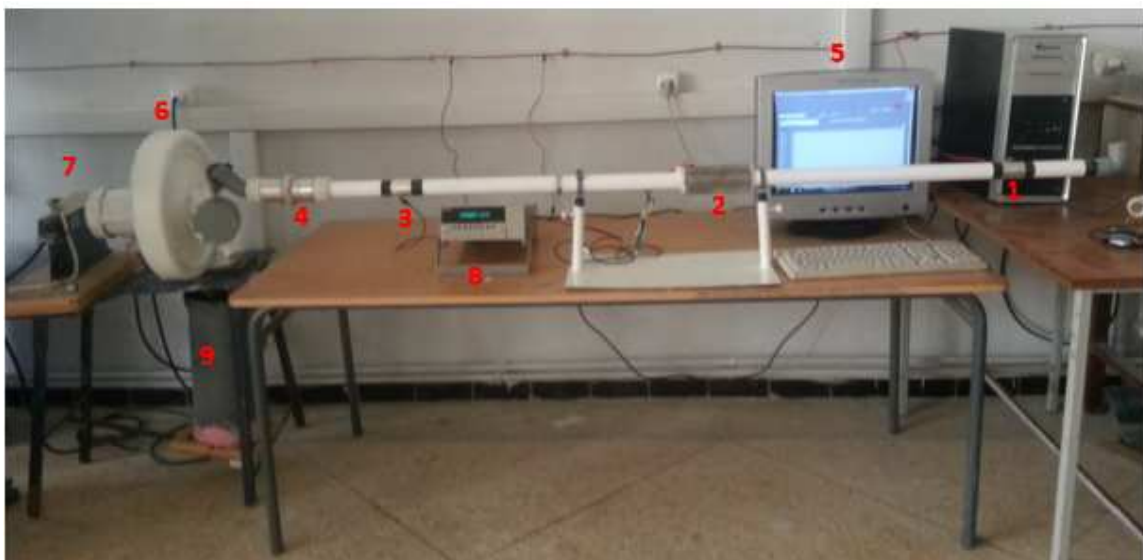


Figure IV.3 : Installation expérimentale pour mesure de la charge triboélectrique des matériaux ; 1,2 et 3 : Capteur de charge par induction – 4 : Cage de Faraday – 5 : Instrument virtuelle – 6 : Moteur (aspirateur) – 7 : Variateur de tension – 8 : Electromètre – 9 : Bac

Les processus de chargement triboélectrique dans le tuyau ont été suivis en utilisant une cage de Faraday et des capteurs de charge reliés à un électromètre contrôlé par LABVIEW.

Les capteurs de charge ont été placés dans différentes positions sur le tuyau en Aluminium.

La cage de Faraday a été placée entre l'extrémité du tube et l'entrée de l'unité d'aspiration et connectée à un électromètre via un câble BNC.

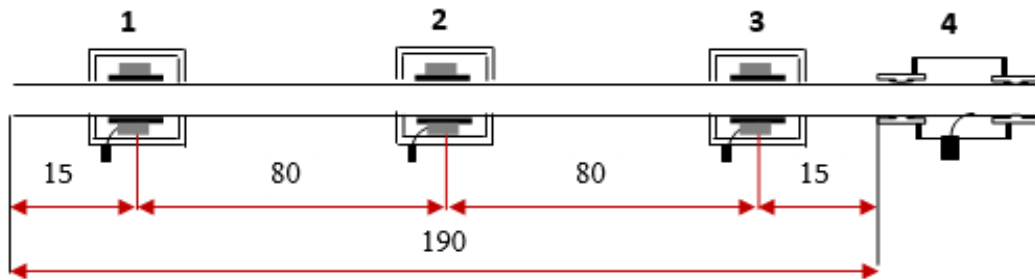


Figure IV.4 : Points de mesure de la charge électrique : (toutes les dimensions en cm) ; 1, 2, 3 : capteur de charge par induction – 4 : cage de faraday

IV.2.1. Capteur électrostatique

La mesure de la charge électrique qui s'accumule dans le tuyau en Al composant un système de transport pneumatique peut être effectuée par un capteur utilisant le phénomène d'induction électrostatique.

Du point de vue constructif, le dispositif de mesure est constitué d'une électrode de mesure de 10 cm en longueur (anneau en aluminium d'épaisseur 0.5 mm) isolé de tuyau par une bande isolante en ruban adhésif d'épaisseur 0.5 mm (Figure IV.5).

L'électrode de mesure est protégée par un écran métallique de l'influence des champs électriques extérieurs. Elle est connectée par un câble BNC à un électromètre Keithley.

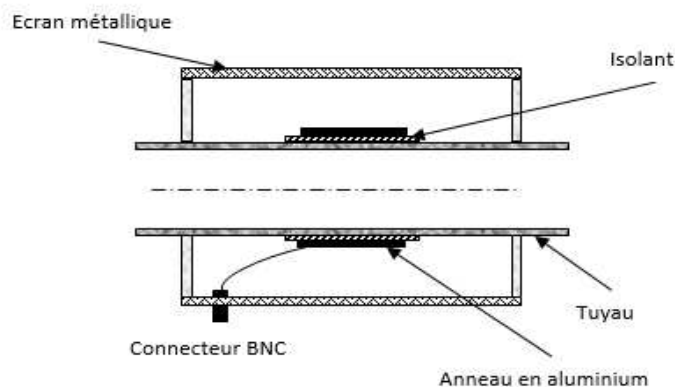
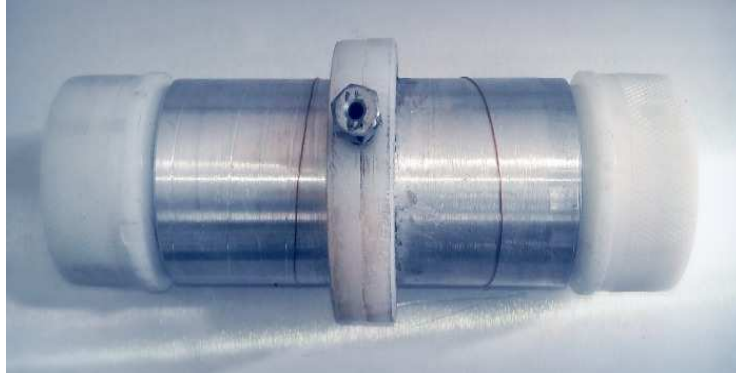


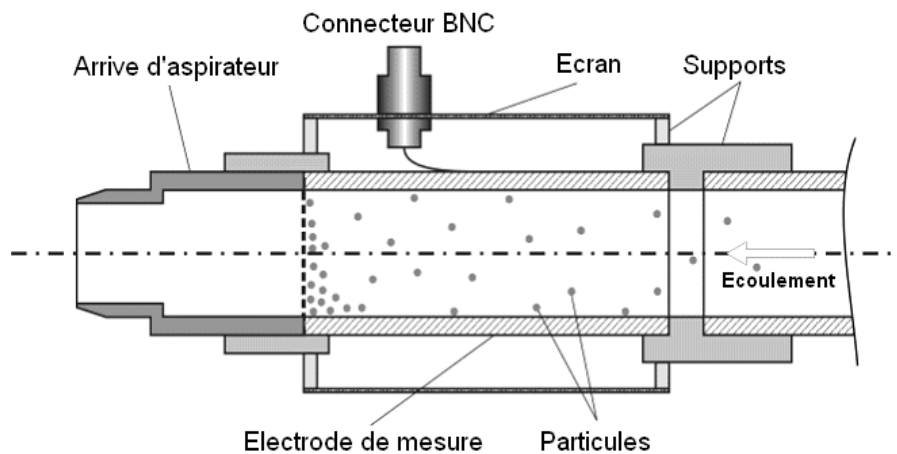
Figure IV.5 : Dispositif de mesure de la charge électrique induite dans la paroi d'un tuyau

IV.2.2. Capteur à cage Faraday

Un dispositif plus proche de la cage de Faraday classique a été conçu pour faire des mesures sur le même processus de tribo-électrisation mais en utilisant une méthode différente (Figure IV.6).



(a) Photographie de la cage faraday



(b) Représentation schématique

Figure IV.6 : Aspect de la cage de Faraday utilisé pour mesurer la charge des particules : (a) photo du dispositif, (b) Représentation schématique

L'électrode de mesure est composée d'un tuyau métallique d'une longueur de 10 cm et de même diamètre intérieur que les tuyaux employés pour transport.

Elle est fixée par deux supports cylindriques en téflon utilisé aussi pour fixer l'écran relié à la terre.

De cette façon, le tuyau Aluminium était maintenu à un potentiel flottant par rapport à la terre. L'électromètre (modèle 6415, Keithley Instruments) connecté à la cage de Faraday et aux capteurs de charge a été exploité comme un Coulomb-mètre et contrôlé par un instrument virtuel (VI) conçu sur mesure, qui a été développé dans un environnement LABVIEW (National Instruments) [110].

IV.3. Matériel utilisé

a) Thermo-hygromètre

Un Thermo-hygromètre désigne un matériel électronique mesurant à la fois la température (généralement en °C) et l'humidité relative (en % du seuil de saturation). La mesure se fait au moyen de sondes adaptées, éventuellement à distance.

b) Tachymètre

Le tachymètre est un compte-tours permettant d'indiquer la vitesse de rotation d'un mobile, comme une poulie, un arbre de ventilation ou de moteur (tr/min). On le trouve couramment dans l'industrie et les transports, où il permet un contrôle et une surveillance des machines rotatives.

c) Électromètre

Un électromètre est un multimètre à courant continu capable de mesurer des tensions, en consommant un courant très faible grâce à une résistance d'entrée très grande ($> 10^{15} \Omega$).

Le circuit d'entrée d'un électromètre est, généralement, un amplificateur opérationnel à transistors à effet de champ (FET), qui présente, en plus de la résistance d'entrée très grande, un courant de fuite et une tension de décalage (offset) très faibles.

d) Balance

Nous avons aussi utilisé une balance digitale de précision 0,1 g pour mesurer la masse des produits utilisés.

e) Moteur triphasé asynchrone à cage d'écureuil (aspirateur)

Le moteur asynchrone à cage est le type de moteur le plus utilisé.

Un moteur Dietz /KG a été utilisé pendant le déroulement des expériences, son rôle est d'aspirer l'air pour assurer le transport des granules (Figure IV.7). (Caractéristiques du moteur : $P = 0,43 \text{ kW}$, $\Omega = 2860 \text{ tr mn}^{-1}$).



Figure IV.7 : Photographie du Moteur

f) Variateur de fréquence

Un variateur électronique de vitesse est un dispositif destiné à régler la vitesse et le moment d'un moteur électrique à courant alternatif en faisant varier la fréquence et la tension, respectivement le courant, délivrées à la sortie de celui-ci. Un variateur type ATV32HU22M2 de puissance 2.2 kW et de fréquence d'entrée 50/60 Hz a été utilisé pour faire varier la vitesse du moteur. Tension d'entrée 220 /240 monophasée et tension de sortie 220/240 triphasée.

IV.4. Etude expérimentale

IV.4.1. Identification de la nature et de la composition du produit

L'étude expérimentale a été effectuée en utilisant les particules PVC, PC, PEHD blanc, PEHD noir, le cuivre et du PVC. Les résultats de mesure de la charge obtenus en fonction de la fréquence du variateur pour la cage de Faraday et le capteur 2, sont présentés dans cette section.

Les Figures IV.8, IV.9 et IV.10 représentent un exemple typique du diagramme tracé par LABVIEW de l'étude expérimentale, dont Les courbes sont enregistrées par l'électromètre relié à la cage faraday (à la fin de tuyau de transport). Le pic de charge Q_p représente la charge des particules tandis que la charge finale Q_w représente la charge qui subsiste sur la paroi après le passage des granules.

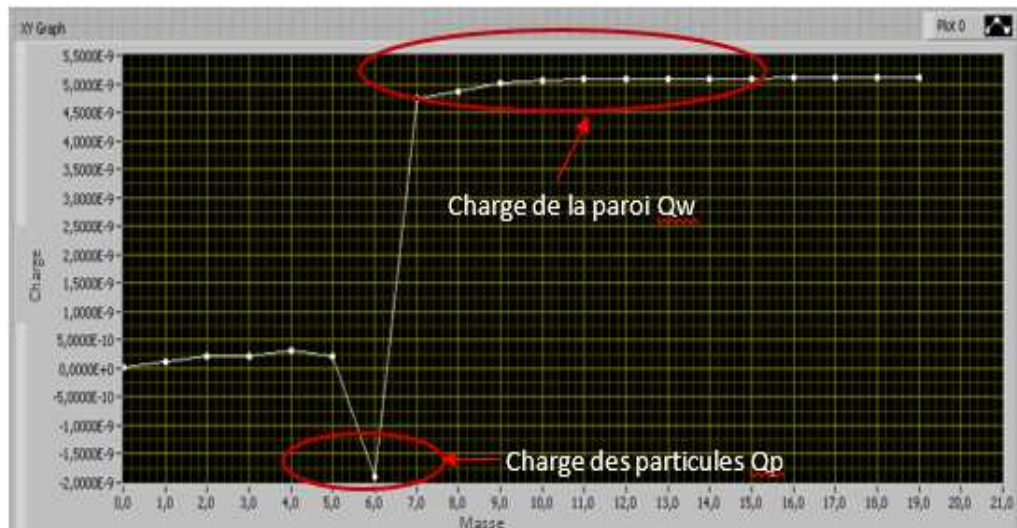


Figure IV.8 : Diagramme tracé par LABVIEW montrant l'évolution de la charge des particules et de la paroi en fonction du temps (PVC)

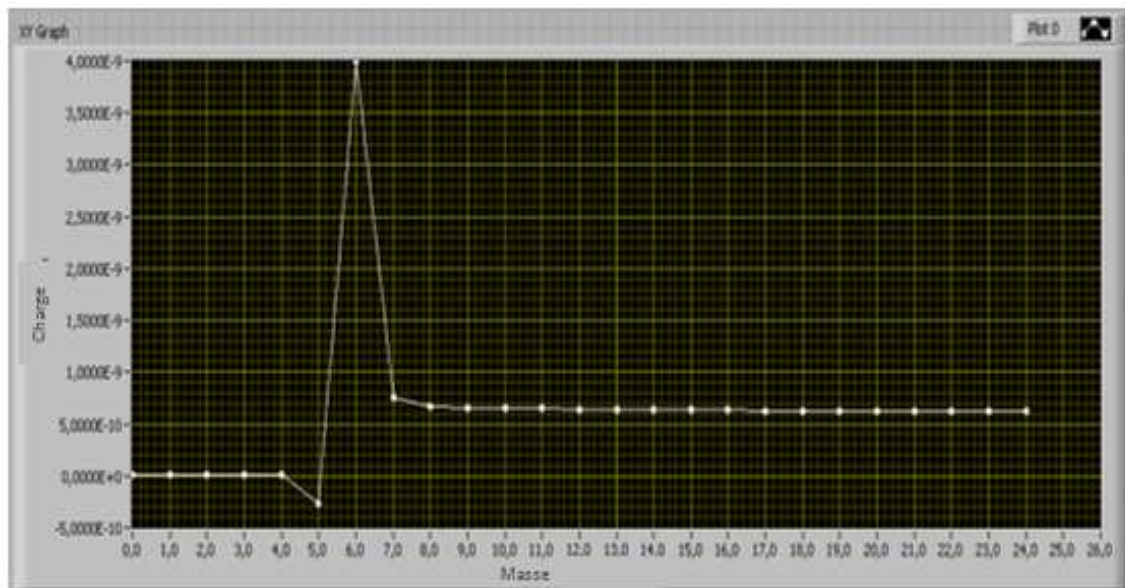


Figure IV.9 : Digramme tracé par LABVIEW montrant l'évolution de la charge des particules et de la paroi en fonction du temps (PA)

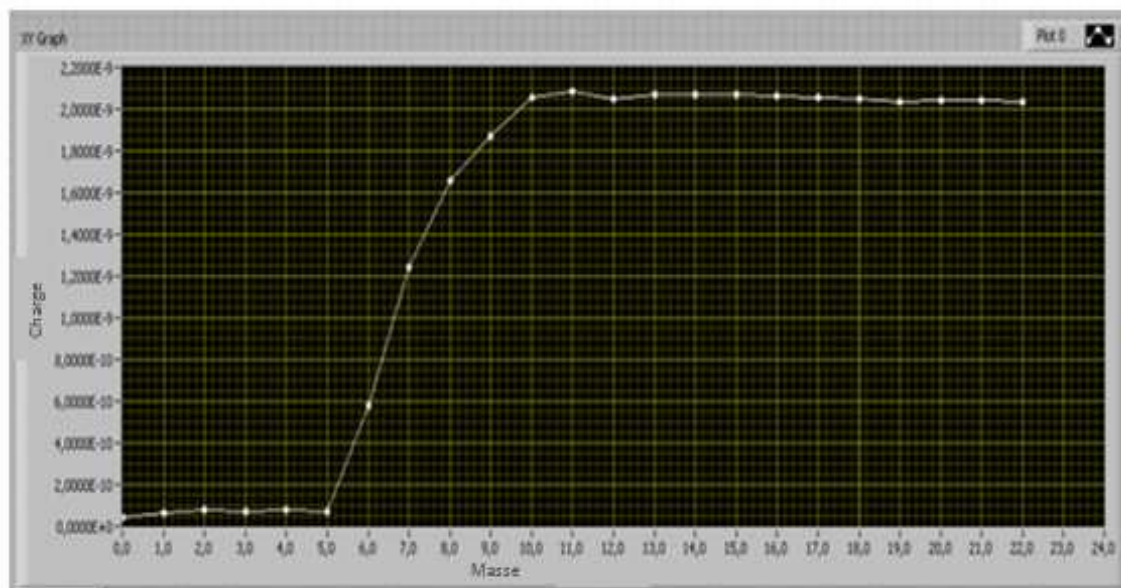


Figure IV.10 : Digramme tracé par LABVIEW montrant l'évolution de la charge des particules et de la paroi en fonction du temps (Cuivre)

Les courbes montrent un pic négatif dans le cas de PVC (Figure IV.8) et un pic positif dans le cas du PC (Figure IV.9). Dès que les particules chargées sortent de la cage de Faraday, le diagramme indique la charge mesurée sur la paroi. Par contre, dans le cas de l'écoulement des granules de cuivre, la charge électrique mesurée est nulle (Figure IV.10).

Par conséquent, comme montré par les diagrammes tracés, la mesure de la charge triboélectrique permet de déterminer la nature du produit circulant à travers la ligne de transport pneumatique en fonction de la polarité de charge à la fois de Q_p et de Q_w .

Le flux de particules de plastique indique soit une charge positive ou négative Q_p pour les particules de PVC et PC respectivement, en fonction de leur position respective dans la série triboélectrique par rapport à l'Aluminium (Figure IV.11). Nous avons remarqué le même comportement pour les granules de PEHD blanc, PEHD noir et la poudre de PVC gris.

Un matériau vers la gauche de la série, lorsqu'il est mis en contact avec un matériau sur le côté droit de la série, va acquérir une charge plus négative (Figure IV.11). Plus les deux matériaux sont éloignés l'un de l'autre sur la série, plus la charge transférée est grande. Les matériaux proches les uns des autres sur la série ne peuvent échanger qu'une petite charge.

Cependant, il n'y a aucune charge enregistrée Q_p par l'électromètre lorsque les granules de métal s'écoulent à l'intérieur de la conduite.

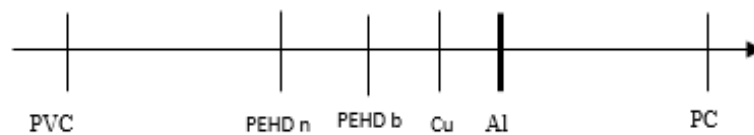


Figure IV.11 : Série triboélectrique

Les charges Q_p et Q_w mesurées par l'électromètre sont générées par un phénomène électrostatique complexe tel que décrit à la Figure IV.16. Dans le cas des particules de PVC par exemple, deux types de charge sur la paroi interne de la cage de Faraday sont produits : une charge induite négative Q_i et une charge triboélectrique positive Q_t .

Lorsque les particules traversent la cage de Faraday, l'électromètre indique un pic de charge négatif $Q_p = Q_i + Q_t$ (Figure IV.12) ; la charge Q_i (négative) est plus grande car presque toutes les particules produisent une telle charge Q_i par induction électrostatique, tandis que la charge Q_t est générée uniquement par l'impact des granules avec la paroi. De plus, lorsque tous les granules quittent la cage de Faraday, alors la charge triboélectrique positive Q_t seule reste sur la paroi affichée par le plateau de charge Q_w .

Noter que la charge Q_w laissée sur la paroi est supérieure à Q_p produite par les particules car cette dernière est égale à la somme d'une charge positive et d'une charge négative (Q_t) et (Q_i), respectivement.

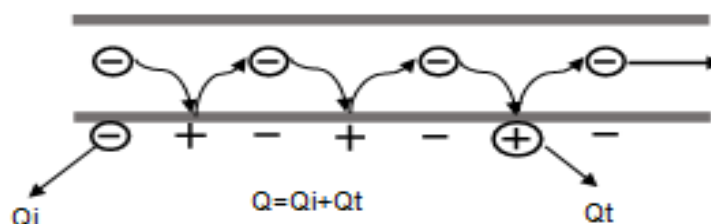


Figure IV.12 : Charges produites par les particules dans la cage Faraday

IV.4.2. Résultats obtenus

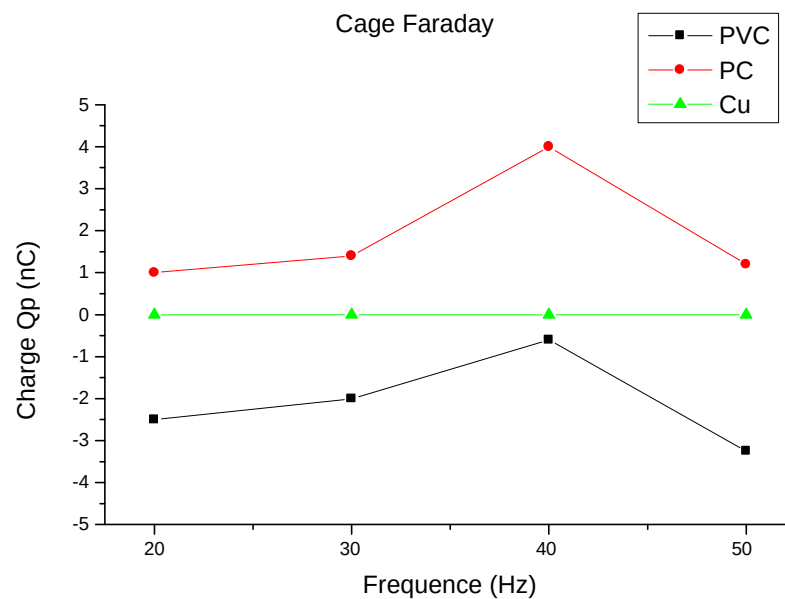
Nous présentons dans cette section les principaux résultats obtenus avec les différents produits.

IV.4.2.1. Granules PVC, PC et le cuivre

a. Influence de la vitesse de l'air

La vitesse d'écoulement des particules est réglée par la fréquence du variateur de vitesse. Nous faisons passer à travers la canalisation en Al successivement 10 g de PVC, 10 g de PC et 10 g du cuivre. Après chaque expérience, le tube est déchargé par mise à la terre. Nous relevons à chaque fois les charges des particules mesurées à la cage de Faraday et le capteur. Les résultats obtenus en fonction de la fréquence sont illustrés à la figure IV.13.

D'après les résultats obtenus, on remarque que la charge de la cage Faraday est supérieure à celle du capteur à cause de la position de la cage de Faraday qui est à la fin du tube et celle du capteur qui est située au centre du tube. En effet, les particules subissent au total un plus grand nombre de collisions en arrivant à la cage de Faraday.



a)

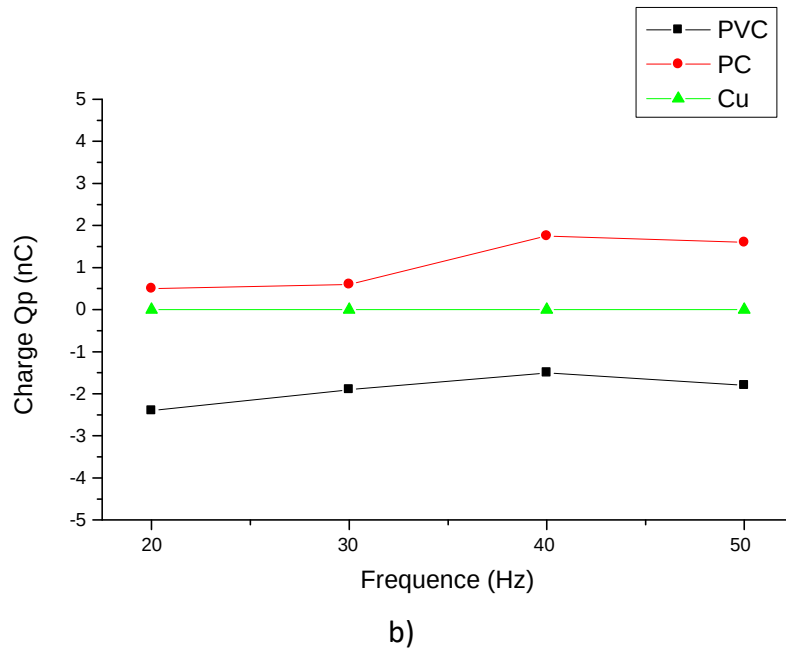


Figure IV.13 : Variation de la charge des particules en fonction de la fréquence de variateur ;
a) : Cage Faraday, b) : Capteur 2

On constate que les particules de PVC et de PC conservent leur même polarité de charge (positive pour PC et négative pour PVC) tandis que les granules de cuivre restent non chargées. On peut voir qu'aucune charge n'a été produite lors du passage des particules de cuivre. Noter que le niveau de charge électrique diminue pour une fréquence élevée de 50 Hz, ceci est dû à la diminution du nombre de collisions avec la paroi lors du passage rapide des granules.

b. Influence de la composition

Nous avons utilisé trois combinaisons de produit binaire d'une même masse totale de 20 g, à savoir : PVC + PC, PVC + cuivre et PA + cuivre. Nous avons utilisé pour chaque produit trois valeurs de composition différentes, à savoir : 20% - 80%, 50% - 50% et 80% - 20%. Nous relevons à chaque fois les charges des particules mesurées à la cage de Faraday et au capteur 2. Les résultats obtenus pour une fréquence de 100 Hz sont illustrés par les courbes des figures IV.14-16.

Remarque : le premier nombre de la composition correspond au premier produit. Par exemple : PVC+PC 20% - 80%, ou PVC-PC 20% - 80% veut dire 20% PVC et 80% PC.

D'après les résultats obtenus, on remarque que la charge au centre du tube mesurée par le capteur est inférieure à celle mesurée à la fin du tube. En effet, le nombre de collisions augmente avec la longueur du tube.

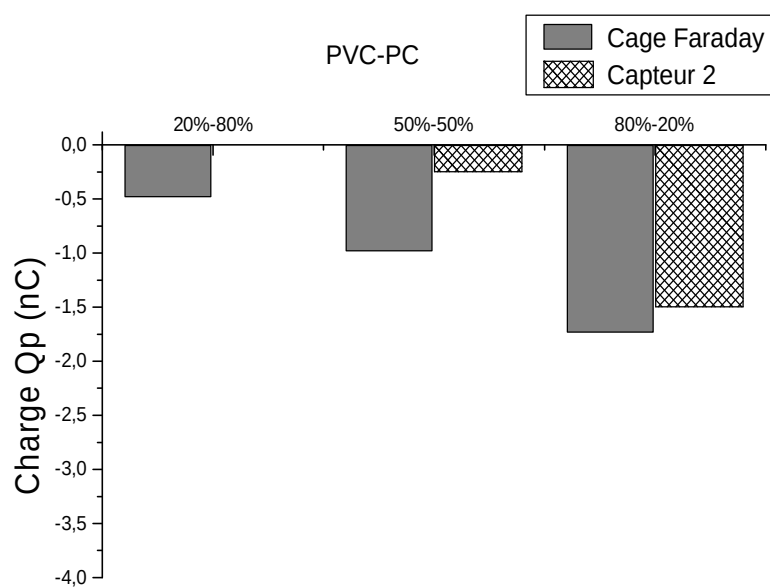


Figure IV.14 : Variation de la charge du mélange PVC-PC en fonction de la composition

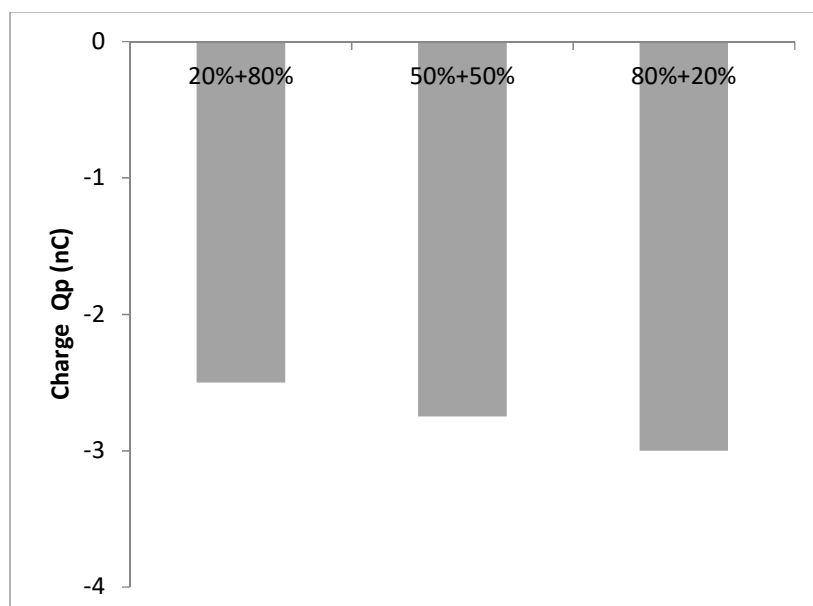


Figure IV.15 : Variation de la charge du mélange PVC-cuivre en fonction de la composition dans la cage Faraday

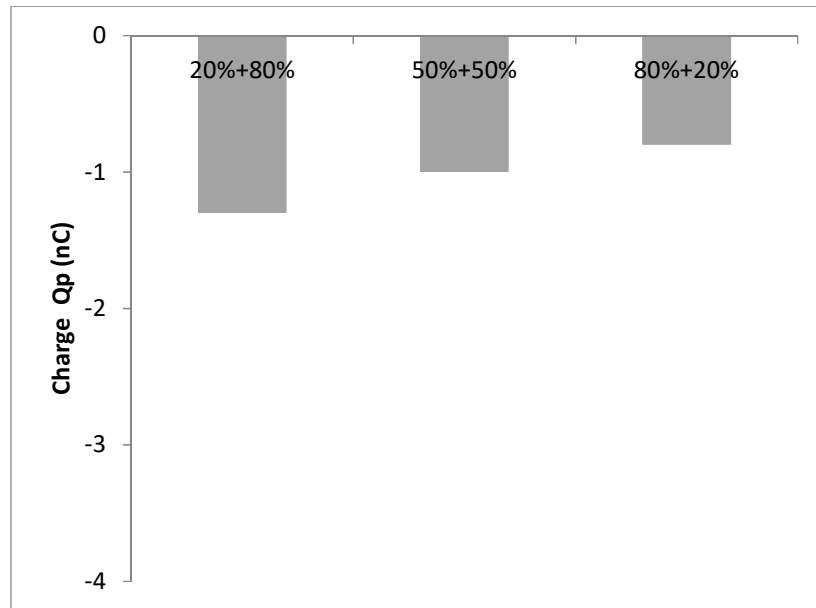


Figure IV.16 : Variation de la charge du mélange PC-cuivre en fonction de la composition dans la cage Faraday

D'après les Figures IV.14, IV.15 et IV.16, on remarque la charge varie en fonction de la composition du mélange et sa valeur dépend du produit majoritaire dans le mélange.

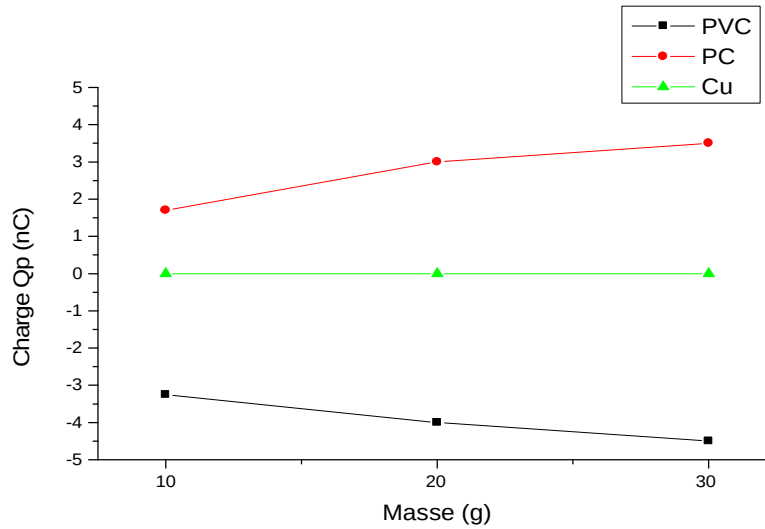
De plus, lorsqu'un produit granulaire binaire circule à travers le tuyau, le niveau de charge est beaucoup plus faible en raison de la neutralisation entre les particules à cause de la polarité de la charge qui est opposée. On peut observer cette remarque dans le cas du mélange PVC-PC par exemple dont les particules acquièrent des charges de signe opposé.

Par conséquent, on peut conclure que la composition d'un mélange peut être déduite à partir de la charge totale.

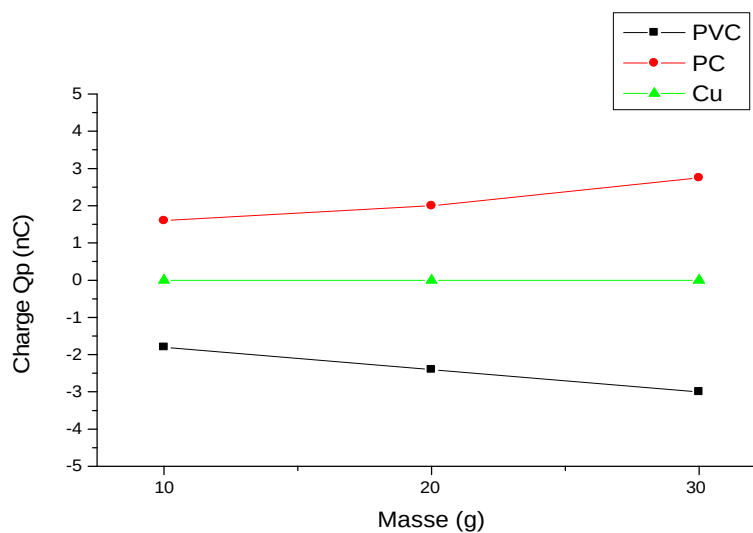
c. Influence de la masse du produit

On a refait les mêmes expériences en utilisant deux valeurs de masse différentes, à savoir 20g et 30g. Les résultats obtenus concernant la charge acquise mesurée pour une fréquence de 50 Hz sont reportés à la figure IV.17.

Comme pour les résultats obtenus pour une masse de 10 g, on remarque que la charge des particules passant par la cage faraday est plus importante par rapport au capteur 2.



a)



b)

Figure IV.17 : Variation de la charge des particules en fonction de la masse ; a) : Cage Faraday, b) : Capteur 2

D'après les graphes, on remarque que la charge est dépendante à la masse de la particule, c'est dû au fait à l'augmentation du nombre de particule donc il y'a plus de collisions. Par conséquent, la mesure de la charge peut être utilisée comme un moyen de contrôle du débit de particules à travers une canalisation.

IV.4.2.2. Granules PEHD noir et PEHD blanc

On a fait les mêmes expériences qu'avec le PVC, PC et le cuivre mais en utilisant deux valeurs de la fréquence, égales à 40 et 50 Hz.

Les Figures IV.18 et IV.19 représentent des exemples typiques de la variation de charge en fonction du temps enregistré par la cage de Faraday, tel qu'affiché par le VI pour les particules de PEHD blanc et de PEHD noir respectivement pour une fréquence de 50 Hz.

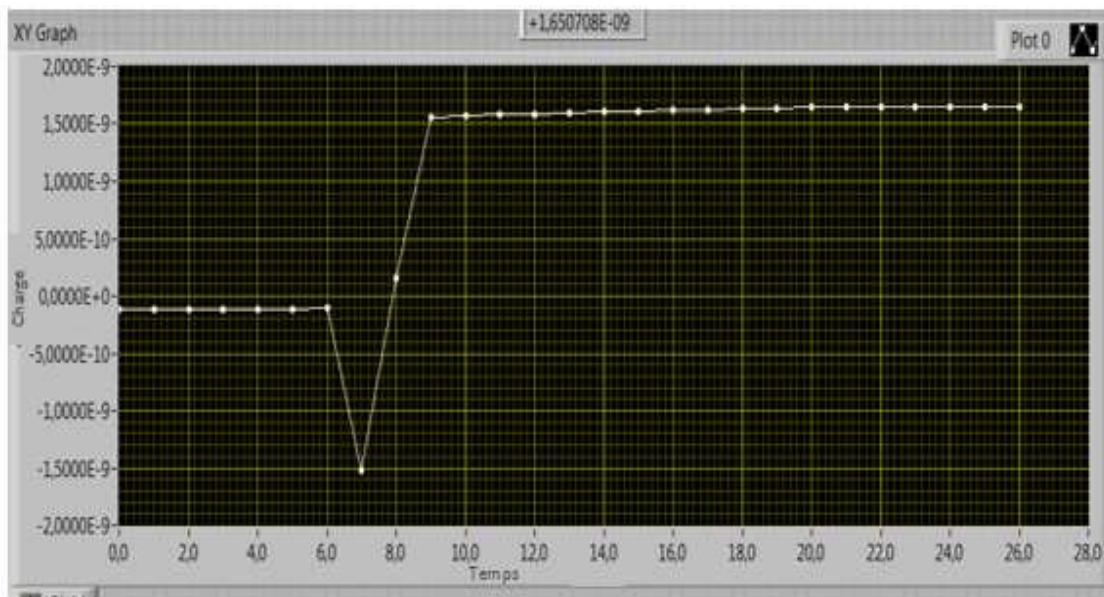


Figure IV.18 : Digramme tracé par LABVIEW montrant l'évolution de la charge des particules et de la paroi en fonction du temps (PEHD noir)

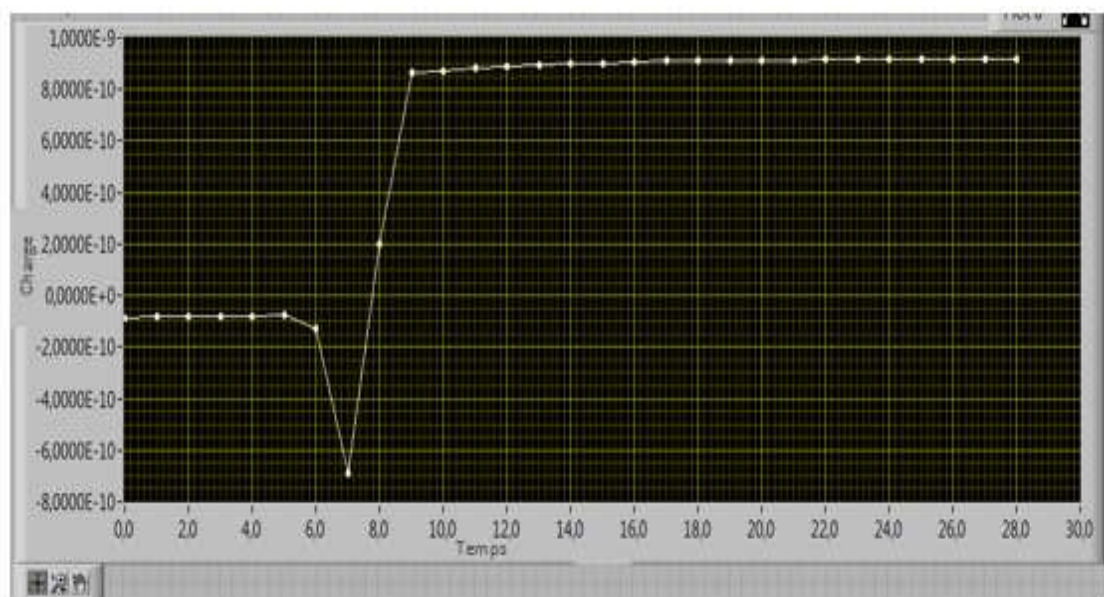
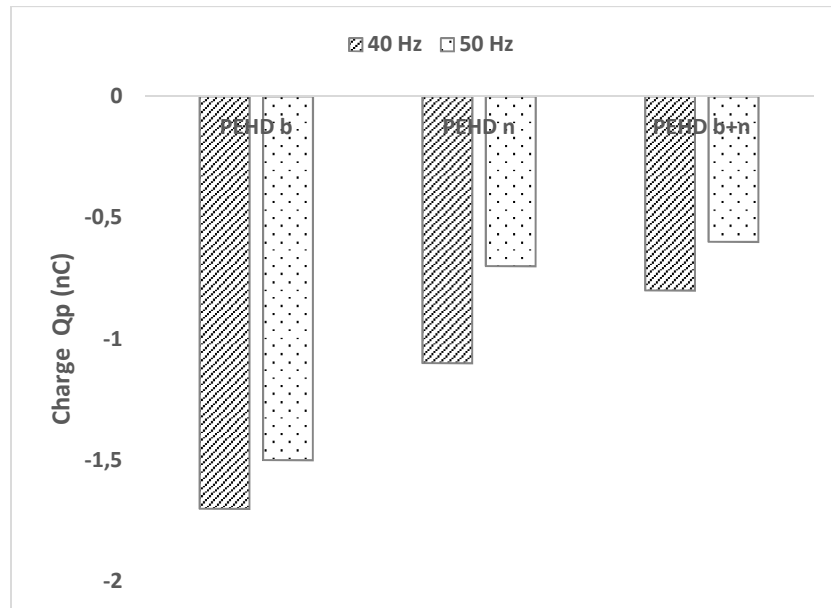


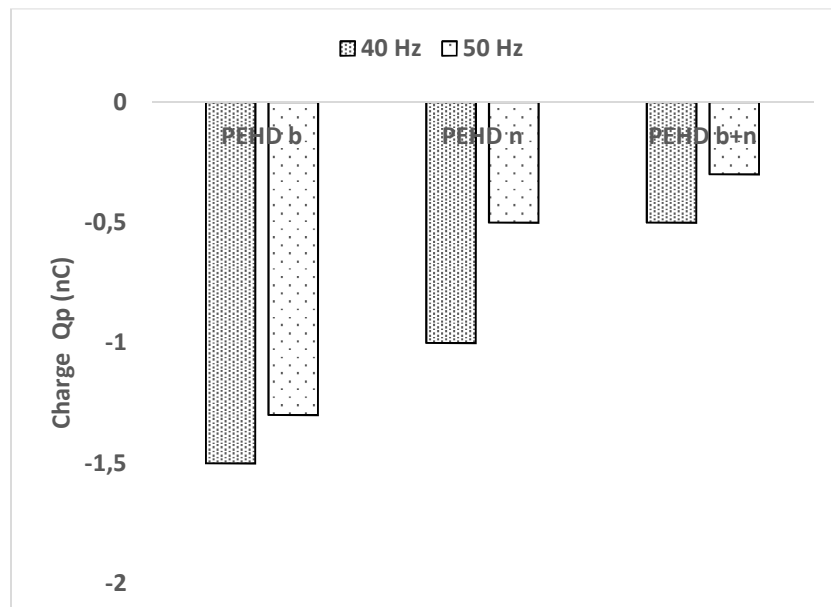
Figure IV.19 : Digramme tracé par LABVIEW montrant l'évolution de la charge des particules et de la paroi en fonction du temps (PEHD blanc)

D'après les diagrammes de PEHD blanc et noir, on remarque que où qu'ils indiquent des pics négatifs mais d'intensités différentes.

La figure IV.20 représente la charge des particules de PEHD blanc, PEHD noir et du mélange (50% - 50%).



a)



b)

Figure IV.20 : Variation de la charge des particules de PEHD blanc et PEHD noir pour des fréquences de 40 et 50 Hz ; a) : Cage faraday, b) : Capteur 2, Composition : 50% - 50%

On remarque que la charge du PEHD blanc est supérieure à celle du PEHD noir. D'autre part, les valeurs de la charge sont supérieures pour une fréquence de 40 Hz à cause du temps de passage dans le tube qui est rapide et donc il y a moins de collisions. Aussi, nous remarquons que la charge du mélange est inférieure aux produits seuls à cause de la charge de signe opposé acquise lors des collisions entre les granules.

IV.4.2.3. Influence de la taille des particules

Afin d'analyser la variation de la charge triboélectrique mesurée en fonction de la taille des particules, trois échantillons de granulés de PVC d'une même masse $M = 10$ g mais de tailles granulométriques différentes (0,2, 1 et 2 mm) ont été utilisés.

Les digrammes typiques de l'évolution de la charge tracés par LABVIEW pour les particules de PVC de différentes tailles (0,2, 1 et 2 mm) pour une fréquence de 50 Hz, sont illustrés aux Figures IV.21-23.

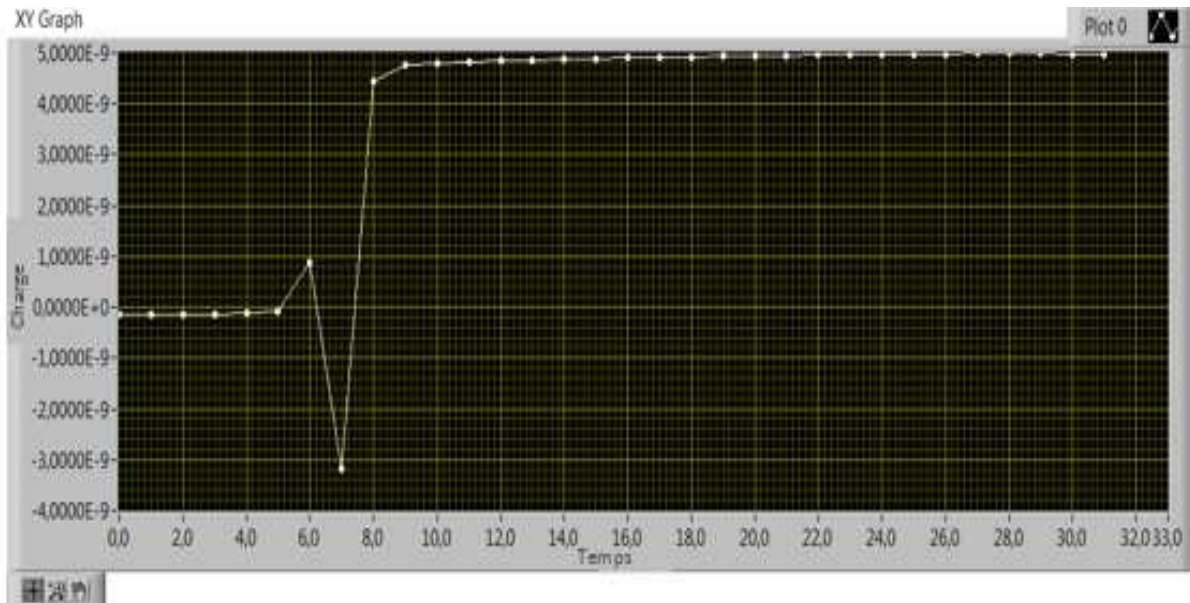


Figure IV.21 : Digramme tracé par LABVIEW montrant l'évolution de la charge des particules et de la paroi en fonction du temps (2 mm)

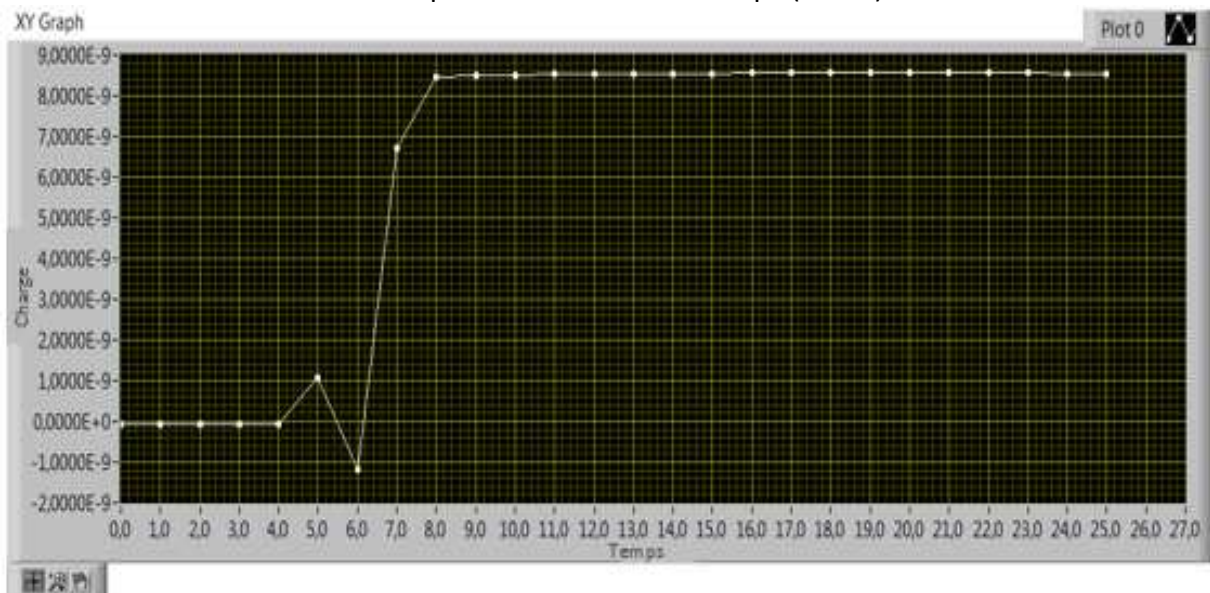


Figure IV.22 : Digramme tracé par LABVIEW montrant l'évolution de la charge des particules et de la paroi en fonction du temps (1 mm)

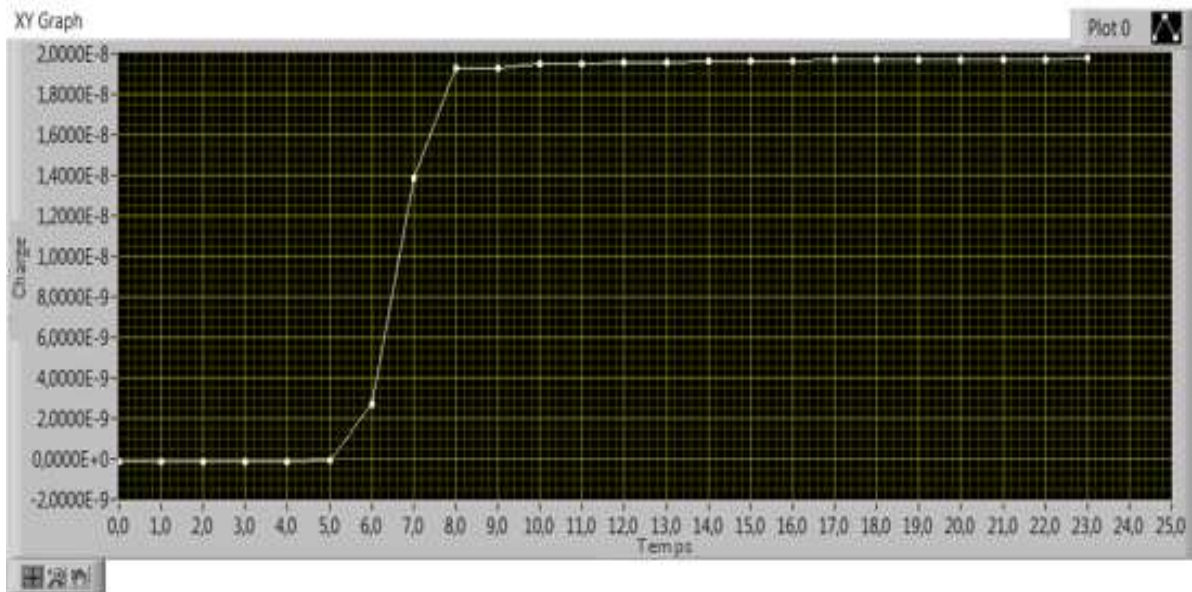
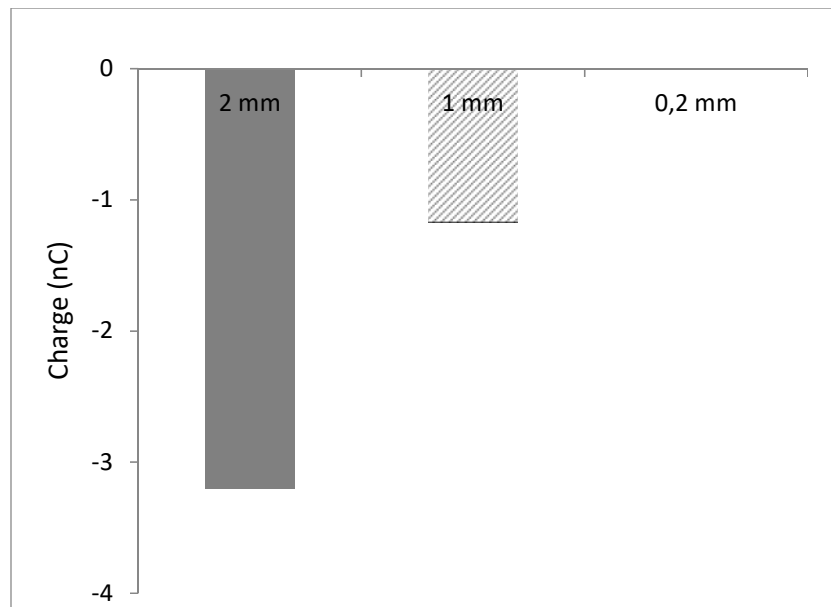


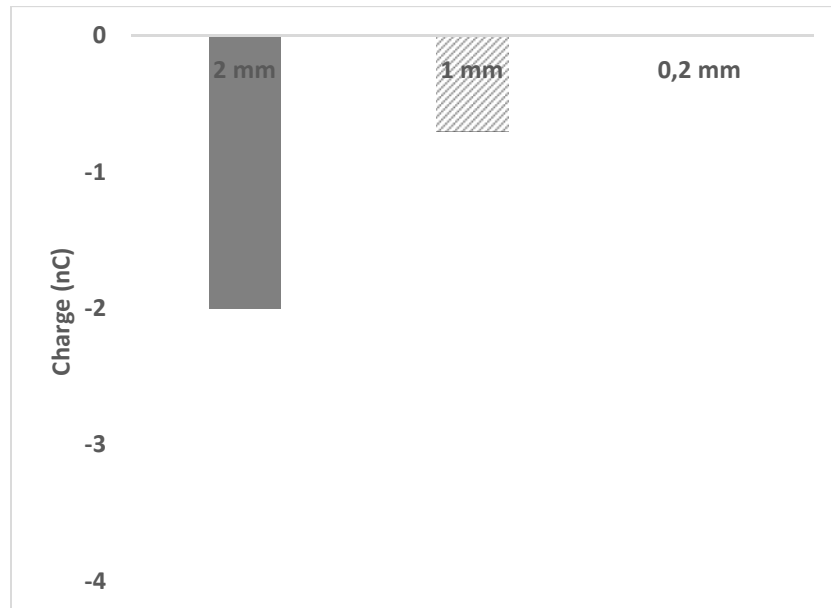
Figure IV.23 : Digramme tracé par LABVIEW montrant l'évolution de la charge des particules et de la paroi en fonction du temps (0,2 mm)

La variation de la charge des particules des PVC en fonction de la taille pour la cage Faraday et le capteur 2 et un débit correspondant à 50 Hz, sont montrés dans la figure IV.24.

Les résultats obtenus relatifs à la valeur de la charge Q_p pour un débit correspondant à une fréquence $f = 50$ Hz, indiquent qu'il existe en effet une différence significative entre les trois échantillons.



a) Cage Faraday



b) Capteur 2

Figure IV.24 : Variation de la valeur de la charge des particules de PVC pour trois valeurs différentes de la taille

L'amplitude de la charge diminue significativement pour les particules de petite taille qui est presque nulle pour les granules micronisés. Cette différence devrait être causée par le fait que les particules de PVC micronisées traversent la canalisation sans heurter la paroi du tube.

Au contraire, les particules de plus grande taille subissent des impacts plus intenses avec la paroi du tube et gagnent ainsi une charge électrique plus élevée. Par conséquent, la mesure de la charge triboélectrique est un moyen utile pour contrôler la taille des particules passant à travers la canalisation.

Conclusion

L'analyse expérimentale réalisée montre la possibilité d'utiliser la mesure de la charge triboélectrique pour obtenir des informations utiles sur la nature des produits granulaires circulant dans des systèmes de transport en phase diluée de type aspiration, telles que :

- Tout flux de particules de plastique pourrait être surveillé par la mesure de la charge triboélectrique correspondante à l'aide d'un capteur électrostatique.
- Toute modification de la polarité de la charge triboélectrique doit être provoquée par l'écoulement d'un produit plastique granulaire différent.
- Dans le cas des produits métalliques granulaires, toute charge triboélectrique mesurée indique que d'autres granules plastiques sont mélangés avec les particules métalliques.
- Dans le cas d'un produit plastique granulaire binaire, toute augmentation de la charge triboélectrique doit être provoquée par un changement de la composition du produit.

- Le capteur électrostatique pourrait être utilisé pour contrôler la masse et la taille granulométrique des particules qui s'écoulent.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Actuellement, l'installation et le montage d'une expérience de laboratoire occupent souvent la majeure partie du temps alloué aux chercheurs et étudiants et il est alors difficile de travailler efficacement sur l'analyse des résultats et de modifier certains paramètres pour valider une nouvelle hypothèse. La recherche et l'enseignement se font à un rythme fixe pour tous, sans égard aux intérêts, capacités et styles d'apprentissage de chacun et on constate un faible transfert des connaissances. Cet état de fait limite la motivation pour les études et diminue les facteurs de réussite.

Face à cette situation, nous avons conçu un environnement d'expérimentation ouvert, qui se présente comme un outil technologique et didactique, appartenant aux scientifiques et aux étudiants, et permettant le travail en dehors des laboratoires et des salles de classes. Il s'agit d'un équipement portable et peu coûteux, relié à un ordinateur personnel, qui permet de construire, d'expérimenter et de visualiser des phénomènes physiques de systèmes électroniques. Il utilise de façon intensive la représentation graphique et l'instrumentation virtuelle et il s'adapte bien à une pédagogie de projets.

L'instrumentation virtuelle est un moyen pour leur donner de la signification dont on peut automatiser un processus de mesures, conserver un historique de l'expérimentation, répéter une expérience en changeant des paramètres, comparer plusieurs situations entre-elles et tester très rapidement un prototype.

Le travail de cette thèse s'inscrit dans un programme de valorisation de l'instrumentation virtuelle et les dispositifs de mesure des mouvements des particules. Dans le chapitre introductif, nous avons dressé un état de l'art des méthodes utilisées classiquement dans l'industrie pour transporter les poudres (particules). Les systèmes pneumatiques et mécaniques ont été cités, et leurs avantages listés. Des approches plus

innovantes, utilisant les forces aérodynamiques et électrostatiques ont ensuite été introduites. En particulier, les approches génératrices d'ondes mobiles dans des tubes ont retenu notre attention, elles ont été reprises au Chapitre III.

La méthode dite "instrumentation virtuelle", met en évidence l'apport de la séparation et le déplacement des particules sur un système mécanique actionné à basse fréquence. Brièvement évoqué ici, cette approche a été détaillée dans le second chapitre. Nous avons alors analysé, de manière expérimentale ce principe de séparation et de déplacement de particules. Une maquette expérimentale a été conçue et réalisée afin de vérifier le principe de fonctionnement et d'obtenir les caractéristiques de masse obtenue, charge, rapport charge/masse, durée de déplacement, pureté du produit selon les conditions de fonctionnement (tension appliquée et fréquence et les différentes particules utilisées.

Ces travaux ont donc amorcé le chapitre IV où l'étude de la nature des particules se déplaçant le long d'un tube de transport pneumatique a été développée.

Démarche expérimentale :

La première question qui s'est posée au début de la thèse est : comment relier l'instrument virtuel avec des appareils de mesures, et comment allons-nous procéder ?

Le diagnostic le plus adapté pour répondre à cette question est bien sur l'utilisation du logiciel LABVIEW. Pour l'utiliser, il a fallu adapter les acquisitions aux particularités des particules : Dans notre cas, la tension appliquée et la fréquence de fonctionnement. Nous avons donc analysé le déplacement des particules PVC et PA et la séparation de particules micronisées PVC, cuivre, PA et bronze.

Pour chacune d'elles nous avons mis en place un dispositif expérimental adapté.

Le premier dispositif concerne le transport et la séparation des particules millimétriques et micronisées. Cette étude avait pour but d'analyser la faisabilité de transporter des particules micrométriques de PA et de PVC en utilisant la technique des convoyeurs à ondes mobiles tout en prenant en considération les facteurs susceptibles d'avoir une influence sur le rendement ainsi que la performance de cette opération. Cette séparation concerne deux types de mélanges : (1) un mélange comprenant des particules micronisées de PVC et de cuivre, (2) un mélange de granules de bronze et du polyamide (PA). Deux convoyeurs, à deux

et à trois phases, ont été utilisés. Les résultats obtenus de cette première étude sont fiables à une fréquence de 40 Hz et une amplitude de 1,3 kV. Ces deux facteurs sont importants pour la création d'onde mobile d'où la facilité de déplacement et de la séparation des particules. L'avantage de cette technologie réside dans le fait que le transport des particules est assuré par les forces du champ électrique au lieu des moyens mécaniques sans produire ni d'effets de bruit acoustique ni de vibrations mécaniques.

Une démarche similaire a été adoptée pour le transport pneumatique afin d'identifier des particules (PVC, PC, PEHD blanc, PEHD noir, cuivre et PVC poudre) passantes dans un tube en aluminium en se servant de plusieurs capteurs de charge et une cage faraday dans différents emplacements. L'ensemble des résultats acquis au cours de ce travail permet d'affirmer que nous disposons désormais d'une nouvelle technique capable d'identifier et d'analyser des mélanges granulaires. Ainsi, le dispositif d'acquisition de la charge que nous avons réalisé est spécifique. Il facilite l'identification de la nature des matériaux et peut remplacer d'autres moyens utilisés actuellement pour le contrôle de l'écoulement des produits granulaires.

Un point important à souligner : Les coûts liés à l'achat d'équipement reproduisant exactement une situation de travail sont très élevés et cet équipement devient vite désuet. Notre matériel d'expérimentation recourt à des circuits de technologie classique, est peu coûteux et d'une grande facilité de mise à jour. Le couplage à un ordinateur en utilisant l'instrumentation virtuelle procure ainsi un environnement très souple et très économique.

En guise de perspectives, nous suggérons :

- Généralisation de l'utilisation de l'instrumentation virtuelle dans le maximum des applications au laboratoire.
- Application du LABVIEW pour l'acquisition mais aussi pour la commande et le pilotage des procédés électrostatiques.
- Meilleure compréhension du déplacement de particules par convoyeur à ondes mobiles en utilisant l'instrumentation virtuelle.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références

- [1] I. LAUZIER, «APPLICATION DE L'INSTRUMENTATION VIRTUELLE,» 2002. [En ligne].Available:
https://cdc.qc.ca/actes_aqpc/2003/lauzier_isidore_707_2003.pdf.
- [2] H. Rheingold, virtual reality touchstone book, NEW YORK, 1991.
- [3] H. Pang, «Dépoussiérage électrostatique pour les particules submicroniques en atmosphère usuelle (terre) et raréfiée (planète Mars),» *Energie électrique, Université Joseph Fourier Grenoble I*, 2006.
- [4] J.K.W.Chesnutt et J.S.Marshall, «Simulation of particle separation on an inclined electric curtain,» *IEEE transaction on industry applications*, 2013.
- [5] J.K.Onley et J.Firstbook, «The practical application of pneumatic transport techniques to the raising of mineral from deep shafts,» chez *Proceedings of Pneumotransport 4, BHRA Conference*, California, 1978.
- [6] J.Firstbook, «Operation and development of the pneumatic pipeline coal transporation system,» chez *Proceedings of Pneumotransport 5, BHRA Conference*, London, 1980.
- [7] C.Damm, K.Clabault, B.Lamia et J.C.Richard, «Caractéristiques d'un bon ventilateur de transport,» *Réanimation, Elsevier*, 2013.
- [8] D.Mills, «Pneumatic conveying design guide,» *Butterworth Heinemann*, 2013.
- [9] C.Dragan, O.Fati, M.Radu, L.Calin, A.Samuila et L.Dascalescu «Tribocharging of mixed granular plastics in a fluidized bed device,» *IEEE transactions on industry applications*, vol. 47, pp. 1922-1928, 2011.
- [10] L. A.Samuila, «Comportarea materialelor granularz in camp,» *Electric.Cluj-Napoca, Editura Mediamira*, 1999.
- [11] P.Cartwright, S.Singh, A.G.Bailey et L.J.Rose, «Electrostatic charging characteristics of polyethylene powder during pneumatic conveying,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 1A, n° 121, pp. 541-546, 1985.
- [12] R.K.Eckhoff, «Are enhanced dust explosion hazards to be forseen in production,» chez *Processing and handeling of powders consisting of nano-size particles, in nanosafe 2010: International conference on safe production and use of nano materials, Journal of Physics: Conference Series*, 2011.
- [13] M.Glor, «Hazards due to electrostatic charging of powders,» *Journal of electrostatics*, vol. 16, pp. 175-191, 1985.
- [14] K.M.Forward, D.J.Lacks et R.M.Sankaran, «Triboelectric charging of granular insulator mixture due solely to particle-particle interactions,» *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 48, pp. 2309-2314, 2009.
- [15] J.Peart, P.Kulphaisal et J.C.Orban, «Revelance of elactrostatics in respiratory drug delivery,» *Business Briefing: Pharmagenics*, Vols. 1 sur 284-87, 2003.

- [16] E.Supuk, A.Hassanpour, H.Ahmadian, M.Ghardiri et T.Matsuyama, «Triboelectrification and associated segregation of pharmaceutical bulk powders,» *KONA*, vol. 29, pp. 208-223, 2011.
- [17] F.Y.Leong, K.A.Smith, C.Wang, S.Matsuska et J.Hua, «Electrostatic effects on inertial particle transport in bifurcated tubes,» *AIChE Journal*, vol. 55, pp. 1390-1401, 2009.
- [18] S.Matsuska et H.Masuda, «Simultaneous measurement of mass flow rate and charge-to-mass ratio of particles in gas-solids pipe flow,» *Chemical Engineering Science*, vol. 61, pp. 2245-2261, 2006.
- [19] S.Matsuska, H.Fukuda, Y.Sakura, H.Masuda et M.Ghardiri, «Analyse of pulsating electric signals generated in gas-solid pipe flow,» *Chemical Engineering Science*, vol. 63, pp. 1353-1360, 2008.
- [20] X.Deng, D.Chen et W.Yang, «Study on electrodynamic sensor of multimodality system of multiphase flow measurement,» *Review of Scientific Instruments*, vol. 82, p. 124701, 2011.
- [21] S.Watano, S.Saito et T.Suzuki, «Numerical simulation of electrostatic charge in powder pneumatic conveying process,» *Powder technology*, Vols. %1 sur %2135-136, pp. 112-117, 2003.
- [22] H.Masuda, T.Komatsu et K.Linoya, «the static electrification of particles in gas-solid pipe flow,» *AIChE Journal*, vol. 22, pp. 558-564, 1972.
- [23] E.E.Smeltzer, M.L.Weaver et G.E.Klinzing, «Individual electrostatic particle interaction in pneumatic transport,» *Powder technology*, vol. 33, pp. 31-42, 1982.
- [24] J.Yao, Y.Zhang, C.H.Wang et Y.C.Liang, «The electrostatic equilibrium of granular flow in pneumatic conveying system,» *AIChE Journal*, vol. 52, pp. 3775-3793, 2006.
- [25] S.Kanazawa, T.Ohkubo, Y.Nomoto et T.Adachi, «Electrification of a pipe wall during powder transport,» *Journal of electrostatics*, vol. 35, pp. 47-54, 1995.
- [26] S.Nieh et T.Nguyen, «Effects of humidity, conveying velocity, and particle size on electrostatic charges of glass beads in a gaseous suspension flow,» *Journal of electrostatics*, vol. 21, pp. 99-114, 1988.
- [27] S.Matsuska, M.Ghardiri et H.Masuda, «Electrification of an elastic sphere by repeated impacts on a metal plate,» *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 33, pp. 2311-2319, 2000.
- [28] T.Matsuyama et H.Yamamoto, «Characterizing the electrostatic charging of polymer particles by impact charging experiments,» *Advanced powder technology*, vol. 6, pp. 211-220, 1995.
- [29] H.Watanabe, M.Ghardiri, T. Y.L.Ding, K.G.Pitt, H.Maruyama, S.Matsuska et H.Masuda, «Triboelectrification of pharmaceutical powders by particle impact,» *International journal of pharmaceuticals*, vol. 334, pp. 149-155, 2007.

- [30] S.Matsuska, H.Umemoto, M.Nishitani et H.Masuda, «Electrostatic charge distribution of particles in gas-solids pipe flow,» *Journal of electrostatics*, vol. 55, pp. 81-96, 2002.
- [31] S.Matsuska, M.Oki et H.Masuda, «Control of electrostatic charge on particles by impact charging,» *Advanced powder technology*, vol. 19, pp. 229-244, 2007.
- [32] P.P.Bunchatheeravate, The effects of electrostatic charge on particle flows and deposition, 2012.
- [33] G.S.P.Castle, «Contact charging between insulators,» *Journal of electrostatics*, Vols. %1 sur %240-41, pp. 13-20, 1997.
- [34] S.Matsuska, H.Maruyama, T.Matsuyama et M.Ghadiri, «Triboelectric charging of powders: Areview,» *Chemical Engineering Science*, Vols. %1 sur %25781-5807, p. 65, 2010.
- [35] S.Matsuska, «Control of particle tribocharging,» *KONA*, vol. 29, pp. 27-38, 2010.
- [36] G.Wu, D.Li, J.Yu, T.Yin et D.Feng, «further study of electric dust removal with transparent fork electrode,» *American journal of analytic chemistry*, vol. 6, pp. 196-2012, 2015.
- [37] P. F.A.Minetto, J.Keller et al, «Finding a dust mitigation strategy that works on lunar surface,» chez *The 38th lunar and planetary science*, Texas, 2007.
- [38] G.He, C.Zhou et Z.Li, «review of self-cleaning method for solar cell array,» *Precedia engineering, Elsevier*, 2011.
- [39] H.Kawamoto, «Electrostatic and electromagnetic cleaning of lunar dust adhere to spacesuits,» chez *Annual meeting of LEAG, lunar and platenary institute*, Houston, 2009.
- [40] G.Liu et J.S.Marshall, «Particle transport by standing waves in electric curtain,» *Journal of electrostatics*, vol. 68, pp. 289-298, 2010.
- [41] G.Liu, S.Q.Li et al, «Characteristics of the motion of martian dust simulant on the travelling-wave electric curtain,» *Jouranl of ingeneering thermal physics*, vol. 32, pp. 2073-2075, 2011.
- [42] F.B.Tatom, V.Srepel et R.D.Johnson, «Lunar dust degradation effects and removal/prevention concepts,» United States, 1967.
- [43] S.Masuda, K.Fujibayashi et K. H.Inaba, «Confinement and transportation of charged aeresol clouds via electric curtain,» *Electrical engeneering in Japan*, vol. 92, pp. 43-52, 1972.
- [44] W.Schmidlin, «A new no levitated mode of travelling wave toner transport,» *IEEE Transactions on industry applications* , vol. 25, pp. 949-955, 1989.
- [45] J.M.Melcher, «Theory of finite-phase tavelling wave boundary quided transportnof triboelectrified particles,» *IEEE Transactions on industry applications*, vol. 41, pp. 134-144, 2012.
- [46] M.N.Horenstein, M.Mazumder et R. Jr, «Predecting particle trajectories on an electrodynamic screnn-theory and experiment,» *Journal of electrostatics*, vol. 71, pp. 185-188, 2013.

- [47] C.I.Calle, C.R.Buhler et M.R.Johansen, «Active dust control and mitigation technology for lunar and martian exploratio [J],» *Acta straunotica*, vol. 69, pp. 1082-1088, 2011.
- [48] L.C.Weis et D.P.Thibodeaux, «Separation of seed by-products by an AC electric field,» *Journal of the american oil chemists' society*, vol. 61, pp. 886-890, 1984.
- [49] A.C.Yen et C.D.Hendricks, «A planar electric curtain used as a device for the control and removal of particulate materials,» *Journal of electrostatics*, vol. 4, pp. 255-266, 1978.
- [50] S.Masuda, M.Washizu et M.Iwadar, «Separation of small particles suspended in liquid by non-uniform travelling field,» *IEEE Transactions on industry applications*, Vols. %1 sur %2IAA-23, pp. 474-480, 1987.
- [51] W.Machowski, W.Balandran et D.Hu, «Influence of electrode geometry on transport and separation efficiency of powders using travelling wave field technique,» chez *IEEE/IAS Annual meeting*, Orlando, 1995.
- [52] H.Kawamoto, «Some techniques on electrostatic separation of particle size utilizing electrostatic travelling-wave field,» *Journal of electrostatics*, vol. 66, pp. 220-228, 2008.
- [53] Y.N.Gartstein et J.G.Shaw, «Many-particle effects in travelling electrostatic wave transport,» *Journal of physics D: applied physics*, vol. 32, pp. 2176-2180, 1999.
- [54] H.Kawamoto, K.Seki et N.Kuromiya, «Mechanism of travelling wave transport of particles,» *Journal of physics D: applied physics*, vol. 39, pp. 1249-1256, 2006.
- [55] R.Hagedorn, G.Fuhr, T.Muller et J.Gimsa, «travelling wave dielectrophoresis of microparticles,» *Electrophoresis*, vol. 19, pp. 49-54, 1992.
- [56] S.J.Dickson, *Dielectrophoresis based methods for separating particles on lab-chip platforms*, University of Pittsburgh, 2012.
- [57] S.S.Dukhin et B.V.Derjaguin, *Electrokinetic phenomena*, New Jersey, États-Unis: John Wiley & Sons, 1974.
- [58] H.A.Pohl, «The motion and precipitation of suspensoids in divergent electric fields,» *Journal of Applied Physics*, vol. 22, p. 869, 1951.
- [59] X.B.Wang et al, «A unified theory of dielectrophoresis and travelling wave dielectrophoresis,» *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 27, p. 157, 1994.
- [60] R.Pethig, «Dielectrophoresis: status of the theory, technology, and applications,» chez *Biomicrofluidics* 4, 2010.
- [61] P.Gascoyne et J.Vykoukal, «Particle separation by dielectrophoresis,» *Electrophoresis*, vol. 23, pp. 1973-1983, 2002.
- [62] F.Becker et al, «Separation of human breast cancer cells from blood by differential dielectric affinity,» *Proceedings of the National Academy of Sciences, United States*, vol. 92, pp. 860-864, 1995.
- [63] Y.Huang, X.B.Wang, F.F.Becker et P.R.Gascoyne, «Introducing dielectrophoresis as a new force field for field-flow fractionation,» *Biophysical Journal*, vol. 73, pp. 1118-1129, 1997.

- [64] J.Yang et al, «Differential analysis of human leukocytes by dielectrophoretic gravitational field-flow-fractionation,» *Biophysical Journal*, vol. 74, pp. 2680-2689, 2000.
- [65] J.W.Choi, A.Pu et D.Psaltis, «Optical detection of asymmetric bacteria utilizing electro orientation,» *Optic express*, vol. 14, pp. 9780-9785, 2006.
- [66] S.Mahabadi, F.H.Labeed et M.P.Hughes, «Effects of cell detachment method on the dielectric properties of adherent and suspension cells,» *Electrophoresis*, vol. 36, pp. 1493-1498, 2015.
- [67] M.S.Pommer, «Dielectrophoresis separation of platelets from diluted whole blood in microfluidic channels,» *Electrophoresis*, vol. 29, pp. 1213-1218, 2008.
- [68] H.A.Pohl et I.Hawk, «Separation of living and dead cells by dielectrophoresis,» *Science*, vol. 152, p. 647, 1966.
- [69] G.H.Markx, P.A.Dyda et R.Pethig, «Dielectrophoresis separation of bacteria using a conductivity gradient,» *Journal of biotechnology*, vol. 51, pp. 175-180, 1996.
- [70] J.P.H.Burt, R.Pethig et M.S.Talary, «Microelectrode devices for manipulating and analysing bioparticles,» *Transactions of the institute of measurement and control*, vol. 20, pp. 82-90, 1998.
- [71] S.Chin et al, «Rapid assessment of early biophysical changes in K562 cells during apoptosis determined using dielectrophoresis,» *International journal of nanomedicine*, vol. 1, pp. 333-337, 2006.
- [72] Ed.Li.Dongqing, «Encyclopedia of microfluidics and nanofluidics,» chez *Springer*, New York, 2008.
- [73] K.Pant, J.Feng, G.Wang, S.Krishnamoorthy et S.Sundaram, «Separatio of bioparticulate matter using travelling wave dielectrophoresis,» chez *7th International conference on miniaturized chemical and biochemical analysts systems*, Squaw Valley, California, USA, 2003.
- [74] F.Cottet, M.Pinard et L.Desruelle, LABVIEW-3eme édition: programmation et applications, Dunod, 2015.
- [75] J.Bruner, the process of education, Hrvard: Harvard university press, Cambridge mass, 2002.
- [76] J.Travis et J.Kring, LABVIEW for everyone: graphical programming made easy and fun, Upper Saddle River, New Jersey, USA: Prentice Hall, 2007.
- [77] D.Trentesaux, Conception d'un système de pilotage distribué, supervisé et multicritère pour les systèmes automatisés de production, Laboratoire de thermique, écoulements mécaniques .
- [78] Austin, National instruments, LABVIEW, measurement manual, National instruments, 2000.
- [79] P.O.Gasq, E.Conton et E.Blanché, Les élèves du second degré à la rentrée 2016: une baisse généralisée des taux de redoublement, 2016.

- [80] J.B.Noffsinger et N.D.Danielson, Generation of chemiluminescence upon reaction of aliphatic amines with tris(2, 2'-bipyridine) ruthenium (III), *Analytic chemistry*, 1978.
- [81] A.H.Pohl, K.Pollok et J.S.Crane, «Dielectrophoretic force: a comparison of theory and experiment,» *Journal of biological physics*, vol. 6, pp. 133-160, 1979.
- [82] G.Q.Liu et J.S.Marshall, «Effect of particle adhesion and interactions on motion by travelling waves on an electric curtain,» *Journal of electrostatics*, vol. 68, pp. 179-189, 2010.
- [83] M.N.Horenstein, M.Mazumder et R. Jr, «Predicting particle trajectories on an electrostatics screen theory and experiment,» *Journal of electrostatics*, vol. 71, pp. 185-188, 2013.
- [84] H.Kawamoto, M.Uchiyama, B.L.Cooper et D.S.Mckay, «Mitigation of lunar dust on solar panels and optical elements utilizing electrostatic travelling-wave,» *Journal of electrostatics*, vol. 69, pp. 370-379, 2011.
- [85] H.Kawamoto et S.Hayashi, «Fundamental investigation on electrostatic travelling-wave transport of liquid drop,» *Journal of physics D*, vol. 39, pp. 418-423, 2006.
- [86] C.E.Johnson, P.K.Srirama, R.Sharma, K.Pruessner, J.Zhang et M.K.Mazumder, «Effects of particle size distribution on the performance of electrostatics screen,» *IEEE Industry applications society*, vol. 1, pp. 341-345, 2005.
- [87] F.M.Moesner et T.Sigushi, «Transportation and manipulation of particles by AC electric field,» *National convention record I.E.E.J, Tokyo, Japan*, vol. 6, pp. 231-232, 1994.
- [88] F.M..Moesner et T.Higushi, «Devices for particle handling by an AC electric field,» *Proceedings IEEE micro electro mechanical systems*, Amsterdam, The Netherlands, pp. 66-71, 1995.
- [89] I.N.Mahi, R.Messafeur, A.Belgacem, Y.Bellebna, H.Louati et A.Tilmatine, «New separation method of metal/plastic micronized particles using travelling wave conveyors,» *International Journal of Environmental Studies*, pp. 1-12, 2018.
- [90] M.Praeger, Z.Li, J.M.Smallwood et P.L.Lewin, «Numerical calculation of dielectrophoretic and electrostatic forces acting on micro-scale particles,» *Journal of physics: Conference Series*, vol. 646, 2015.
- [91] T.B.Jones, J.L.King et J.F.Yablonsky, *Powder handling and electrostatics: understanding and preventing hazards*, Michigan: Lewis publishers, 1991.
- [92] G.Artana, G.Touchard et M.F.Morin, «Contribution to the analysis of the flow electrification process of powders in pneumatic conveyers,» *Journal of electrostatic*, vol. 40/41, pp. 277-282, 1997.
- [93] L.B.Loeb, *Static electrification*, Berlin: Springer, 1958.
- [94] A.G.Bailey, «Charging of solids and powders,» *Journal of electrostatics*, vol. 30, pp. 167-180, 1993.

- [95] A.G.Bailey, «The science end technology of electrostatic powder spraying, transport and coating,» Journal of electrostatics, vol. 45, pp. 85-120, 1998.
- [96] I.N.Mahi, K.Senouci, A.Tilmatine, R.Messafeur, F.Miloua et L.Dascalescu, «Premises of using triboelectric charge for identification of the granular product flowing in a pneumatique transport system,» chez IEEE Industry application society-51st annual meeting, IAS 2015, Conference record. Institute of electrical and electronics engineering Inc, Texas, 2015.
- [97] D.K.Davies, «Charge generation on dielectric surfaces,» Journal of physics D: Applied physics, vol. 2, pp. 1533-1537, 1969.

PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

- **Mahi, I.**, Messafeur, R., Belgacem, A., Bellebna, Y., Louati, H., & Tilmatine, A. «New separation method of metal/plastic micronized particles using travelling wave conveyors », International Journal of Environmental Studies, pp. 1–12, 2018, February 17.
- **Mahi, I. N.**, Senouci, K., Tilmatine, A., Messafeur, R., Miloua, F., & Dascalescu, L, «Premises of using triboelectric charge for identification of the granular product flowing in a pneumatic transport system ». In IEEE Industry Application Society - 51st Annual Meeting, IAS 2015, Conference Record. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2015.
- Messafeur, R., **Mahi, I.**, Ouidir, R., Medles, K., Dascalescu, L., & Tilmatine, A. «Tribo-electrostatic separation of a quaternary granular mixture of plastics », Particulate Science and Technology, pp. 1–6. Taylor and Francis Inc., 2018, April 28.

Résumé : Les dispositifs électrostatiques sont des processus qui dépendent d'une multitude de facteurs (électriques et mécaniques) qui ne restent pas parfaitement constants dans le temps. Ils varient et leurs influences se répercutent par la suite sur la qualité des résultats de leurs produits. En plus de ceci, ces dispositifs sont fortement sensibles aux perturbations environnementales qui vont augmenter la variabilité globale des processus électrostatiques rendant leur optimisation plus difficile. Afin de contourner ce problème, les ingénieurs doivent disposer des techniques scientifiques pour maîtriser ces procédés et s'engager dans une démarche d'amélioration continue de ses performances. Le travail proposé dans le cadre de cette thèse consiste à étudier dans un premier temps des techniques de mesure plus précises en intégrant des instruments pilotés par ordinateur, à savoir l'instrumentation virtuelle (LABVIEW). La charge de particules dans une canalisation de transport de particules a été utilisée pour l'identification de la composition du produit granulaire traversant le tube. D'un autre côté, une étude expérimentale est dédiée pour étudier la dynamique du mouvement et la séparation des particules micronisées sur un convoyeur à ondes mobiles polyphasé.

Mots clés : instrumentation virtuelle, dispositifs électrostatiques, séparation ; ondes mobiles, force diélectrophorétique, transport pneumatique, charge triboélectrique.

Abstract: Electrostatic devices are processes that depend on a multitude of factors (electrical and mechanical) that do not remain perfectly constant over time. They vary and their influences subsequently affect the quality of the results of their products. In addition to this, these devices are highly sensitive to environmental disturbances that will increase the overall variability of electrostatic processes making their optimization more difficult. To circumvent this problem, engineers must have the scientific techniques to master these processes and engage in a process of continuous improvement of its performance. The work proposed in this thesis is to study at first more precise measurement techniques by integrating computer-controlled instruments, namely virtual instrumentation (LABVIEW). Particle's charge in a particle transport line was used to identify the composition of the granular product passing through the tube. On the other hand, an experimental study is dedicated to study the dynamics of movement and the separation of micronized particles on a polyphase moving wave conveyor.

Key words: electrostatic devices, virtual instrumentation, separation; progressive wave, dielectrophoretic force, pneumatic transport, triboelectric charge.

الخلاصة: الأجهزة الإلكترونية استاتيكية عبارة عن عمليات تعتمد على العديد من العوامل (الكهربائية والميكانيكية) التي لا تبقى ثابتة تماماً بمرور الوقت. وهي تختلف وتؤثر تأثيراتها فيما بعد على جودة نتائج منتجاتها. بالإضافة إلى ذلك، فإن هذه الأجهزة حساسة للغاية للاضطرابات البيئية التي من شأنها زيادة التغير الكلي للعمليات الكهروستاتيكية مما يجعل تحسينها أمراً أكثر صعوبة. للتغلب على هذه المشكلة، يجب على المهندسين امتلاك التقنيات العلمية لإتقان هذه العمليات والانخراط في عملية التحسين المستمر لأدائها. يتمثل العمل المقترح في هذه الرسالة في دراسة تقنيات القياس الأكثر دقة أولاً عن طريق دمج الأدوات التي يتحكم فيها الكمبيوتر، وهي الأجهزة الافتراضية (LABVIEW). تم استخدام شحنة الجسيمات في خط نقل الجسيمات لتحديد تركيبة المنتج الحبيبي المار عبر الأنبوب. من ناحية أخرى، تم تخصيص دراسة تجريبية لدراسة ديناميكية الحركة وفصل الجسيمات الدقيقة على ناقل موجة متحرك متعدد الأطوار.

الكلمات المفتاحية: الأجهزة الإلكترونية استاتيكية، الأجهزة الافتراضية، الفصل. الموجة التدريجية، قوة دالكتروفوريتيك، نقل هوائي، تهمة شحنة كهربائية.