

Dust Collector

KOVALEVSKIJ Marcin¹

¹UFR de Physique, Université de Paris, Paris, France

E-mail: marcin.kovalevskij@etu.univ-paris-diderot.fr

Date de déposition 21/12/2020

Abstract

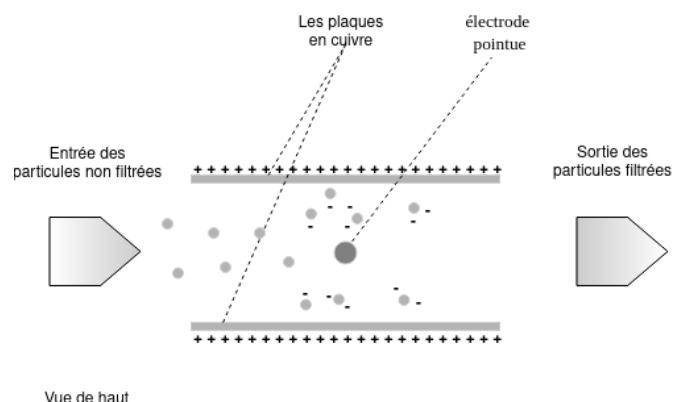
Précipiteur électrostatique est un dispositif qui filtre l'air en fonctionnant sous haute tension de l'ordre de kV. Le dispositif consiste de deux plaques métalliques (chargés positivement) placées l'une en face à l'autre et d'une suite d'électrodes pointues (charge négativement) places au milieu de ces deux plaques. Les particules de gaz qui entrent le voisinage de l'électrode sont chargées négativement et ensuite sont attirées vers les plaques métalliques. Dans ce rapport, on étudie la performance de Dust Collector, pour cela on effectue les expériences de mesure de la vitesse des particules (à l'intérieur de Dust Collector) en fonction de potentiel électrostatique. De plus, on effectue les mesures de quantité des particules déposées sur une des plaques métalliques en fonction de potentiel électrostatique. Par analyse des données d'expérience on trouve que modèle théorique n'est pas compatible avec les données expérimentales. En conclusion, on propose l'explication d'incompatibilité théorie-expérience et les solutions possibles pour amélioration d'étude de la performance de Dust Collector.

1. Introduction

Dust collector, aussi connu comme le précipiteur électrostatique (PE) est un dispositif qui filtre l'air. Il est souvent utilisé dans la fusion de minerai, production d'acier, de papier, de ciment et autres industries lourdes. Le principe de fonctionnement de PE est simple. Les particules de charge neutre entrent dans le compartiment dans lequel elles sont chargées négativement par l'exposition à un source d'ions, ensuite les particules sont attirées vers des plaques collectrices par le champ électrostatique. Les particules de l'air sont ionisées par l'effet Corona qui est engendré par l'électrode pointue sous haute tension, placé au milieu entre deux plaques collectrices (*Figure 1*).

L'effet Corona est un phénomène qui se produit lorsque le courant d'électrons passe de l'électrode vers le fluide neutre entourant électrode. Ainsi, le courant ionise le fluide et crée la région de plasma à proximité d'électrode. Afin que l'effet Corona se produise il est nécessaire d'avoir le champ électrostatique E assez important pour que le fluide en question devienne conducteur et donc les électrons puissent passer à travers le fluide. L'effet Corona se produit seulement lorsque le champ E , sur la surface d'électrode, atteigne la valeur critique, par exemple dans l'air à pression ambiante cet effet se produit pour le champ $E \approx 30 \text{ kV/cm}$.

Précipiteur électrostatique est un projet difficile à étudier, néanmoins intéressant. Malgré la compréhension des phénomènes qui sont à la base du fonctionnement de PE il n'existe pas de modèle quantitatif qui pourrait exactement prédire la performance de ce dispositif. La difficulté de modéliser la performance de PE est liée au fait que le mouvement des particules dans le dispositif est engendré par le couplage des phénomènes physiques tels que la dynamique des fluides et les phénomènes électrostatiques.



(Figure 1 - Principe de fonctionnement de PE).

Il est connu que l'interaction de champ électrostatique avec la dynamique de fluide engendre le vent ionique. Le vent ionique est produit par le source d'ions qui entrent en collision à grande vitesse avec les particules de gaz qui résident dans l'espace entre les plaques collectrices et l'électrode. L'interaction de fluide avec le flux d'ions produit l'écoulement de fluide vers les plaques. La continuité d'écoulement de fluide nécessite que le fluide revienne dans la région autour de l'électrode où la concentration des ions est maximale.¹

2. Modélisation

2.1 Modélisation de dynamique de fluide

Il est possible d'écrire la dynamique des particules en sommant toutes les forces agissant sur la particule. À l'intérieur de PE les forces qui influencent la dynamique des particules sont la force électrostatique F_{el} (éq. 1) et la force de la traînée F_v (éq. 2). On fait l'hypothèse qu'on peut négliger la force de pesanteur terrestre devant les autres forces en question, approximation est valide pour les particules de diamètre inférieur ou égal à $0.01 \mu\text{m}$.²

$$\vec{F}_{el} = q\vec{E} \quad (\text{éq. 1})$$

$$\vec{F}_v = C_v A_{pr} \frac{\rho_f}{2} v \cdot \vec{v} \quad (\text{éq. 2})$$

La somme de toutes les forces agissant sur la particule doit être égale à la variation de la quantité de mouvement, donc

$$m\vec{a} = \vec{F}_{el} + \vec{F}_v \quad (\text{éq. 3})$$

En supposant que le nombre de Reynolds $Re \ll 1$ (éq. 4) on peut écrire que le coefficient de la traînée C_v est donnée par (éq. 5) (pour les particules de diamètre inférieur à $20 \mu\text{m}$).³ Pour les particules de la forme sphérique, en

¹ [1] G. A. KALLIO et D. E. STOCK

² Pour la tension $V = 10 \text{ kV}$ à pression $P = 1 \text{ bar}$, pour la particule de diamètre $d_p = 0.01 \mu\text{m}$ le rapport des deux forces vaut $F_{el}/mg = 51$; pour la particule de diamètre $0.1 \mu\text{m}$ le rapport vaut $F_{el}/mg = 0.1$.

³ [2] K.R. Parker, page 46

tenant en compte le facteur de correction de Cunningham C_u ⁴ (éq. 7) la force de la traîne F_v devient (éq. 6).

$$R_e = \frac{d_p |\vec{v}|}{\nu} \quad (\text{éq. 4})$$

$$C_w(R_e) = \frac{24}{R_e} \quad (\text{éq. 5})$$

$$\vec{F}_v = \frac{3\pi\mu d_p}{C_u} \vec{v} \quad (\text{éq. 6})$$

Définition des variables, en unités de système international :

R_e	= nombre de Reynolds, sans dimensions
C_v	= coefficient de la traînée, sans dimensions
C_u	= facteur de Cunningham, sans dimensions
g	= pesanteur terrestre, (m/s^2)
q	= charge d'une particule, (C)
d_p	= diamètre des particules, (m)
A_{pr}	= surface de particule, (m^2)
μ	= viscosité dynamique, (Ns/m^2)
ν	= viscosité cinématique, (m^2/s)
P	= Pression atmosphérique, (N/m^2)
ρ_f	= masse volumique de fluide, (kg/m^3)
m	= masse de la particule, (kg)
v	= vitesse perpendiculaire de fluide, (m/s)
w	= vitesse tangentielle de fluide, (m/s)
k_B	= la constante de Boltzmann, (J/K)
T	= la température en, (K)
λ	= libre parcours moyen des particules, (m)
ϵ_r	= permittivité du matériau, (F/m)
ϵ_0	= permittivité du vide, (F/m)

$$C_u = 1 + \frac{2\lambda}{d_p} \left\{ 1.246 + 0.42 \cdot e^{-0.87 \frac{d_p}{2\lambda}} \right\} \quad (\text{éq. 7})$$

On fait l'hypothèse que la vitesse de fluide vers les plaques n'a que la composante orthogonale, voir la (Figure 2), on déduit l'équation différentielle qui décrit la dynamique d'une particule sphérique soumise à champ électrique E (éq. 8).

⁴ En dynamique des fluides, le facteur de Cunningham est utilisé pour corriger la loi de Stokes afin de prendre en compte la discontinuité de fluide pour petites particules. Les valeurs de ce facteur sont déterminées analytiquement en fonction du diamètre des particules, l'équation (éq. 7). [2] K.R. Parker, page 56

$$\frac{dv}{dt} + 3 \frac{\mu d_p \pi}{m C_u} v = q \frac{E}{m} \quad (\text{éq. 8})$$

On résout (eq. 8) en imposant les conditions initiales $v(t = 0) = 0$, on obtient (eq. 9)

$$v(t) = v_t \left(1 - e^{-t/\tau} \right) \quad (\text{éq. 9})$$

$$\tau = \frac{m}{3\mu d_p \pi} C_u \quad (\text{éq. 10})$$

$$v_t = \frac{qE}{3\mu d_p \pi} C_u \quad (\text{éq. 11})$$

Par l'équation (eq. 9) on s'attend à avoir une saturation de la vitesse en fonction du temps. Tandis que de l'équation (eq. 11) on déduit que la vitesse terminale v_t des particules à l'intérieur de PE doit être linéairement proportionnelle à champ E et inversement proportionnelle à la diamètre d_p des particules.

2.2 Charge des particules à l'intérieur de PE

La particule est chargée lorsque sa surface est exposée à un source d'ions. Un ion qui s'approche vers la particule est fortement attiré vers elle et donc la particule subit la distorsion totale de charge. Lorsque la magnitude de charge d'ions sur la particule est égale à l'opposée de magnitude de sa charge totale la particule cesse d'être chargée.

Le processus de chargement d'une particule peut-être divisé en deux mécanismes: chargement par un champ électrostatique E (pour les particules $> 1\mu\text{m}$) et chargement par la diffusion (pour les particules $< 0.1\mu\text{m}$). Chargement par un champ E résulte lorsque l'ions suivent les lignes de champ E et sont amenés vers les particules. La chargement par la diffusion est dû aux ions qui sont diffusées aléatoirement à cause de la température thermodynamique i.e. le processus est décrit par la théorie cinétique des gaz.⁵

A l'intérieur de précipitateur les particules sont chargées par les deux mécanismes. Donc pour modéliser la charge il faut prendre en compte la somme de deux types de processus de

⁵ [2] K.R. Parker, page 52

chargement, par la diffusion et par un champ électrostatique. Un tel modèle a été développé par Cochett (1961) ce modèle est donné par (eq. 12), le modèle décrit la charge de saturation de la particule (au bout de temps infini).

$$(\text{éq. 12})$$

$$Q_p^\infty = \left\{ \left(1 + \frac{2\lambda}{d_p} \right)^2 + \left(\frac{2}{1 + \frac{2\lambda}{d_p}} \right) \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right) \right\} \pi \epsilon_0 d_p^2 E$$

En prenant en compte le charge des particules Q_p^∞ la vitesse des particules à l'intérieur de précipitateur devient (eq. 13).

$$v_t = \frac{Q_p^\infty E}{3\mu d_p \pi} C_u \quad (\text{éq. 13})$$

Après simplification de l'équation (eq. 13) on obtient (eq. 14).

$$v_t = \frac{KC_u \epsilon_0}{3\mu} d_p E^2 \quad (\text{éq. 14})$$

$$K = \left\{ \left(1 + \frac{2\lambda}{d_p} \right)^2 + \left(\frac{2}{1 + \frac{2\lambda}{d_p}} \right) \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right) \right\} \quad (\text{éq. 15})$$

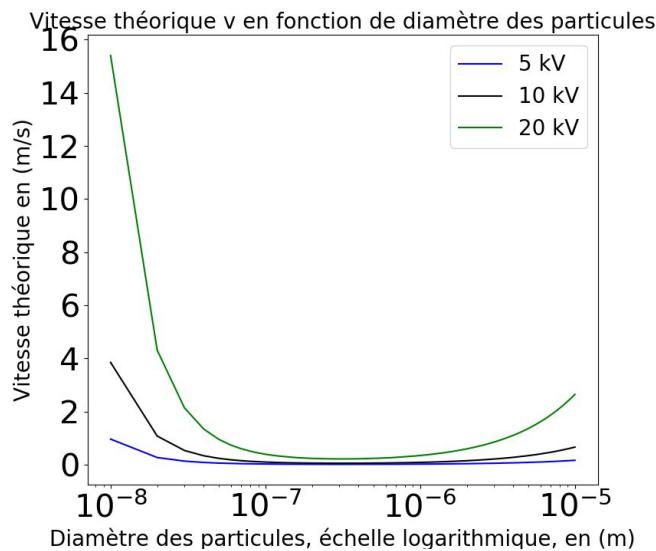
En prenant en compte le modèle de Cochett, pour un particule quelconque, on observe que la vitesse des particules à l'intérieur de précipitateur est proportionnelle à champ E^2 .

Sur la (Figure 2) on a tracé les valeurs de la vitesse théorique v donnée par (eq. 13) en fonction du diamètre des particules variant de $0.01\mu\text{m}$ à $10\mu\text{m}$, pour trois valeurs de tension. On observe que pour les particules plus fines la vitesse est plus grande, aussi on remarque que la vitesse est proportionnelle à potentiel $\sim V^2$.

Pour tracer la (Figure 2) on a se place dans les conditions de notre expérience⁶:

$$T = 25\text{ }C^\circ, P = 1\text{ bar}, \epsilon_r = 10\text{ (F/m)}, \\ \mu = 18.37 \cdot 10^{-6}\text{ (Ns/m}^2\text{)}, \lambda = 10^{-7}\text{ m}$$

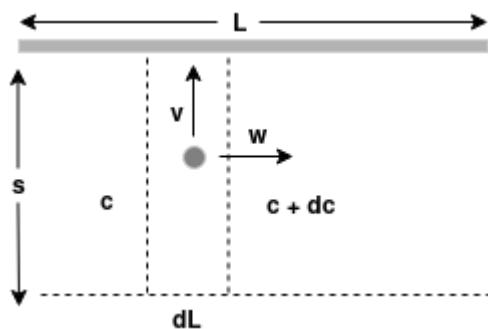
⁶ Pour les gazes on pris l'ordre de grandeur de $\lambda \approx 10^{-7}\text{ m}$, et donc λ est supposée constante.



(Figure 2, Vitesse théorique v en fonction de diamètre des particules, pour trois valeurs de tensions)⁷

2.3 Efficacité de précipiteur: modèle de Deutsch

Maintenant on suppose que les particules à l'intérieur de PE sont distribuées d'une manière homogène sur tout longueur de précipiteur L . Ainsi, les particules ont la vitesse selon v et w (Figure 3). La vitesse v correspond à la vitesse v_t perpendiculaire aux plaques (eq. 13); la vitesse de fluide w est la vitesse parallèle aux plaques. Dans les conditions idéales de précipiteur électrostatique la vitesse w correspond à la vitesse de fluide qui propulse le fluide dans la région de précipitation⁸.



(Figure 3 - mouvement d'une particule à l'intérieur PE)

⁷ Annexe A: La programme Python3 pour tracer la (Figure 2)

⁸ Par exemple, cela pourrait être la vitesse de fluide à cause d'un ventilateur qui propulse les particules dans la région de précipitation.

On peut donc déduire le ratio de temps moyen d'une particule dans le région de précipitation T_M (eq. 16).

$$T_M = \frac{vL}{ws} \quad (\text{éq. 16})$$

En exprimant le rapport infinitésimal de concentration des particules $dc(L, d_p)$ et en égalisant avec le temps moyen dans le région de précipitation dT_M on aboutit (eq. 17). Ensuite, en intégrant (eq. 17) on trouve (eq. 18) et en considérant le rendement d'un système quelconque η (eq. 19) on trouve le rendement de précipiteur électrostatique (eq. 20) qui est aussi connue comme l'équation de Deutsch.

$$\frac{(c + dc) - c}{c} = -\frac{v}{ws} dL \quad (\text{éq. 17})$$

$$c(L, d_p) = c(0, d_p) e^{-\frac{vL}{ws}} \quad (\text{éq. 18})$$

$$\eta = \frac{c(0, d_p) - c(L, d_p)}{c(0, d_p)} \quad (\text{éq. 19})$$

$$= 1 - e^{-\frac{vL}{ws}} \quad (\text{éq. 20})$$

3. Matériel et Méthodes

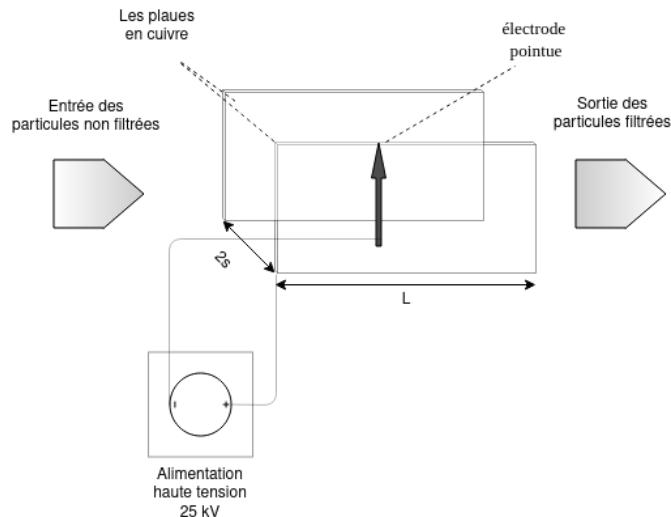
3.1 Présentation de dispositif

Le schéma général d'expérience est représenté sur la (figure 4). Le dispositif est constitué de deux plaques en cuivre placées à l'opposé l'un à l'autre. Les deux plaques sont séparées de distance $2s = 5.0 \pm 0.1 \text{ cm}$ et sont de longueur $L = 15.0 \pm 0.1 \text{ cm}$, au milieu de deux plaques on a placé électrode pointeau en cuivre de rayon $r = 2.0 \pm 0.2 \text{ mm}$. Ensuite on a connecté les plaques et l'électrode à l'alimentation de haute tension.

Pour analyser l'efficacité de précipiteur électrostatique on a effectué deux expériences. En premier lieu on a mesuré la vitesse des particules, deuxièmement on a mesuré la masse des particules déposées sur les plaques. Pendant les deux expériences on a contrôlé le potentiel appliqué.

Pour effectuer les deux mesures on a enfermé le précipiteur, représenté sur la (*Figure 4*), dans une boîte transparente mais pas hermétique, donc il y avait l'échappement de flux des particules.

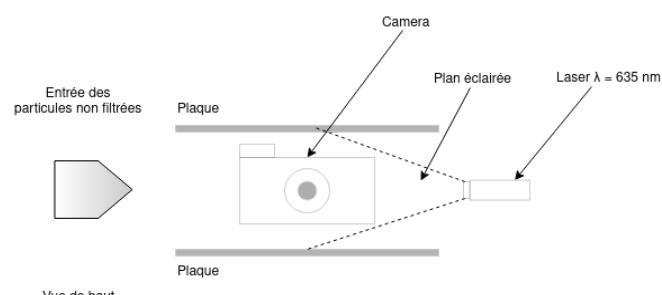
Comme source des particules on a choisi un générateur de fumée de 400w qui fonctionne en chauffant liquide à base d'huile, lorsque la température nécessaire est atteinte les particules sont dispersées à la commande de l'utilisateur.⁹



(Figure 4 - Présentation de dispositif)

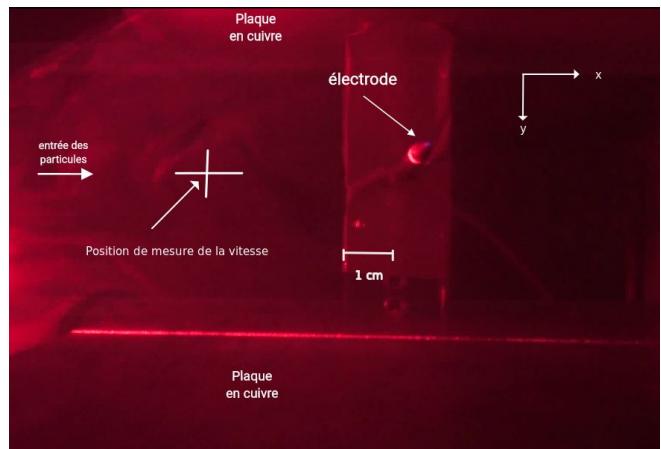
3.2 Mesure de vitesse des particules

Pour mesurer la vitesse on a monté une caméra dans une boîte transparente avec le PE, on a éclairé le dispositif, dans la boîte, avec les faisceaux de la lumière monochromatique (*Photo 1*) et la (*Figure 5*) provenant de laser. L'éclairage des particules pendant l'expérience nous a permis de visualiser le mouvement des particules fines.



(Figure 5 - Mesure de vitesse des particules)

⁹ Les valeurs typiques de diamètre des particules produites par les générateurs de fumée sont de l'ordre de $1 \mu\text{m}$.



(Photo 1 - Mesure de vitesse des particules)

Afin de mieux déduire la vitesse des particules, on a effectué un enregistrement de mouvement de fluide pour une seule valeur de potentiel électrique. On a pris les vidéos pour les potentiels allant de 2 kV jusqu'à 18 kV par pas de 2 kV . Avant chaque enregistrement de l'expérience, on a rempli la boîte transparente avec la fumée pendant $t = 10.0 \pm 2.0 \text{ s}$. À la fin de chaque expérience on a vidé la boîte du résidu de la fumée.

Pour déduire la vitesse des particules (dans le précipiteur) à partir des vidéos, on a utilisé le logiciel de traitement d'images *ImageJ*.¹⁰ Spécifiquement, pour mesurer la vitesse des particules, on a suivi une concentration de la fumée importante, toujours dans la même région (*Photo 1*), entre quelques images consécutives, ensuite on a mesuré le déplacement de la concentration de la fumée selon les directions x et y , connaissant le temps $dt = 0.02 \text{ s}$ entre deux images on a pu déduire les vitesses w et v .

3.3 Mesure de la masse des particules déposées sur une plaque en fonction de potentiel et en fonction de temps

Le principe pour mesurer le taux de dépôt des particules c'était de mesurer la masse d'une plaque avant et après le fonctionnement de PE pendant $t = 120.0 \pm 2.0 \text{ s}$, sous différentes valeurs de haute tension. Pour effectuer cette expérience on a suivi le protocole suivant. On a commencé par la mesure de masse d'une plaque avant l'expérience, ensuite on a rempli la boîte transparente avec la fumée pendant $t = 10.0 \pm 2.0 \text{ s}$, on a augmenté le potentiel et on a laissé fonctionner le PE pendant $t = 120.0 \pm 2.0 \text{ s}$, une fois l'expérience terminée on a mesuré la masse de la plaque. À la fin on a nettoyé la plaque en s'assurant qu'il ne reste aucun

¹⁰ Annexe B: Traitement d'images - mesure de la vitesse des particules

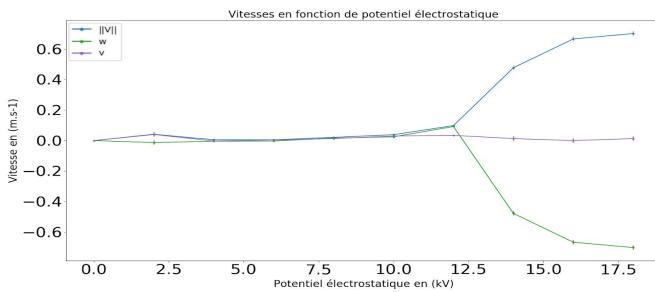
dépôt supplémentaire des particules. On a répété le même protocole pour les valeurs de tension allant de 0 à 20 kV.

En plus des mesures de taux de dépôt des particules en fonction de potentiel pour un temps donné (l'expérience décrite dans le paragraphe précédent), on a effectué les mesures de taux de dépôt des particules en fonction de temps à un potentiel fixe de 13 kV. On a suivi le même protocole des mesures que pour l'expérience décrite dans le paragraphe précédent.

Les deux mesures (de taux de dépôt des particules) nous ont permis de déterminer si la quantité de particules déposées sur la plaque saturait en fonction du temps ou en fonction de potentiel.

4. Résultats

4.1 Résultats de mesure de vitesse des particules



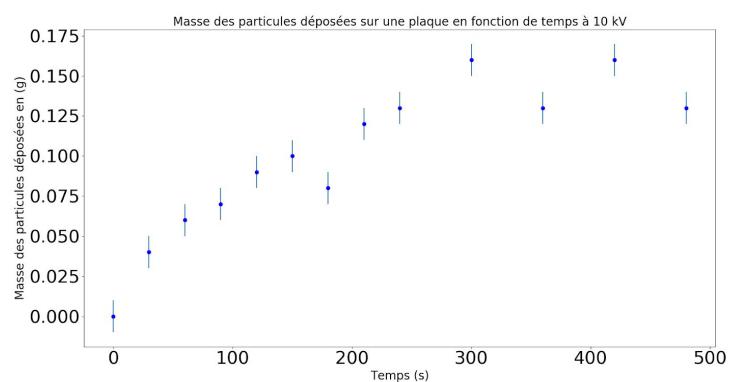
(Figure 6 - vitesses à l'intérieur de PE en fonction de potentiel)

Sur la (Figure 6) on a représenté les dix points de mesure de vitesses pour les tensions allant de 2 kV jusqu'à 18 kV, ainsi que les incertitudes associées. On observe que les résultats de notre expérience de mesure de la vitesse sont contraires à celles qu'on s'attendait par notre modèle théorique. Notamment, la composante de la vitesse orthogonale aux plaques v reste constante en fonction de potentiel, tandis que la composante le long les plaques w augmente (et change son sens) pour un potentiel de 12.0 ± 0.1 kV.

On est donc amené à conclure que la vitesse ne suit pas le modèle théorique de la vitesse développée dans l'équation (eq.13). On s'attendait à voir la vitesse v d'être proportionnelle au carré du potentiel électrique. Incompatibilité de modèle théorique avec l'expérience nous ne permet pas de relier et interpréter davantage la relation théorie-expérience.

4.2 Résultats de mesure de la masse des particules déposées sur une plaque fonction de potentiel et en fonction de temps

Sur le (Figure 7) on a représenté la masse des particules déposées sur une plaque en fonction de temps à 10 kV. On observe que à 10 kV, pour le premier mesure qui correspond à $t = 30.0 \pm 2.0$ s, (40.0 ± 10.0) mg des particules sont déposées. Ce résultat est bien en accord avec les résultats auxquels on s'attend pour la tension de 10 kV, puisque comme indiqué sur la (Figure 8) le potentiel seuil, pour l'expérience de dépôt des particules en fonction de potentiel, est autour de 4 kV. Ensuite, sur le (Figure 7) à $t = 300$ s on remarque qu'il existe un maximum de dépôt des particules, donc le dépôt des particules sur une des plaques se sature.

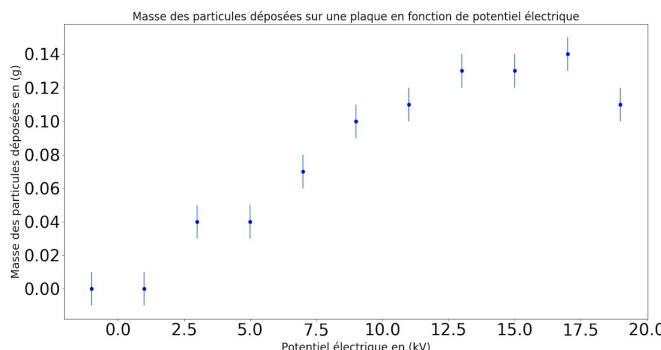


(Figure 7 - mesure de la masse des particules déposées sur une plaque en fonction de temps à 10 kV)

Sur le (Figure 8) on a représenté la masse des particules déposées sur une plaque en fonction de potentiel, pour un temps d'expérience fixe à $t = 120$ s. Autour de 4.0 ± 0.1 kV on observe le potentiel seuil, à partir duquel le dépôt des particules sur la plaque augmente.¹¹ Le potentiel seuil peut-être expliqué par l'apparition de l'effet de Corona qui permet de charger les particules et ainsi les attirer vers les plaques positives. En conditions de l'air sec l'ionisation de l'air se produit autour de $E = 3.10^6$ V/m, le champ correspondant à l'expérience décrite au-dessus correspond à potentiel de 4 kV, la distance $s = 2.5$ cm et donc le champ correspondant vaut $E \approx 1.6 \cdot 10^5$ V/m. La fumée utilisée dans l'expérience humidifie l'air, le champ E nécessaire pour produire l'effet Corona diminue; ceci peut, en partie,

¹¹ Les expériences montrent que le potentiel seuil pour les mesures de dépôt de la masse en fonction de temps est situé autour de (5.0 ± 1.0) kV.

expliquer pourquoi on observe le seuil de dépôt des particules à $E \approx 1.6 \cdot 10^5 \text{ V/m}$.



(Figure 8 - mesure de la masse des particules déposées sur une plaque en fonction de potentiel pour $t = 120 \text{ s}$)

Autour de 13 kV (Figure 8) on observe le pic de déposition de masse, ensuite on observe la saturation des particules déposées sur une plaque. Comparaison des deux expériences (masse des particules déposées en fonction de potentiel - Figure 8) avec l'expérience (masse des particules déposées en fonction de temps - Figure 7)¹² nous suggère que le niveau de la saturation représente sur la (Figure 8), autour de 13 kV, correspond à valeur de saturation de précipiteur électrostatique.

Le temps nécessaire pour atteindre la saturation à 13 kV, dans l'expérience (dépôt de la masse en fonction de potentiel - Figure 8), au maximum est $t = 120 \text{ s}$ (le temps de la conduite d'un mesure), tandis que le temps nécessaire pour atteindre la saturation à 10 kV, dans l'expérience (dépôt de la masse en fonction de temps - Figure 7) est au maximum $t = 300 \text{ s}$. Les temps de saturation étant différents pour deux expériences, la conclusion que le potentiel seuil pour le PE est situé autour de 13 kV peut apparaître contradictoire. Néanmoins, la comparaison est bien en d'accord avec l'expérience puisque à 13 kV on s'attendaient le temps de la saturation plus court que pour 10 kV.

5. Discussions

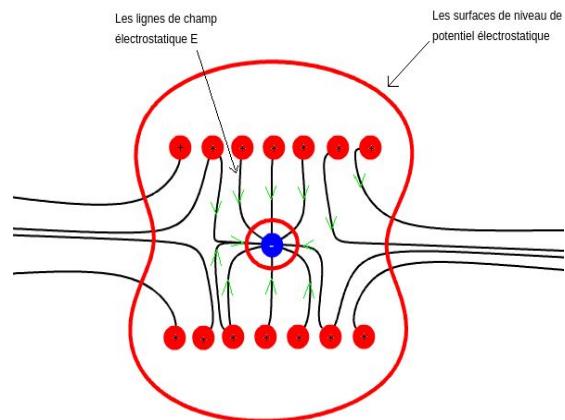
L'incompatibilité de la théorie-expérience peut-être expliquée par analyse de l'hypothèses de modèle théorique de la vitesse (eq. 13) et des conditions expérimentales sous lesquelles l'expérience a été menée.

¹² Mesure représenté sur la (figure 7) correspond à (tension, temps saturation) (10 kV, 300s), mesure représentée sur la (figure 8) correspond à (13 kV, 120s).

Pour que la vitesse d'une particule soit orthogonale aux plaques, dans la région de précipitation, il est nécessaire que la particule soit amenée vers les plaques par les lignes de champ électrostatique E . Les lignes de champ électrostatique sont orthogonales aux plaques seulement dans l'intersection des plans d'électrode et des plaques. Dans tout autre région que dans l'intersection de deux plans, de l'électrode et des plaques, à l'intérieur de PE les lignes de champ électrostatique sont parallèles à l'électrode. En conséquence, si le dispositif expérimental (de précipiteur électrostatique) consiste d'un seul électrode placée au milieu de précipiteur (le cas de notre expérience) la particule aura la vitesse seulement dans la direction parallèle aux plaques (w) jusqu'à avoir atteint l'électrode. Les mesures des vitesses dans notre expérience étaient prises d'une distance $\sim 3 \text{ cm}$ de l'électrode, ceci explique pourquoi la vitesse v (Figure 5) reste constante en fonction de potentiel.

Les observations discutées dans le paragraphe précédent peuvent être mieux comprises en visualisant les lignes de champ électrostatique.

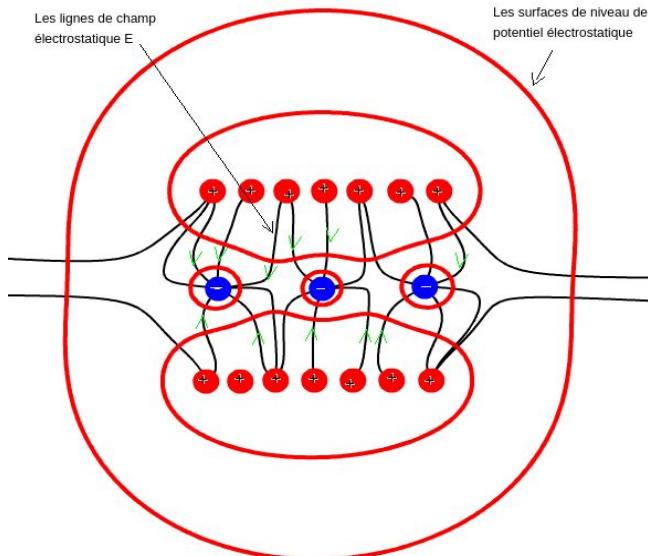
Sur la (Figure 8) est représentée la simulation¹³ des lignes de champ électrostatique et des surfaces de niveau de potentiel électrostatique pour la configuration des charges ponctuels qui correspond à l'expérience de PE avec les deux plaques en parallèle et un électrode au milieu (la configuration qui correspond à l'expérience de PE étudiée dans ce rapport). On remarque que les lignes de champ sont perpendiculaires aux plaques, donc la vitesse est aussi perpendiculaire, seulement à proximité de électrode.



(Figure 8 - la simulation des lignes de champ à l'intérieur de PE avec un électrode au milieu)

¹³ Les simulations ont été faites en utilisant le simulateur de lignes de champ de libre d'accès créé par AUBERT Emmanuel, Maître de Conférences à l'Université de Lorraine [4].

Sur la (Figure 9) on a représenté la même simulation que pour la (Figure 8), cependant on a placé 3 charges ponctuelles négatives au milieu, qui correspond à placer trois électrodes au milieu. On remarque que le nombre des lignes de champs perpendiculaires aux plaques devient plus important.



(Figure 9 - la simulation des lignes de champ à l'intérieur de PE avec trois électrodes au milieu)

On peut conclure qu'il serait possible d'obtenir les valeurs de la vitesse v (dans la direction orthogonale aux plaques) non constants, soit en augmentant le nombre d'électrodes dans le PE, soit en prenant les mesures de la vitesse dans l'intersection de plans des plaques et d'électrodes.

Références

- [1] Gregory A. KALLIO and David E. STOCK, Flow Visualization Inside A Wire-PlateElectrostatic Precipitator, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL 26, NO 3, MAY/JUNE 1990
- [2] K. R. PARKER, Applied Electrostatic Precipitation, Blackie Academic & Professional, 1997, ISBN-13:978-94-010-7193-2
- [3] Clément MOISSARD, Précipiteur électrostatique, Mémoire de Master, Université Paris-Saclay
- [4] Simulateur des lignes de champ et des équipotentielles, AUBERT Emmanuel, Maître de Conférences à l'Université de Lorraine, http://www.crystallography.fr/pages_perso/Aubert/Electro/GradIso2D/GradIso2D.html, consulté le 17/12/2020.

Annexe A: La programme Python3 pour tracer la (Figure 2).

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

#(#diamètre des particules, potentiel el.)
def calculate_speed(d_p, V_el):
    #libre parcours moyen
    lambd = 10**(-7)
    #viscosité dynamique de l'air à 25 °C.
    mu = 18.37 * 10**(-6)
    #epsilon relative
    epsr = 10
    #epsilon zéro
    eps0 = 8.8541878128*10**(-12)
    #Champ électrique = V_el/2.5cm
    #(2.5 cm correspond à la distance plaque -
    # électrode)
    E = V_el*10**3 / (2.5*10**-2)
    #Facteur de Cunningham
    Cu = 1 + 1.246*2*lambd/d_p+0.42*2*
    *(lambd/d_p)*np.exp(-0.87*d_p/(2*lambd))
    #L'équation 15
    K = (1+2*lambd/d_p)**2 +
    (2/(1+2*lambd/d_p))*( (epsr-1) / (epsr+2))
    #Vitesse
    v = K*Cu*eps0/(3*mu) *d_p*E**2
    return v

El_potential = [5, 10, 20]
plots = []
for V in El_potential:

    dp_arr = []
    v_arr = []
    for i in range(1, 1001):
        d_p = i*10**(-8)
        v = calculate_speed(d_p,V)
        dp_arr.append(d_p)
        v_arr.append(v)
        plots.append(dp_arr)
        plots.append(v_arr)

    #V = 5kV
    plt.plot(plots[0],plots[1],'b-',label="5 kV")
    #V = 10kV
    plt.plot(plots[2],plots[3],'k-',label="10 kV")
    #V = 20kV
    plt.plot(plots[4],plots[5],'g-',label="20 kV")
    plt.title("Vitesse théorique v en fonction de diamètre des particules", fontsize =20)
    plt.xlabel("Diamètre des particules, échelle logarithmique, en (m)", fontsize = 20)
    plt.ylabel("Vitesse théorique en (m/s)", fontsize = 20)
    plt.legend(fontsize = "20")
    plt.xticks(fontsize = 30)
    plt.xticks(fontsize = 30)
    plt.xscale('log')
    plt.show()

```

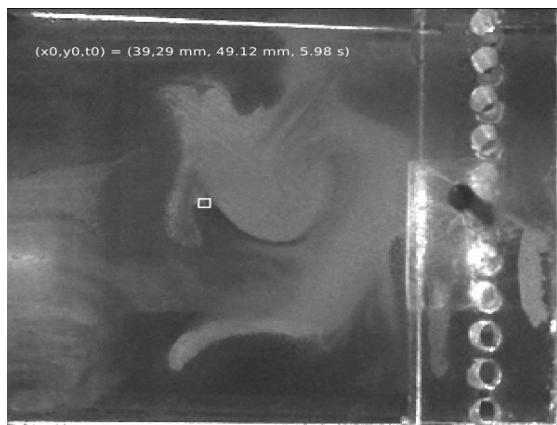
Annexe B: Traitement d'images - mesure de la vitesse des particules

Pour mesurer la vitesse des particules, on a suivi une concentration de la fumée importante, qui a préservé ses contours, entre quelques images consécutives, (*Photo 2*) et (*Photo 3*), ensuite on a mesuré le déplacement de la concentration de la fumée selon les directions (x, y) connaissant le temps $dt = 0.02 s$ entre deux images on a calculé les vitesses w et v .

Sur les photos au-dessous on a suivi un concentration de la fumée, pour la tension de $10 kV$, entre 8 images consécutives.

$$w = (x_8 - x_0)/(t_8 - t_0) = 0.028 \text{ m/s}$$

$$v = (y_8 - y_0)/(t_8 - t_0) = 0.034 \text{ m/s}$$



(*Photo 2: Concentration de la fumée à l'instant initial.*)



(*Photo 3: Concentration de la fumée à l'instant final.*)