

Dust Collector

KOVALEVSKIJ Marcin¹

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

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

Date de déposition 06/11/2020

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'électrode pointue (charge négativement) place 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 l'étude de ce dispositif on trouve qu'il existe un potentiel de l'ordre de 13 kV pour lequel la masse des particules déposées sur les plaques est maximale et en augmentant le potentiel cette quantité diminue.

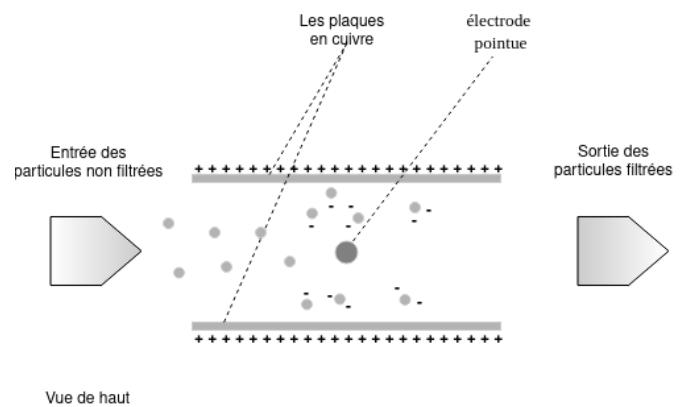
1. Introduction

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 elles 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*).

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 électrostatique.

L'interaction de champ électrostatique avec la dynamique de fluide engendre le vent ionique aussi connu comme le vent électrostatique. Le vent 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 ou la concentration des ions est maximale.¹



(Figure 1 - Principe de fonctionnement de PE).

¹ [1] G. A. KALLIO et D. E. STOCK

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 variation de la quantité de mouvement - F_t (éq. 1), la force électrostatique F_{el} (éq. 2) et la force de la traînée F_v (éq. 3). On fait l'hypothèse qu'on peut négliger la force de pesanteur terrestre devant les autres forces en question.

$$\vec{F}_t = m\vec{a} \quad (\text{éq. 1})$$

$$\vec{F}_{el} = q\vec{E} \quad (\text{éq. 2})$$

$$\vec{F}_v = C_v A_{pr} \frac{\rho_f}{2} v \cdot \vec{v} \quad (\text{éq. 3})$$

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

$$\vec{F}_t + \vec{F}_{el} + \vec{F}_v = \vec{0} \quad (\text{éq. 4})$$

En supposant que le nombre de Reynolds $Re \ll 1$ (éq. 5) on peut écrire que le coefficient de la traînée C_v est donnée par (éq. 6) (pour les particules de la taille inférieure à $20 \mu\text{m}$ ²). Pour les particules de la forme sphérique, en prenant en compte le facteur de correction de Cunningham C_u ³ la force de la traîne F_v devient (éq. 7).

$$R_e = \frac{d_p |\vec{v}|}{\nu} \quad (\text{éq. 5})$$

$$C_w(R_e) = \frac{24}{R_e} \quad (\text{éq. 6})$$

$$\vec{F}_v = \frac{3\pi\mu d_p}{C_u} \vec{v} \quad (\text{éq. 7})$$

Définition des variables :

R_e	= nombre de Reynolds, sans dimensions
C_v	= coefficient de la traînée, sans dimensions
C_u	= facteur de Cunningham, sans dimensions
q	= charge d'une particule, (C)
d_p	= diamètre des particules, mètres (m)
A_{pr}	= surface de particule, (m^2)
μ	= viscosité dynamique, (Ns/m^2)
ν	= viscosité cinématique, (m^2/s)
ρ_f	= masse volumique de fluide, (kg/m^3)
v	= vitesse perpendiculaire de fluide, (m/s)
w	= vitesse tangentielle de fluide, (m/s)

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

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

On résout (éq. 5) en imposant les conditions initiales $v(t=0) = 0$, on obtient (éq. 9)

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

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

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

² [2] K.R. Parker, page 46

³ 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 expérimentalement en fonction du diamètre 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.⁴

A l'intérieur de précipiteur 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 chargement, par la diffusion et par un champ électrostatique. Un tel modèle a été développé par Cochet (1961) ce modèle est donné par (eq. 12), le modèle décrit la charge de saturation de la particule (au bout de temps infini). Les variables sont définies comme: λ = libre parcours moyen des particules, ϵ_r = permittivité du matériau des particules et ϵ_0 = permittivité du vide.

(éq. 12)

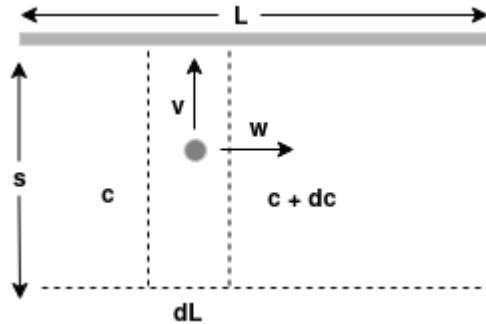
$$Q_p^\infty = \left\{ \left(1 + \frac{2\lambda}{d_p} \right)^2 + \left(\frac{2}{1 + \frac{2\lambda}{d_p}} \right) \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \right) \right\} \pi \epsilon_0 d_p^2 E$$

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

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

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 . Aussi, les particules ont la vitesse selon v et w (Figure 2).



(Figure 2 - mouvement d'une particule à l'intérieur PE)

On peut donc déduire le ratio de temps moyen d'une particule dans la région de précipitation T_M (eq. 14).

$$T_M = \frac{vL}{ws} \quad (\text{éq. 14})$$

En exprimant le ratio 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. 15). Ensuite en intégrant (eq. 15) on trouve (eq. 16) et en considérant le rendement d'un système quelconque η (eq. 17) on trouve le rendement de précipiteur électrostatique (eq. 18) qui est aussi connue comme l'équation de Deutsch .

$$\frac{(c + dc) - c}{c} = - \frac{v}{ws} dL \quad (\text{éq. 15})$$

$$c(L, d_p) = c(0, d_p) e^{-\frac{vL}{ws}} \quad (\text{éq. 16})$$

$$\eta = \frac{c(0, d_p) - c(L, d_p)}{c(0, d_p)} \quad (\text{éq. 17})$$

$$= 1 - e^{-\frac{vL}{ws}} \quad (\text{éq. 18})$$

⁴ [2] K.R. Parker, page 52

3. Matériel et Méthodes

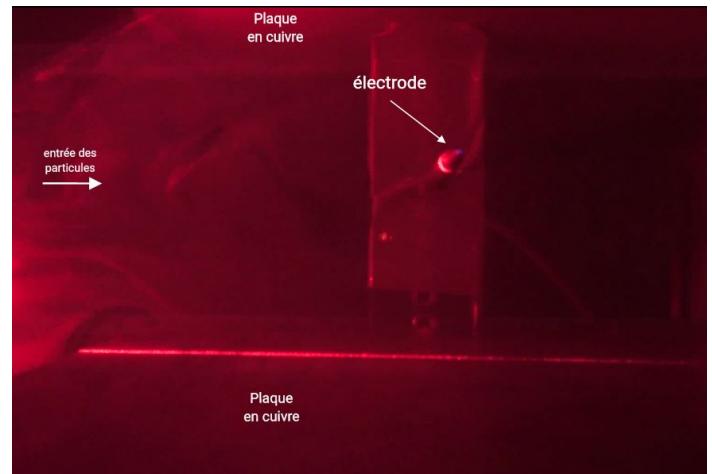
3.1 Présentation de dispositif

Le schéma général d'expérience est représenté sur la (figure 3). 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 $2s = 5 \text{ cm}$ et sont de longueur $L = 15 \text{ cm}$, au milieu de deux plaques à la distance on a placé électrode pointue en cuivre de rayon $r = 2 \text{ mm}$. Ensuite on a connecté les plaques et l'électrode à l'alimentation de haute tension.

Pour analyser le précipitateur 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 précipitateur, représenté sur la figure, 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, puis lorsque la température nécessaire est atteinte les particules sont dispersées à la commande de l'utilisateur.



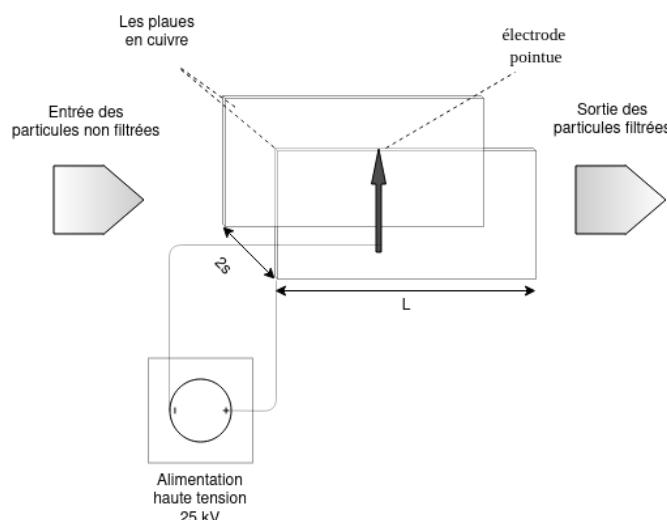
(photo 1 - Mesure de vitesse des particules)

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) provenant de laser. L'éclairage des particules pendant l'expérience nous a permis de visualiser le mouvement des particules fines. Ensuite, on a rempli la boîte avec la fumée et on a commencé l'expérience en augmentant le potentiel de 3kV jusqu'à 20kV incrémentant le potentiel par pas de 1kV chaque 20 secondes.

3.3 Mesure de la masse des particules déposées sur une plaque

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 2 minutes, 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 10 secondes, on a augmenté le potentiel et on a laissé fonctionner le PE pendant 2 minutes, après l'exposition de plaque sous haute tension on a mesuré la masse de la plaque. À la fin on a nettoyé à sec la plaque en s'assurant qu'il ne reste aucun dépôt supplémentaire des particules. On a répété le même protocole pour les valeurs de tension allant de 0 à 20 kV.



(Figure 3 -Présentation de dispositif)

4. Résultats

4.1 Résultats de mesure de vitesse des particules⁵

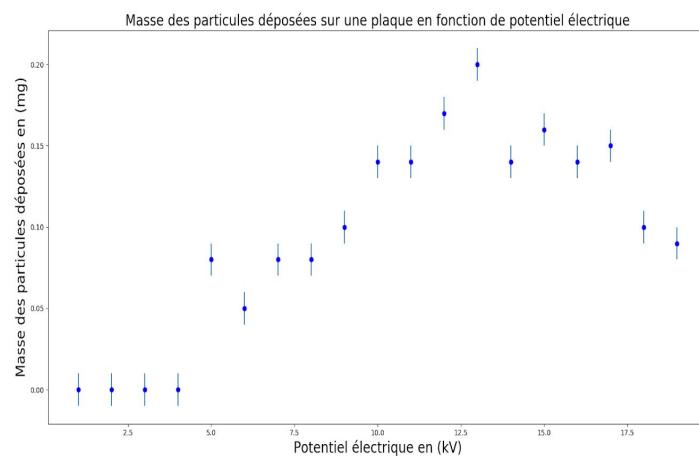
4.2 Résultats de mesure de la masse des particules déposées sur une plaque

Sur le (graphe 1) on observe le potentiel seuil, autour de 5 kV, à partir duquel on observe la déposition de masse sur une plaque. Le point 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 sèche l'ionisation de l'air se produit autour de $E = 3.10^6 \text{ V/m}$, le champ correspondant à l'expérience décrite au-dessus correspond à potentiel de 5 kV, la distance $s = 2.5 \text{ cm}$ et donc le champ correspondant vaut $E = 2.10^5 \text{ V/m}$. La fumée utilisé dans l'expérience humidifie l'air, le champ E nécessaire pour produire l'effet Corona diminue; ceci peut, en partie, expliquer pourquoi on observe le seuil de dépôt des particules à $E = 2.10^5 \text{ V/m}$.

Autour de 13 kV on observe le pic de déposition de masse sur une plaque, ensuite l'accumulation de la masse diminue en fonction de potentiel, on s'attendait plutôt observer l'effet inverse. Ce phénomène doit-être davantage étudié dans la suite de rapport. À ce stade, on peut noter que dans les conditions des précipiteurs électrostatiques réels, utilisées dans l'industrie, on observe la continuité d'augmentation de dépôt des particules sur les plaques en fonction de potentiel.

5. Discussions

L'expérience sur la mesure de la masse des particules déposées sur une plaque peut-être davantage améliorée par la hermétisation de le boîte transparente dans laquelle l'expérience a été menée. Cela aurait pour le but de quantifier le débit ainsi que permettrait d'explorer le modèle décrit dans la section théorique sur le rendement de ce type de dispositif.



(Graphe 1 - mesure de la masse des particules déposées sur une plaque)

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

⁵ Cette section sera finie pour le rapport final.