

MODELISATION DE LA CAPTURE DE PARTICULES ULTRAFINES PAR ELECTROFILTRATION

M. Ondarts^{1*}, J-P. Harouz¹, B. Golly¹, M. Chhay¹ et E. Gonze¹

¹ LOCIE, UMR5271, Université Savoie Mont-Blanc, F-73376, Le Bourget du Lac

*Courriel de l'orateur : michel.ondarts@univ-smb.fr

MODELING OF ULTRA-FINE PARTICLE CAPTURE BY ELECTROFILTRATION

RESUME

Ces dernières années, l'électrofiltration, procédé permettant la collecte de particules aéroportées, a fait l'objet de nombreuses études. Celles-ci ont abouti à des optimisations significatives, permettant d'envisager son intégration dans des applications liées aux bâtiments. Cependant, sa faible efficacité pour la collecte des particules ultrafines demeure un frein important. L'objectif de cette étude consiste en l'adaptation de modèles d'électrofiltres à deux étages pour la collecte de ces particules. Le modèle proposé, reposant sur des hypothèses simples et peu coûteuses en temps de calcul, permet de décrire l'ensemble des comportements observés expérimentalement. Il permet, en outre, une estimation de la limite de la zone de charge partielle en fonction des paramètres du collecteur.

ABSTRACT

In recent years, electrostatic filtration, a process for collecting airborne particles, has been the subject of numerous studies. These have resulted in substantial optimisations, thus rendering its integration into building-related applications a relevant prospect. Nevertheless, the efficiencies for nanoparticle collection continues to represent a significant knowledge gap. The objective of this study is to adapt electrostatic precipitator models for the collection of nanoparticles description. The proposed model, based on simple assumptions and requiring minimal computing time, describes all of the behaviours observed experimentally. Furthermore, it facilitates the estimation of the partial charge area limit.

MOTS-CLES : Particules ultrafines, Electrofiltration, Modèle semi-empirique, Vitesse de migration / **KEYWORDS:** Ultra-fine particles, Electrofiltration, Semi-empirical model, Migration velocity

1. INTRODUCTION

La pollution de l'air et ses effets délétères sont aujourd'hui largement décrits. En France, de récentes études démontrent que l'exposition chronique aux particules atmosphériques serait responsable d'une diminution de l'espérance de vie à 30 ans de 9 à 15 mois pour les zones impactées par des épisodes de pollution aux particules (IARC, 2018). C'est donc fort logiquement que l'ONU a inscrit dans ses objectifs de développement durable la diminution de l'exposition des populations aux pollutions de l'air (« réduire nettement le nombre de décès et de maladies dus à des substances chimiques dangereuses et à la pollution et à la contamination de l'air, de l'eau et du sol », objectif de développement durable 3.9). Une solution permettant de diminuer ces expositions est d'équiper les bâtiments de technologies de capture de particules efficaces comme, par exemple, de filtres mécaniques ou d'électrofiltres (ESP). Cette dernière technologie est basée sur une succession de trois étapes : la génération de charges électriques (ionisation de l'air), la charge des particules aéroportées par contact avec les charges puis la collecte des particules chargées par déviation de leur trajectoire dans un champ électrique.

De récentes études nationales (ANR Winfil et ADEME TERScIAiRE) ont permis de démontrer qu'il était possible d'intégrer la technologie d'électrofiltration aux systèmes de ventilation, que ce soit pour des bâtiments tertiaires ou individuels et pour différents modes de ventilation (CTA et simple VMC). Malgré les bonnes efficacités de collecte pour les particules fines, ces études se sont heurtées aux mêmes verrous technologiques que les études antérieures dans ce domaine, à savoir une faible efficacité de collecte pour les particules ultrafines (diamètre inférieur à 100 nm). Pour ces particules, la baisse d'efficacité est attribuée à une faible efficacité de charge : le nombre de particules non chargées augmente avec la diminution de leur diamètre. Cette gamme de diamètres est classiquement appelée « zone de charge partielle ».

La modélisation d'un électrofiltre nécessite la description de la génération des ions (modélisation du plasma), des mécanismes de charge des particules et du transport de l'ensemble de ces espèces dans la zone de charge puis dans la zone de collecte. La prise en compte dans les modèles de l'ensemble de ces phénomènes permet la description des comportements observés quel que soit le diamètre de la particule mais est cependant mathématiquement complexe et coûteuse en temps de calcul. Une approche alternative consiste en l'utilisation de modèles semi-empiriques comme, par exemple, le modèle de Deutsch-Anderson. Malgré des résultats satisfaisants pour les particules de grosses dimensions, ces approches, basées sur des calculs de

charges moyennes, ne permettent pas la description de la diminution de l'efficacité de collecte dans la zone de charge partielle.

L'objectif de cette étude est d'adapter les modèles semi-empiriques existants afin qu'ils décrivent correctement l'efficacité de collecte des particules ultrafines. Pour ce faire, il est proposé de substituer les calculs classiques basés sur les charges moyennes par l'utilisation d'une distribution de charge. La partie relative au transport est, quant à elle, conservée telle qu'elle est décrite dans les modélisations classiques.

2. MATERIEL ET METHODE

2.1. Description du modèle

Le système modélisé est un ESP à deux étages. Les hypothèses suivantes sont faites : absence de turbulence et de vent ionique ; formulation bidimensionnelle du problème. La figure 1 présente le système modélisé et ses grandeurs caractéristiques.

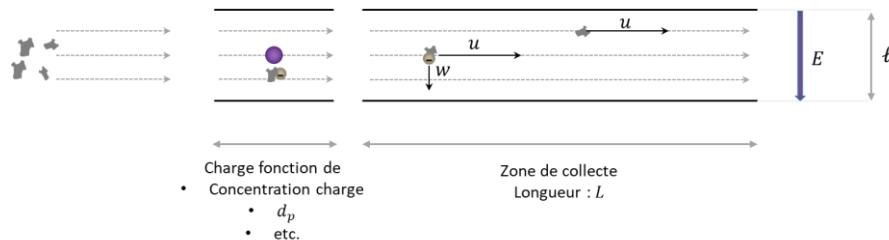


Figure 1. Schéma de principe de l'ESP modélisé.

Le calcul de l'efficacité de collecte se base sur des hypothèses simples de transport au collecteur. Le transport d'une particule est modélisé par une composante parallèle aux plaques collectrices, dans la direction du flux d'air (u) et d'une composante normale aux plaques, dans la direction du champ électrique (w). La vitesse de la particule suivant la composante parallèle aux plaques est égale à la vitesse de l'air. La vitesse de la particule suivant la composante normale aux plaques est issue d'un bilan des forces et à pour expression :

$$w = \frac{q \cdot e \cdot C_u \cdot E}{3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d_p}$$

où w est la vitesse de sédimentation, q le nombre de charge, e la charge élémentaire, C_u le nombre de Cunningham, E le champ, μ la viscosité dynamique et d_p le diamètre de la particule.

Le calcul de la vitesse nécessite la détermination de la charge de la particule. Dans cette étude, une distribution de charges est calculée pour chaque diamètre de particules étudié, selon la loi de distribution de Fuchs (Adachi *et al.*, 1985).

Pour calculer l'efficacité, un ensemble de particules de même diamètre est distribué de manière homogène spatialement. Une charge est attribuée à chaque particule suivant la distribution préalablement calculée. Les temps de sédimentation et de passage sont ensuite calculés pour chaque particule. Une particule est supposée collectée si son temps de passage est supérieur à son temps de sédimentation, c'est-à-dire si son nombre de Deutsch (D) est supérieur à 1. Cet algorithme est réitéré pour l'ensemble des diamètres simulés. Les expressions des temps de passage (τ) et de sédimentation (t_s) et du nombre de Deutsch sont les suivantes :

$$\tau = \frac{L}{u}, \quad t_s = \frac{y}{w}, \quad D = \frac{\tau}{t_s}$$

où L est la longueur du collecteur, u la vitesse de l'air, y la coordonnée verticale du point d'injection d'une particule simulée.

On notera que, structurellement, le modèle permet :

1. de décrire l'efficacité de l'ESP dans la zone de charge partielle comme étant strictement égale au pourcentage de particules ayant au moins une charge, hypothèse largement admise dans la littérature ;
2. d'identifier une solution analytique simple pour la détermination de la limite de la zone de charge partielle : elle correspond au diamètre de la particule injectée en ℓ possédant une charge unitaire et pour laquelle le nombre de Deutsch est égal à 1.

2.2. Données expérimentales pour validation du modèle

Deux séries de données ont été utilisées pour valider le modèle. Elles proviennent d'électrofiltres à deux étages (ioniseurs à aiguilles et collecteur de type plaque-plaque), soumis à différentes tensions au ioniseur et au collecteur, à diverses vitesses d'air, et ayant des géométries différentes (longueur du collecteur). Les descriptions détaillées de ces dispositifs pourront être trouvées dans les travaux de Chen *et al.* (2020) et de Andrade *et al.* (2025).

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1. Simulation des efficacités de l'électrofiltre

La figure 2 présente un exemple de résultats obtenus. Le modèle proposé permet bien de représenter qualitativement l'ensemble des comportements attendus, notamment la baisse d'efficacité de collecte pour les particules ultrafines. On peut également constater qu'avec la diminution de la vitesse de l'air, l'efficacité de collecte dans la zone de charge partielle augmente, ce qui est cohérent avec la meilleure charge des particules associée à un temps de contact particules – ions supérieur. L'ensemble des comportements classiquement rencontrés est également bien décrit (figure 1 et Andrade *et al.*, 2025) : les efficacités de collecte pour les particules ayant un diamètre supérieur à celui délimitant le régime de charge partielle augmentent avec l'augmentation de la tension et de la longueur du collecteur et avec l'augmentation du temps de séjour (diminution du débit d'air). D'un point de vue quantitatif, il est à noter que l'obtention de résultats satisfaisants a nécessité l'adaptation du nombre de Cunningham. En effet, en utilisant les coefficients classiquement retenus (coefficients de Davies, Li et Wang, 2003), les efficacités de collecte, et donc les vitesses, étaient sensiblement surestimées. Ce point est discuté ci-après.

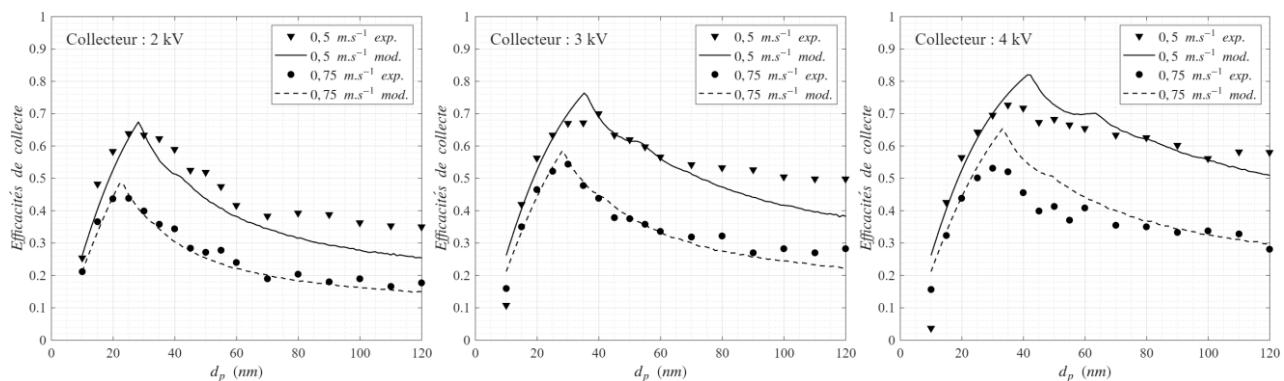


Figure 2. Efficacités de collecte expérimentales et modélisées pour 2 vitesses d'air et 3 tensions au collecteur.

Le second résultat original est que le modèle permet de décrire la variation du diamètre délimitant la zone de charge partielle. Ce diamètre augmente avec l'augmentation de l'efficacité du collecteur. La figure 3 permet de discuter de la précision de l'estimation de ce diamètre limite à l'aide de l'expression analytique énoncée précédemment, à savoir un nombre de Deutsch égal à 1.

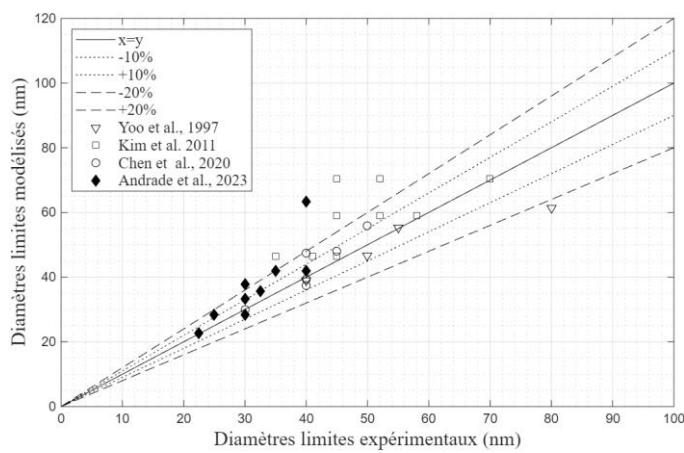


Figure 3. Comparaison des diamètres limites expérimentaux et modélisés.

La zone de charge partielle identifiée, le calcul des efficacités de collecte dans cette zone se réduit alors au calcul du pourcentage de particules non chargées. En reprenant le modèle de charge de Fuchs, dans l'hypothèse où le nombre d'ions est très supérieur aux nombres de particules, cela revient à résoudre une unique équation différentielle du premier ordre, équation ayant une solution analytique simple.

3.2. Vitesses de migration

La principale limite de cette étude réside dans la nécessité d'adapter les coefficients du nombre de Cunningham pour l'obtention de résultats quantitativement satisfaisants. La difficulté pour définir une loi de vitesse pertinente peut dans un premier temps être expliquée par les propriétés des particules décrites : pour cette gamme de diamètres dans l'air à pression atmosphérique, le transport des particules est associé à la zone transitoire entre description en milieu continu et discontinu ($0,1 < \mathcal{K}n < 10$, Yoo et al., 1997, comme le montre la figure 4). La description en milieu continu surestime les vitesses de sédimentation. Bien qu'inférieures et plus proches des vitesses identifiées, les vitesses calculées par les relations décrivant le milieu comme discontinu (Madler et al., 2007 ; Potekaev et al., 2011) ne permettent pas une description satisfaisante de la collecte des particules ayant un diamètre supérieur au diamètre limite de la zone de charge partielle. Aucune modification de ces lois n'a permis d'obtenir des résultats quantitativement satisfaisants.

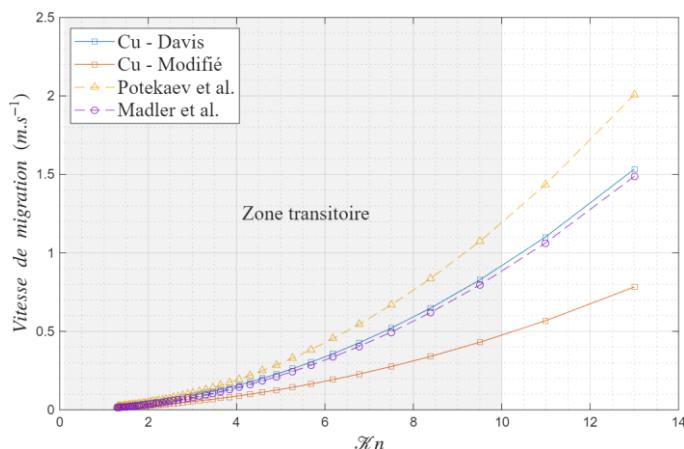


Figure 4. Comparaison des vitesses de migration modélisées pour des particules ayant une charge unitaire et soumises à un champ électrique de $7,4.10^5 \text{ V.m}^{-1}$.

Il est cependant intéressant qu'une même correction ait permis la description de différents résultats expérimentaux effectués avec des dispositifs et dans des conditions opératoires différentes. Cela peut sous-entendre qu'un phénomène, diminuant la vitesse apparente de sédimentation, n'aît pas été pris en compte. À ce jour, les deux principales hypothèses sont l'effet de la turbulence et/ou du ré entraînement.

4. CONCLUSIONS

Cette étude a consisté en une adaptation d'un modèle de type Deutsch-Anderson pour la description de la collecte de particules ultrafines dans la zone de charge partielle. La substitution du calcul de charge moyenne par une distribution de charge permet de décrire la diminution des efficacités de collecte dans cette zone et d'estimer sa limite. La détermination des vitesses de sédimentation reste cependant délicate et devra faire l'objet de futurs travaux pour comprendre les possibles impacts des phénomènes de turbulence et de ré entraînement sur les efficacités de collecte.

5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adachi, M. Kousaka, Y., Okuyama, K. (1985) J. Aerosol Sci. 16 (1985) 109–123.
- Andrade, R. G. S. A., Ondarts, M., Golly, B., Chhay, M., Guerra, V. G., and Gonze, E. (2025). Separation and Purification Technology, 379, 134972.
- Chen, L., Gonze, E., Ondarts, M., Outin, J. and Gonthier, Y. (2020) Separation and Purification Technology, 247, 116964.
- Kim, H.-J., Han, B., Kim, Y.-J., Hwang, K.-D., Oh, W.-S., Yoo, S.-Y. and Oda, T. (2011) J. Air Waste Manage. Assoc. 61, 1334–1343.
- Li, Z. and Wang, H. (2003) Application, Phys. Rev. E 68 061207.
- Mädler, L. and Friedlander, S.K. (2007) Aerosol and Air Quality Research, Vol. 7, No. 3, pp. 304-342.
- Potekaev, A.I. and Bubenchikov, M.A. (2011) Russian Physics Journal, Vol. 54.
- Yoo, K.H., Lee, J.S. and Oh, M.D. (1997), Aerosol Sci. Tech. 27.