

OPTIMISATION DE L'EFFICACITÉ DE FILTRATION D'UN PRÉCIPITATEUR ÉLECTROSTATIQUE FIL-CYLINDRE

FARID MILOUA¹, AMAR TILMATINE¹, LUCIAN DĂSCĂLESCU²

Mots clés: Précipitation électrostatique, Méthode des plans d'expériences.

La précipitation électrostatique est un procédé industriel utilisé pour l'élimination efficace des cendres transportées par les fumées et des poussières présentes dans l'air, grâce à des forces électriques agissant sur des particules chargées. Compte tenu de nombreux facteurs physiques en jeu (le débit d'air pollué, la haute tension appliquée aux électrodes et la durée de fonctionnement du filtre) la méthodologie des plans d'expériences s'est avérée le meilleur outil pour la modélisation et l'optimisation de nouvelles applications de ce procédé, comme la détection d'agents biologiques dans l'air ambiant. Les expériences ont été réalisées sur un filtre de laboratoire, alimentée en continue avec des particules d'amidon de 10 μm de diamètre par un générateur d'aérosols. Les données d'un plan d'expérience factoriel composite ont été analysées par un logiciel dédié, permettant d'évaluer les effets des différents facteurs et d'identifier le point de fonctionnement optimal.

1. INTRODUCTION

La précipitation électrostatique est un procédé couramment utilisé pour éliminer les particules polluantes solides (telles que la poussière et les cendres) ou liquides (brouillard d'huile par exemple) contenues dans les gaz rejetés dans l'atmosphère [1, 2]. Vu leur faible consommation d'énergie électrique et leur grande efficacité de filtration (jusqu'à 99,9%), les précipitateurs électrostatiques n'équipent plus que des centrales thermiques ou des cimenteries, mais aussi des salles de machines dans l'industrie du bois ou en métallurgie, des immeubles de bureaux ou d'habitation, des bâtiments d'hôpitaux, etc. [3–6]. Des recherches récentes montrent que ceux-ci sont plus performants que les technologies actuelles de détection des agents biologiques dans l'air ambiant [7], un enjeu majeur dans la lutte contre le bioterrorisme, mais aussi pour la surveillance de la qualité de l'air dans des hôpitaux et entreprises agro-alimentaires.

¹ Laboratoire APELEC – Faculté Sciences de l'ingénieur, Université Djillali Liabès, Sidi Bel Abbès, Algérie ; E-mail : milouaf@yahoo.fr; atilmatine@gmail.com

² Institut PPRIME, UMP 3346 – CNRS – Université de Poitiers, Angoulême, France ; E-mail : lucian.dascalescu@univ-poitiers.fr (corresponding author)

Le système d'électrodes d'un précipitateur électrostatique est constitué d'un cylindre métallique (électrode collectrice), relié à la masse et un fil métallique fin (électrode ionisante) relié à un générateur de haute tension continue (Fig. 1). Le gaz véhiculant les particules à collecter circule dans le champ électrique créé dans l'espace inter-électrodes. Les ions générés par effet couronne autour de l'électrode fil « bombardent » ces particules qui – en fonction de la charge électrique acquise – sont attirées vers l'électrode collectrice [8, 9]. Les particules déposées sur cette électrode sont régulièrement enlevées par battage [10].

Le processus de collecte dépend de nombreux facteurs physiques : le débit d'air, la haute tension appliquée aux électrodes, la durée de fonctionnement, l'agitation électro-fluido-dynamique [6, 11, 12]. La méthode des plans d'expériences, utilisée déjà par Tilmatine [11] et Blejan [13], s'est avérée très efficace dans la modélisation et l'optimisation de ce type de processus. L'objectif de étude présentée dans ce papier a été de valider cette méthode pour le cas de la collecte des particules biologiques, un processus caractérisé par des débits d'air et des concentration de particules relativement faibles.

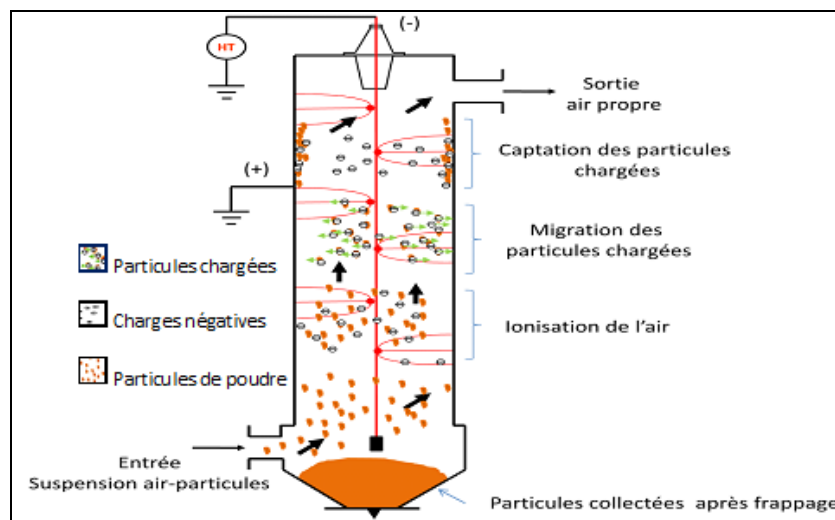


Fig. 1 – Principe de la précipitation électrostatique (modèle cylindrique).

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET MÉTHODE

2.1. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'électrode collectrice du précipitateur électrostatique réalisé au laboratoire est un cylindre de diamètre intérieur 40 mm (longueur : 20 cm). L'électrode

ionisante, un fil en tungstène (diamètre : 0,2 mm), est reliée à une source haute tension ($U_{max}=100$ kV, $I_{max}=3$ mA ; modèle SL 300, Spellman, Hauppauge, NY).

L'alimentation en poudre (amidon de 10 μ m de diamètre) est assurée d'une façon continue et homogène par un générateur d'aérosols (modèle SAG 410, Topas GmbH – Fig. 2). La masse apportée à la buse de dispersion peut être réglée en modifiant la vitesse d'une courroie dentée, segmentée de façon uniforme. La variation du débit d'air à l'entrée du précipitateur s'effectue par la modification de la pression d'éjecteur du générateur d'aérosols. Ce débit est mesuré par un débitmètre à bille de calibre 50 l/min.

Le rendement du précipitateur est calculé en effectuant la mesure de la masse de particules à l'aide d'une balance électronique de précision de 0,01g, avant et après filtration, en utilisant la relation suivante :

$$\eta [\%] = (m_{pc}/m_{pi}) \times 100, \quad (1)$$

où m_{pc} – masse collectée dans la trémie par battage de l'électrode collectrice (masse filtrée) ; m_{pi} – masse totale introduite par refoulement dans le précipitateur.

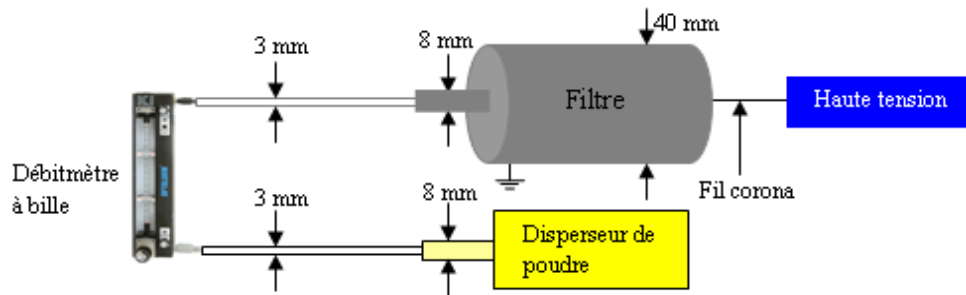


Fig. 2 – Précipitateur électrostatique fil-cylindre avec alimentation continue en poudre.

2.2. MODÉLISATION ET OPTIMISATION DU PROCÉSSUS DE COLLECTE ÉLECTROSTATIQUE PAR LA MÉTHODE DES PLANS D'EXPERIENCES

Les plans d'expériences servent à optimiser l'organisation des essais : obtenir le maximum de renseignements avec le nombre minimum d'essais, dans le but de modéliser et d'optimiser le processus [14–16].

2.2.1. DÉFINITION DES NIVEAUX DES FACTEURS À ÉTUDIER

Les facteurs étudiés sont : la haute tension U , la pression de l'éjecteur du générateur d'aérosols (p), la durée de fonctionnement (t_f) et la masse de poudre (m_p) introduite dans le filtre par le dispersateur pendant la durée t_f . Les intervalles de variation des facteurs ont été choisis suivant les réponses obtenues à partir des essais préliminaires.

Ainsi, l'apparition d'étincelles limite la tension appliquée aux électrodes à 13 kV. Le seuil de la décharge couronne étant à 7,5 kV, l'intervalle d'étude choisi pour la tension a été : $8 \text{ kV} \leq U \leq 13 \text{ kV}$.

Les valeurs minimale et maximale de la pression de l'éjecteur du générateur d'aérosols ont été choisies en rapport avec la classe d'applications visées par l'étude, imposant des débits de l'ordre de 10 l/min et des vitesses de gaz de 0,1 m/s. Pour une intervalle de variation de la pression $2 \text{ bar} \leq P \leq 4 \text{ bar}$, le débit du gaz aspiré (mesuré par le débitmètre à bille) varie de 7 à 11,5 l/min. La vitesse d'écoulement du gaz à l'intérieur du filtre a été calculée avec la formule :

$$V = Q / S_F, \quad (2)$$

où V [m/s] est la vitesse du flux gazeux ; Q [m³/s] est le débit d'aspiration ; S_F [m²] = πr^2 est la section active du filtre, r étant le rayon du cylindre égal 0,02 m. Le domaine de variation de V s'étale de 0,093 à 0,153 m/s (Tableau 1).

Tableau 1

Variation du débit Q et la vitesse d'écoulement V en fonction de la pression P du gaz injecté

P [bar]	Q [l/min]	V [m/s]	P [bar]	Q [l/min]	V [m/s]	P [bar]	Q [l/min]	V [m/s]
1	5	0,066	2	7	0,093	3	9,75	0,13
1,2	5,5	0,073	2,2	7,25	0,096	3,2	10	0,133
1,4	5,75	0,076	2,4	8	0,106	3,4	10,5	0,139
1,6	6,25	0,083	2,6	8,5	0,113	3,6	10,75	0,143
1,8	6,75	0,089	2,8	9	0,119	3,8	11	0,145

Les essais préliminaires ont montré que le rendement de la collecte se dégrade pour des durées de fonctionnement supérieures à 240 s. Des durées inférieures à 60 s ne présentant pas d'intérêt pratique, l'intervalle de variation du temps de fonctionnement a été établie comme suit : $60 \text{ s} \leq t_f \leq 240 \text{ s}$. Le domaine de variation de la masse de particules injectées dans le précipitateur électrostatique, $1 \text{ g} \leq m_p \leq 1,6 \text{ g}$ a été choisi en corrélation avec ce temps de fonctionnement, afin d'assurer des concentrations de particules représentatives de l'application étudiée.

Donc les niveaux maximums et minimums des facteurs choisis sont : $U_{min} = 8 \text{ kV}$, $U_{max} = 13 \text{ kV}$; $p_{min} = 2 \text{ bar}$, $p_{max} = 4 \text{ bar}$; $t_{fmin} = 60 \text{ s}$, $t_{fmax} = 240 \text{ s}$; $m_{pmin} = 1,0 \text{ g}$, $m_{pmax} = 1,6 \text{ g}$. La réponse du processus est le rendement η , calculé avec (1).

2.2.2. ORGANISATION DES ESSAIS

Le plan d'expériences composite à faces centrées CCF permet la modélisation de la réponse η par un polynôme de second degré :

$$\eta = f(x_i) = c_0 + \sum c_i x_i + \sum c_{ij} x_i x_j + \sum c_{ii} x_i^2 ; i = 1 \dots k, \quad (3)$$

où k est le nombre de variables d'entrée x_i (facteurs); c_0 , c_i , et c_{ij} sont les coefficients à déterminer. Le nombre total d'essais n_t à réaliser est donné par $n_t = n_f + n_a + n_0$, avec $n_f = 2^k$, nombre d'essais du plan factoriel complet; $n_a = 2k$, nombre d'essais du plan en étoile; $n_0 = 3$, nombre d'essais au centre du domaine d'étude [14]. Un plan composite à $k = 4$ facteurs comprend donc en tout 27 essais.

Le passage des variables d'origine x aux variables centrées réduites x^* est donné par la formule suivante [14]:

$$x^* = (x - x_c) / \Delta x, \quad (4)$$

où x_c est la valeur centrale en unités courantes et Δx exprime la différence entre la valeur centrale et une extrémité du domaine :

$$x_c = (x_{\max} + x_{\min}) / 2; \Delta x = x_{\max} - x_c. \quad (5)$$

Les valeurs centrales des quatre facteurs: $U_c = (U_{\max} + U_{\min}) / 2 = 10,5$ kV; $p_c = (p_{\max} + p_{\min}) / 2 = 3$ bar; $t_{fc} = (t_{f\max} + t_{f\min}) / 2 = 150$ s; $m_{pc} = (m_{p\max} + m_{p\min}) / 2 = 1,3$ g.

Le modèle mathématique devient alors:

$$\eta = f(x_i^*) = a_0 + \sum a_i x_i^* + \sum a_{ij} x_i^* x_j^* + \sum a_{ii} (x_i^*)^2, \quad (6)$$

où a_0 , a_i , a_{ii} et a_{ij} sont des coefficients calculés avec le logiciel MODDE 5.0, écrit sous Windows [17]. Une fois les valeurs des mesures expérimentales introduites et le traitement par ordinateur effectué, le logiciel assiste l'utilisateur à interpréter les résultats et à prédire les réponses. Il calcule les coefficients du modèle mathématique, trace les surfaces de réponse (les courbes iso-critères) et identifie les meilleures valeurs des variables pour optimiser le processus.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats des 27 essais du plan d'expériences factoriel composite sont présentés dans le tableau 2.

3.1. MODÈLE MATHÉMATIQUE

Le modèle mathématique proposé par MODDE 5.0 à partir de l'analyse des données expérimentales exprime la réponse η en fonction des variables centrées réduites U^* , p^* , m_p^* , t_f^* :

$$\eta = 66,14 + 16,71U^* - 11,84p^* + 0,53t_f^* - 2,69m_p^* - 2,65p^*t_f^* - 1,36U^*p^* - 4,61U^*t_f^*. \quad (7)$$

La qualité du modèle mathématique postulé peut être évaluée par les tests statistiques qui permettent de juger sa fiabilité statistique (R^2) et son pouvoir de

prédiction (Q^2) [14–16]. Un bon modèle mathématique doit avoir des critères R^2 et Q^2 dont la valeur numérique soit proche de l'unité. Les valeurs de ces critères estimées avec le modèle postulé sont respectivement $R^2 = 0,988$ et $Q^2 = 0,967$. Tous les coefficients du modèle (qui expriment les effets des facteurs) sont significatifs, sauf celui correspondant à la durée de fonctionnement (test de Student).

Tableau 2

Résultats de la matrice d'expérience du plan CCF

Essai N°	Tension U [kV]	Masse m_p [g]	Pression P [bar]	Durée t_f [s]	Rendement η (%)
1	8	1	2	60	54,00
2	8	1,6	2	60	51,25
3	13	1	2	60	100,00
4	13	1,6	2	60	96,25
5	8	1	4	60	43,00
6	8	1,6	4	60	31,25
7	13	1	4	60	80,00
8	13	1,6	4	60	73,75
9	8	1	2	240	70,00
10	8	1,6	2	240	62,5
11	13	1	2	240	96,00
12	13	1,6	2	240	90,00
13	8	1	4	240	44,00
14	8	1,6	4	240	35,63
15	13	1	4	240	59,77
16	13	1,6	4	240	63,13
17	10,5	1	3	150	68,89
18	10,5	1,6	3	150	63,45
19	8	1,3	3	150	49,44
20	13	1,3	3	150	82,85
21	10,5	1,3	2	150	77,98
22	10,5	1,3	4	150	54,30
23	10,5	1,3	3	60	66,67
24	10,5	1,3	3	240	65,61
25	10,5	1,3	3	150	66,92
26	10,5	1,3	3	150	69,23
27	10,5	1,3	3	150	70,00

L'augmentation de la tension entraîne une amélioration du rendement (Fig. 3a). De la même façon, les figures 3.b, 3.c et 3.d illustrent les effets des trois autres facteurs : la diminution du rendement avec la pression de l'air p et la masse de particules m_p à collecter, ainsi qu'une légère détérioration des performances avec le temps t_f .

Le logiciel MODDE 5.0 donne aussi la possibilité de calculer les valeurs des facteurs qui maximisent le rendement. Ainsi, le point optimal de fonctionnement, prédit par le modèle $\eta = 99.9\%$ est obtenu avec les valeurs suivantes : $U_{opt} = 13$ kV, $m_{p-opt} = 1$ g, $p_{opt} = 2$ bar et $t_{f-opt} = 60$ s. L'expérience réalisée dans ce point (3^{ème} ligne du Tableau 2) valide le modèle.

Remarque importante. La valeur de 100% obtenue expérimentalement est due aux limites de précision des techniques de mesures utilisées ; l'amélioration de celles-ci devrait permettre des meilleures estimations.

3.2. DISCUSSION

L'effet de la tension (Fig. 3a) est justifié par l'intensification du champ électrique et l'augmentation de la charge électrique acquise par effet couronne. La force Coulomb qui s'exerce sur les particules augmente et la collecte devient plus efficace. Les valeurs négatives des coefficients des termes $U^*.p^*$ et $U^*.t_f^*$ indiquent le fait que l'effet de la tension est plus important à des valeurs réduites de la pression et de la durée de fonctionnement.

La pression d'éjection influe négativement sur l'efficacité de filtration (Fig. 3b) ; l'augmentation de la force d'entraînement de la poudre modifie les trajectoires des particules, les empêchant de s'approcher de l'électrode collectrice. Même si l'effet de la durée de fonctionnement n'est pas statistiquement significatif (Fig. 3c), un mauvais choix du cycle de frappe risque de diminuer le rendement, par l'accumulation des particules sur la surface de l'électrode collectrice [10].

Plus la masse des particules présentes dans le précipitateur augmente, plus le rendement diminue (Fig. 3d), car la poudre recouvre rapidement la paroi du filtre et fait diminuer l'efficacité de la collecte. La diminution de la quantité de poudre admise dans le précipitateur pendant une durée donnée réduit aussi la concentration des particules, améliorant les conditions de charge et de collecte de celle-ci.

La modélisation par des surfaces de réponses calculées par le logiciel MODDE 5 à partir des données expérimentales permet une interprétation facile des effets des facteurs. La figure 4 montre l'influence de la tension et de la pression sur le rendement représenté par des courbes iso-critères. Ainsi, le rendement varie de 80 % à 90 % lorsque la pression reste comprise entre 2 et 3,1 bars et la tension variant entre 10,75 et 12,17 kV. Dans le cas particulier du dispositif de laboratoire utilisé et de la poudre d'amidon qui a fait l'objet de cette étude, le point optimal se trouve dans l'une des extrémités du domaine.

Pour d'autres matériaux pulvérulents biologiques ou pour des configurations d'électrodes différentes, la valeur optimale ne sera pas forcément dans un tel point particulier. Le rendement dépend d'une façon non-linéaire des variables de contrôle et le maximum pourrait être atteint dans un point à l'intérieur du domaine de variation de celles-ci, d'où l'intérêt d'un modèle capable de calculer l'optimum.

4. CONCLUSIONS

La précipitation électrostatique est un processus multifactoriel, dont le fonctionnement est la résultante de l'interaction de phénomènes physiques divers. Les vitesses du gaz pour des dispositifs de laboratoire sont généralement faibles, mais les résultats trouvés montrent des variations significatives du rendement.

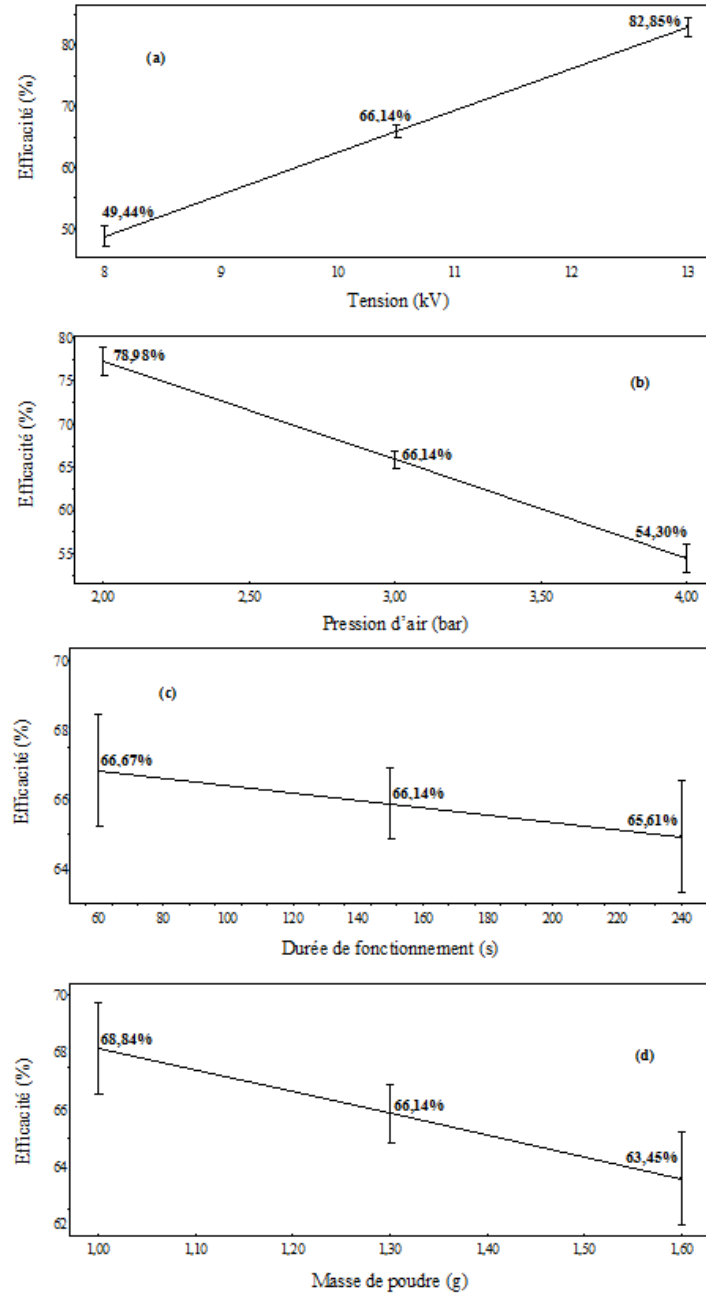


Fig. 3 – Effets des facteurs sur l'efficacité de la filtration [%] : a) tension [kV]; b) pression d'air [bar]; c) durée de fonctionnement [s]; d) masse de la poudre [g].

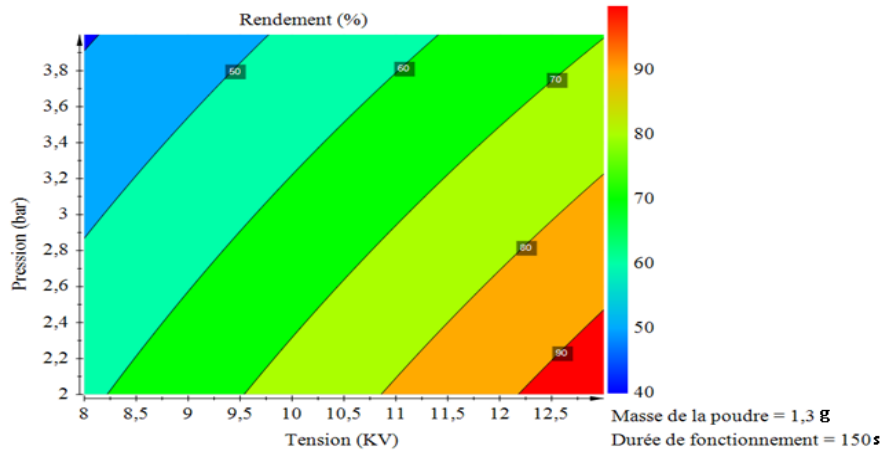


Fig. 4 – Courbe iso-critères du rendement en fonction de la tension et de la pression.

La méthode des plans d'expériences facilite l'évaluation des effets des facteurs, la modélisation du processus et la prédiction du comportement de celui-ci dans un contexte d'utilisation industrielle. Le point de fonctionnement optimal prédit par calcul coïncide avec la meilleure valeur trouvée expérimentalement. Dans d'autres cas la valeur optimale ne sera pas forcément dans un tel point particulier, d'où l'intérêt de disposer d'un modèle capable de la prédire.

Il serait intéressant d'approfondir l'étude des interactions qui existent entre les différents facteurs. L'utilisation d'un dispositif expérimental plus versatile pourrait certainement apporter des éclaircissements intéressants concernant ces interactions, notamment celles entre les facteurs électriques et aérodynamiques.

Reçu le 29 Août, 2013

REFERENCES

1. S.A. Hoenig, *New application of electrostatic technology to control of dust, fumes, smokes and aerosols*, IEEE Trans. Ind. Appl., **17**, pp. 386–391 (1981).
2. H.J. White, *Industrial Electrostatic Precipitation*, Addition-Wesley, Reading, MA, 1963.
3. K.R. Parker, *Applied Electrostatic Precipitation*. Kluwer Academic Publishers, London, 1997.
4. A. Zukeran, P.C. Looy, A. Chakrabarti, A.A. Berizin, S. Jayaram, J.D. Cross, T. Ito, J.S. Chang, *Collection efficiency of ultra fine particles by an electrostatic precipitator under DC and pulse operating modes*, IEEE Trans. Ind. Appl., **35**, pp. 1184–91 (1999).
5. A. Mizuno, *Electrostatic precipitation*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., **7**, pp. 615–24 (2000).
6. A. Jaworek, A. Krupa, T. Czech, *Modern electrostatic devices and methods for exhaust gas cleaning: A brief review*, J. Electrostat., **65**, 133–55 (2007).
7. Q. Lancereau, *Modélisation d'un collecteur électrostatique compact en régime laminaire pour la capture de bio-particules submicroniques aéroportées*, Thèse de doctorat, U. Grenoble, 2012.

8. M. Pauthenier, M. Moreau-Hanot, *La charge des particules sphériques dans un champ ionisé*, Journal of Physics, **3**, pp. 590–613 (1932).
9. T. Takahashi, A. Zukeran Y. Ehara, T. Ito, T. Takamatu, *Influence of re-entrainment phenomena on particle deposit in electrostatic precipitator*, Trans. IEE Japan, **119-A**, pp. 254–260 (1999).
10. F. Miloua, R. Gouri, A. Tilmatine, N. Kadous, L. Dascalescu, *Optimization of the rapping process of an intermittent electrostatic precipitator*, European Physical Journal of Applied Physics, **41**, 1, pp. 81–85 (2008).
11. A. Tilmatine, F. Miloua, N. Kadous, K. Medles, L. Dascalescu, *Experimental modelling of electrostatic precipitation using Tagushi's methodology*, Proc. ESA/IEEE-IAS/IEJ/SFE Joint Conf. on Electrostatics, Berkeley, California, 6-9 June 2006, pp. 855–862.
12. P. Atten, *Collection of submicron particles in electrostatic precipitators: influence of ehd agitation and of particles disintegration*, Revue Roumaine des Sciences et Techniques – série Electrotechnique et Energétique, **55**, 2, pp. 161–170, 2010.
13. O. Blejan, *Contribution à l'amélioration du rendement des filtres électrostatiques*, Thèse de doctorat, Université de Poitiers et Université «Politehnica» de Bucarest, le 20 novembre 2009.
14. J. Goupy, *Modélisation par les plans d'expériences. Technique de l'ingénieur. Traité mesure et contrôle*, R 275-1, Editions T.I., Paris, 2000.
15. S. Vivier, *Stratégies d'optimisation par la méthode des plans d'expériences et application aux dispositifs électrotechniques modélisés par éléments finis*, Thèse de doctorat, U. Lille, 2002.
16. J. Goupy, *Plans d'expériences pour surfaces de réponse*, Dunod, Paris, 1999.
17. * * *, MODDE.05, "User guide and tutorial", Umetrics, Umea (Sweden), 1999.

OPTIMISATION OF FILTRATION EFFICIENCY OF A WIRE-CYLINDER ELECTROSTATIC PRECIPITATOR

FARID MILOUA, AMAR TILMATINE, LUCIAN DĂSCĂLESCU

Key words : Electrostatic precipitation, Experimental design methodology.

Electrostatic precipitation is an industrial process used for the efficient removal of ashes in flue gases and of dust in air-conditioning systems, thanks to the electric forces acting on charged particulates. Given the many physical factors involved (polluted fluid flow-rate, high-voltage applied to the electrodes, duration of operation), the experimental design methodology has proved to be the best tool for process modelling and optimisation. The experiments were performed on a laboratory precipitator, continuously fed with starch particles 10 µm in diameter by an aerosols generator. Data from a composite factorial experiment have been analyzed by a dedicated software to assess the effects of the different factors and identify the optimum operating conditions.