

Physique/Physique appliquée

Étude des performances d'une tour à pulvérisation pour le dépolluage de gaz

Abderrahim Bouziani^a, Mostafa Maalmi^{b,*}, Mohamed Tahiri^a

^a Département génie des procédés, École Mohammadia d'ingénieurs, avenue Ibn Sina, BP 765, Agdal, Rabat, Maroc

^b Département génie des procédés industriels, École nationale de l'industrie minérale, rue Abderrahman El Ghafiki, Agdal, Rabat, Maroc

Reçu le 9 juin 2005 ; accepté après révision le 13 février 2006

Disponible sur Internet le 29 mars 2006

Présenté par Jacques Villain

Résumé

Le présent travail consiste à évaluer les performances d'une tour à pulvérisation destinée au dépolluage d'un effluent gazeux émanant d'une installation industrielle de séchage de particules solides. Un modèle d'écoulement a été utilisé pour décrire les phénomènes de capture solides par un liquide en tenant compte des impacts inertiels et par interception. Le modèle a été testé par comparaison aux résultats expérimentaux obtenus lors d'essais effectués sur une tour pilote du site industriel. Cette étude prédit une réduction de 90% des poussières dans les gaz. **Pour citer cet article :** A. Bouziani et al., C. R. Physique 7 (2006).

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Study of a wet scrubber performance for gas effluent dust elimination. The present study deals with the assessment of the performance of a wet scrubber proposed for dust elimination from a gas effluent from a solid drying plant. For this purpose a mathematical model was used to describe the impingement process of solid particles by a liquid, based on the main phenomena of inertial and interception impacts. The model was validated with experimental data obtained on a pilot scrubber on the industrial site. The results of this study showed that dust elimination can be improved by up to 90%. **To cite this article :** A. Bouziani et al., C. R. Physique 7 (2006).

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Dépolluage des gaz ; Tour à pulvérisation ; Capture de particules ; Impact inertiel ; Mécanisme d'interception

Keywords : Dust removal from a gas; Spray tower; Particles impingement; Inertial impaction; Interception

1. Introduction

Le traitement des effluents gazeux des unités industrielles est important à cause des risques à grande échelle qu'une pollution de l'air peut présenter pour la santé. Une source majeure de pollution atmosphérique est constituée par

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : maalmi@enim.ac.ma (M. Maalmi).

Nomenclature

c	Coefficient correctif de Cunningham	(\bar{x}, \bar{y})	Coordonnées adimensionnelles de la position des particules
C_p	Concentration de la poussière évacuée à la cheminé g/Nm ³	(\bar{x}_0, \bar{y}_0)	Coordonnées adimensionnelles initiales de la position des particules
D_G	Diamètre des gouttelettes mm	y_{lim}	Ordonnée initiale de la trajectoire critique des particules
d_p	Diamètre des particules μm	<i>Symboles grecs</i>	
g	Accélération de la pesanteur m/s ²	Φ	Fonction potentielle de vitesse
Q_G	Débit volumique du gaz m ³ /h	η_c	Rendement d'interception
Q_L	Débit volumique d'eau d'arrosage m ³ /h	η_I	Rendement d'impact inertiel
R	Paramètre d'interception	η_{IC}	Rendement de collection des particules par une seul gouttelette
r	Composante radiale	η_T	Rendement global théorique de la tour à pulvérisation
t	Temps s	μ_G	Viscosité dynamique du gaz kg/m s
\bar{t}	Temps adimensionnel	μ_e	Viscosité dynamique de l'eau kg/m s
U	Vitesse des gouttes à la sortie du pulvérisateur m/s	θ	Composante angulaire
V_o	Vitesse des particules loin de la gouttelette	ρ_e	Masse volumique de l'eau kg/m ³
V_d	La vitesse limite des gouttelettes m/s	ρ_G	Masse volumique du gaz kg/m ³
V_G	La vitesse initiale des gaz à l'entrée de l'installation pilote m/s	ρ_p	Masse volumique des particules kg/m ³
v_x	La vitesse du gaz suivant la direction X m/s	σ_e	Tension superficielle de l'eau mN/m
v_y	La vitesse du gaz suivant la direction Y m/s	ψ	Paramètre d'impact inertiel
(\bar{v}_x, \bar{v}_y)	Composantes adimensionnelles de la vitesse du gaz	2ψ	Nombre de Stokes
(x, y)	Coordonnées de la position des particules m		

les particules en suspension émanant d'installations industrielles. Les normes environnementales, de plus en plus contraignantes, requièrent des méthodes de traitement adaptées. Parmi ces techniques, les tours à pulvérisation sont particulièrement indiquées pour éliminer des particules ayant des diamètres supérieurs à 10 μm [1]. Ces appareils ont également l'avantage de leur technologie simple et de leur faible coût d'investissement.

Les mécanismes mis en jeu dans les tours à pulvérisation, sont dûs essentiellement à la capture des particules solides par les gouttelettes du liquide de lavage, qui est le plus souvent de l'eau. Généralement, les particules de diamètre supérieur à 10 μm sont capturées par impact inertiel et par interception [2]. L'élucidation de ces deux phénomènes de base a fait l'objet de nombreuses recherches dans le cas des collecteurs sphériques (par exemple les gouttelettes liquides) [3–7]. Le mécanisme d'impact inertiel a également fait l'objet d'investigations expérimentales [7–9].

Les études consacrées aux tours à pulvérisation [10,11] ont surtout porté sur la modélisation et ne comportent pas de validation expérimentale.

Le présent travail porte sur l'étude de la faisabilité de l'utilisation d'une tour à pulvérisation pilote pour le dé-poussiérage des gaz provenant de fours sécheurs de phosphates. On souhaite réduire la teneur en poussières à environ 200 mg/Nm³. Le système de dé-poussiérage actuel, une batterie de cyclones, ne permet pas de répondre à ces exigences.

2. Modélisation des phénomènes de capture de particules solides par un liquide

Dans la présente étude, les hypothèses simplificatrices ci-dessous sont faites :

- Les particules solides et les gouttelettes sont supposées de forme sphérique.

- Les effets de la température et de la pression sont négligeables car (i) le phénomène de lavage ne s'accompagne pas d'effets calorifiques, et (ii) la perte de charge dans la tour à pulvérisation est négligée.
- L'écoulement du gaz est bidimensionnel, stationnaire, et en régime de Stokes au voisinage des gouttelettes.
- Les forces électrostatiques, le poids des particules et la poussée d'Archimède sont négligeables.
- Vu le débit d'eau pulvérisée et vu que le diamètre des gouttelettes est beaucoup plus important que la dimension des particules solides, seules les interactions particules-gouttelettes sont prises en considération.
- La rétroaction des particules sur l'écoulement du gaz est négligeable.

2.1. Capture par impact inertiel

La capture d'une particule par impact inertiel dépend uniquement de la masse de la particule et non de sa taille. On assimile donc chaque particule à un point matériel où se concentre toute la masse. Dans un courant gazeux, au sein duquel sont introduits des corps collecteurs (gouttelettes), les particules solides suivent les lignes de courant du gaz jusqu'à ce que ces dernières divergent autour des collecteurs. Les particules possédant une inertie suffisante vont continuer leurs trajets vers le collecteur et quitteront ainsi les lignes de courant du gaz comme indiqué dans la Fig. 1.

Le mécanisme d'impact inertiel est généralement quantifié par le nombre de Stokes, défini comme le rapport entre le temps d'arrêt de la particule et le temps de séjour de l'écoulement aux bords du collecteur. Parmi les lignes du courant, il y a lieu de distinguer celle située à l'ordonnée y_{lim} (ordonnée initiale de la trajectoire critique des particules) et à partir de laquelle la trajectoire des particules, après avoir quitté les lignes de courant, serait tangente au collecteur.

2.1.1. Equations du modèle

En appliquant la loi de Stokes aux particules qui sont soumises uniquement à la force de résistance, l'équation de bilan décrivant les mouvements des particules en coordonnées cartésiennes, en terme de variables adimensionnelles, est [7] :

$$2\psi \frac{d^2 \bar{x}}{d\bar{t}^2} + \frac{d\bar{x}}{d\bar{t}} - \bar{v}_x = 0 \quad (1)$$

$$2\psi \frac{d^2 \bar{y}}{d\bar{t}^2} + \frac{d\bar{y}}{d\bar{t}} - \bar{v}_y = 0 \quad (2)$$

avec :

$$\psi = \frac{c\rho_p d_p^2 V_o}{18\mu_G D_d} \quad (3)$$

Et

$$\bar{x} = \frac{2x}{D_d}; \quad \bar{y} = \frac{2y}{D_d}; \quad \bar{v}_x = \frac{v_x}{V_o}; \quad \bar{v}_y = \frac{v_y}{V_o}; \quad \bar{t} = \frac{2V_o t}{D_d} \quad (4)$$

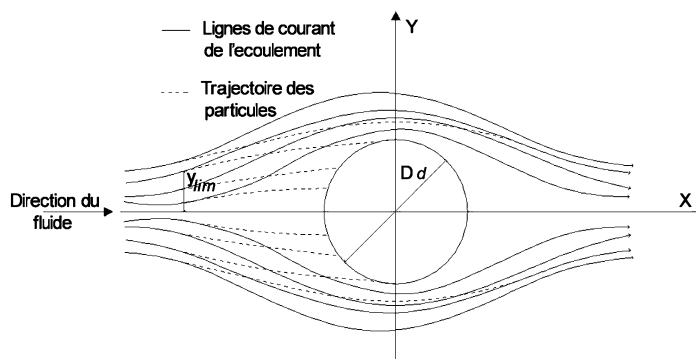


Fig. 1. Impact des poussières par inertie sur une goutte d'eau.

Fig. 1. Capture of particles by Inertial Impaction on water droplet.

Le rendement d'abattement par impact inertiel η_I , est défini comme étant la fraction des particules captées parmi celles se trouvant dans un cylindre de diamètre D_d . Étant donné que seules les particules se trouvant dans un cylindre de rayon y_{lim} seront captées, le rendement d'abattement par inertie est alors égal au rapport de la surface d'un disque de diamètre $2 y_{\text{lim}}$ à la surface d'un disque de diamètre D_d , soit alors :

$$\eta_I = \left(\frac{y_{\text{lim}}}{D_d/2} \right)^2 \quad \text{soit} \quad \eta_I = \bar{y}_{\text{lim}}^2 \quad (5)$$

Pour calculer ce rendement il faut déterminer la valeur de y_{lim} en fonction du paramètre inertiel ψ . Ainsi, le problème est ramené à la recherche, parmi l'infinité des conditions initiales possibles ($\bar{y}_0 = \bar{y}_{\text{lim}}$) de \bar{y} qui permettent la résolution des équations de bilan (Éqs. (1) et (2)), celle qui permettrait le captage, par impact inertiel, de la particule solide par la gouttelette. Autrement dit, on cherche à trouver la position initiale limite dont la trajectoire n'a pas été encore été modifiée par le collecteur (gouttelette), et qui permettrait de capter la particule.

L'équation de la trajectoire est obtenue à partir de la résolution du système d'équations (1) et (2). Pour effectuer cette résolution on admet que l'écoulement est potentiel. Les composantes v_x et v_y de la vitesse du gaz sont alors obtenues à partir de la fonction potentiel des vitesses Φ .

Au voisinage de la gouttelette, Φ s'exprime en coordonnées sphériques par la relation :

$$\Phi = v_o \cos \theta \left(r + \frac{(D_d/2)^3}{2r^2} \right) \quad (6)$$

Les conditions initiales et aux limites sont :

$$\bar{x} = -2; \quad \bar{v}_x = 1; \quad \bar{y} = \bar{y}_{\text{lim}} \in [0, 1] \quad \text{et} \quad \bar{v}_y = 0 \quad \text{pour} \quad \bar{t} = 0 \quad (7a)$$

$$\bar{y} = 1 \quad \text{pour} \quad \bar{x} = 0 \quad (7b)$$

La résolution du système d'équations différentielles ainsi obtenu est effectuée par la méthode de Runge–Kutta d'ordre 4 en utilisant la technique des tirs à partir d'une estimation initiale de \bar{y}_{lim} en imposant la condition (7b).

2.1.2. Résultats du modèle

Le rendement d'abattement par impact inertiel obtenu pour différentes valeurs de ψ sont reportés sur la Fig. 2. L'examen de cette figure montre que nos prédictions concordent relativement bien avec les données expérimentales reportées par Dullien [11]. La différence entre les prédictions du modèle et les données expérimentales s'explique par le fait que seul l'écoulement potentiel est pris en compte et non l'écoulement visqueux.

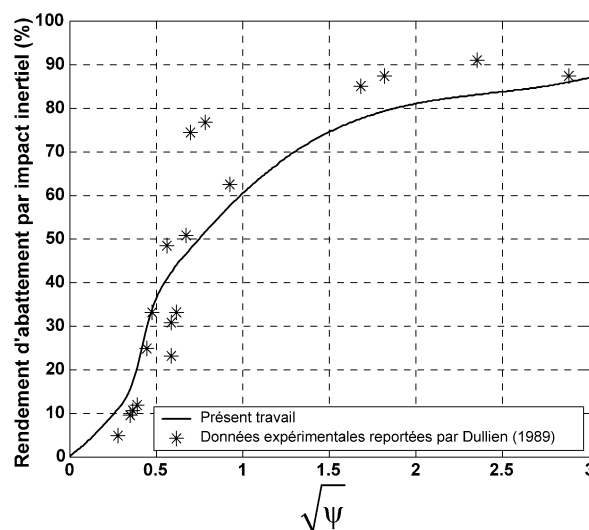


Fig. 2. Variation du rendement d'abattement par impact inertiel en fonction de $\sqrt{\psi}$.

Fig. 2. Efficiency of Inertial Impaction as a function of Stokes number.

2.2. Capture par interception

Le mécanisme de collecte des particules solides par interception tient compte uniquement de la taille des particules et ignore leur inertie [12]. Selon ce mécanisme, les particules suivront exactement les lignes de courant du gaz. Les particules collectées (de diamètre d_p) sont celles dont les centres situés sur des lignes de courant et dont la distance au collecteur est égale à $d_p/2$.

L'interception est caractérisée par le paramètre R , qui est défini comme étant le rapport du diamètre de la particule d_p au diamètre du collecteur D_d .

Le rendement d'impact par interception est défini par la relation suivante [7] :

$$\eta_c = (1 + R)^2 - \frac{1}{1 + R} \quad (8)$$

3. Etude du rendement global d'abattement dans l'installation pilote

3.1. Calcul du rendement

Le rendement global d'abattement d'une tour η_T est exprimé par la relation suivante [10,11] :

$$\eta_T = 1 - \exp\left(-\frac{3}{2} \frac{\eta_{IC} v_d Q_L H}{D_d Q_G (v_d - v_G)}\right) \quad (9)$$

Le rendement de collection (par inertie et interception) pour une seule gouttelette d'eau sphérique η_{IC} est calculé, en considérant les mécanismes d'impact inertiel et d'interception comme statistiquement indépendantes, par :

$$\eta_{IC} = 1 - (1 - \eta_I)(1 - \eta_c) \quad (10)$$

L'objectif de ce qui suit est de comparer les résultats de ce modèle aux résultats obtenus lors des essais effectués sur la tour pilote à pulvérisation.

3.2. Spécifications techniques de l'installation pilote

Les données expérimentales obtenues dans le cadre du présent travail ont été collectées sur une tour à pulvérisation pilote installée sur le site industriel et dont les caractéristiques sont : la hauteur de la zone de pulvérisation : $H = 5$ m ; la hauteur totale de la tour $H_T = 9$ m ; les buses sont de type normal et elles sont dirigées vers le bas.

3.3. Procédure expérimentale

Le débit de gaz à traiter est maintenu constant à une valeur de 13 000 m³/h. La concentration C_p en particules solides est de l'ordre de 2 g/Nm³. Par ailleurs différents débits d'eau d'arrosage entre 0 et 22 m³/h ont été utilisés. Pour chaque essai, les concentrations de poussières (déterminée à l'aide d'une sonde isocinétique) ont été mesurées au niveau du point de prélèvement de la tour pilote qui se situe à 1,6 m de la sortie des gaz lavés.

3.4. Résultats expérimentaux

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 1. L'incertitude sur les valeurs du rendement d'abattement global de la tour à pulvérisation est de l'ordre 3%.

Le Tableau 1, montre que la concentration de poussières dans les gaz traités diminue quand le débit d'eau d'arrosage augmente. Le rendement augmente aussi, mais plafonne à partir d'un seuil de l'ordre de 13 m³/h.

3.5. Validation des prédictions du modèle

Afin de comparer le rendement calculé par le modèle décrit plus haut à celui déterminé expérimentalement, divers paramètres intervenant dans l'Éq. (9), doivent être déterminés.

Tableau 1
 Résultats expérimentaux du rendement d'abattement
 Table 1
 Experimental results for collection efficiency

Débit d'eau de lavage (m ³ /h)	C_p (g/Nm ³)	Rendement (%)
0	2	0
5,5	0,92	54
8	0,72	64
13	0,4	80
17	0,3	85
18	0,26	87
22	0,2	90

Diamètre moyen de la gouttelette d'eau : les diamètres des gouttelettes, considérées comme de taille uniforme est obtenue par la corrélation suivante [13] :

$$D_d = 25,77d_0 \left(\frac{\rho_e U d_0}{9\mu_e} \right)^{-0.48} \left(\frac{\mu_e U}{\sigma_e} \right)^{-0.18} \quad (11)$$

Diamètre des particules : à partir d'une analyse granulométrique des particules (de phosphate) à l'entrée de la tour, le diamètre moyen des particules a été estimé à 20 μm .

Vitesse limite des gouttelettes d'eau pulvérisées dans la tour : la vitesse V_d est déterminée à partir de la formule de Stokes, par la relation :

$$V_d = \frac{gD_d^2(\rho_e - \rho_G)}{18\mu_G} \quad (12)$$

Vitesse des gouttes d'eau à la sortie du pulvérisateur : les pulvérisateurs utilisés comportent 80 gicleurs, la vitesse à la sortie de l'orifice est par conséquent donnée par : $U = 4\pi Q_L/80d_0^2$.

Le rendement global calculé par l'Éq. (9) est reporté, ainsi que les données expérimentales, sur la Fig. 3. L'accord est bon, sauf pour les grands débits où le rendement est surestimé par le modèle. La différence est due au fait que, pour les débits d'arrosage élevés, une partie appréciable de l'eau de lavage est éjectées vers les parois et par conséquent n'est pas utilisée pour la collecte des particules.

En outre, au fur et à mesure que le débit d'arrosage augmente, les gouttelettes deviennent plus fines et engendrent ainsi une augmentation des nombres de Stokes et d'interception, ce qui favorise aussi bien l'impact inertiel que l'interception et améliore donc le rendement.

4. Etude du rendement global de la tour

4.1. Sensibilité paramétrique sur le diamètre des gouttelettes

La Fig. 4 montre l'effet du diamètre D_d des gouttelettes sur le rendement global de la tour. On s'aperçoit qu'une variation de 10% de D_d fait varier le rendement de 2,5% pour les fines gouttelettes et de 10% lorsque les gouttelettes dépassent 0,6 mm. L'influence du diamètre est donc surtout significative pour les grosses gouttelettes.

4.2. Simulation de l'effet du diamètre de l'orifice de pulvérisation sur le rendement

L'effet du diamètre de l'orifice de pulvérisation sur le rendement d'abattement de la tour pour un débit liquide égal à 20 m³/h, et un débit du gaz égal à 13 000 m³/h a été étudié. Il a été trouvé qu'il existe un diamètre optimal, au voisinage de 2,25 mm, pour lequel le rendement de la tour est maximal (99,98%). En effet, quand le diamètre de l'orifice de pulvérisateur augmente, les gouttelettes deviennent plus grosses ; leur nombre devient donc plus faible et le rendement diminue. Par ailleurs pour un diamètre de l'orifice de pulvérisation trop petit, pour un débit d'arrosage donné, les gouttelettes deviennent plus fines et par la suite elles sont entraînées par le flux gazeux, ce qui entraîne une diminution de rendement de la tour.

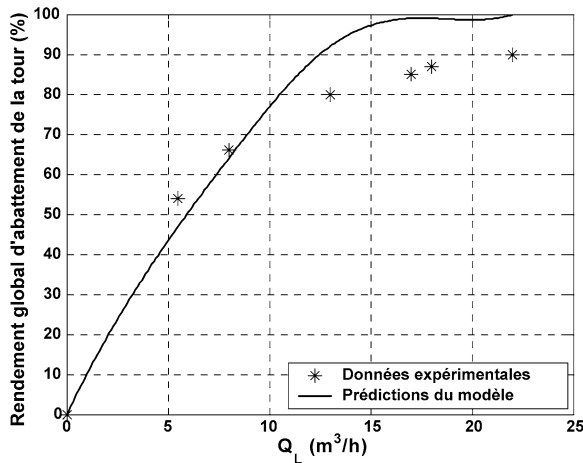


Fig. 3. Variation du rendement global d'abattement de la tour en fonction de Q_L .

Fig. 3. Effect of the flow rate Q_L on the collection efficiency of the spray tower.

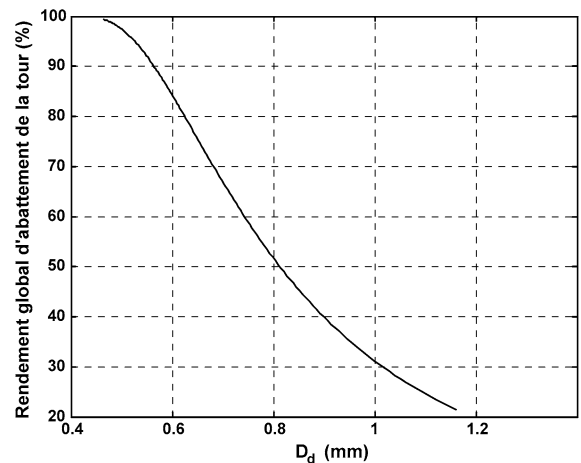


Fig. 4. Effet du diamètre des gouttelettes sur le rendement global de la tour.

Fig. 4. Effect of the water droplet on the collection efficiency of the spray tower.

4.3. Simulation de l'effet de la vitesse du flux gazeux sur le rendement

L'effet de la vitesse du gaz sur le rendement de la tour, pour un débit liquide égal à $20 \text{ m}^3/\text{h}$, a aussi été étudié. On a mis en évidence une vitesse optimale : $v = 3,2 \text{ m/s}$ (99,98%), ce qui peut être expliqué par le fait qu'en augmentant la vitesse, on favorise le mécanisme d'impact inertiel. Ces résultats confirment ceux obtenus expérimentalement par d'autres auteurs [14]. En outre l'augmentation excessive de la vitesse des gaz, pour le même débit de liquide, conduit à la diminution du rendement par entraînement.

5. Conclusion

Le fonctionnement d'une tour de dépolluage humide à pulvérisation a été modélisé en tenant compte des mécanismes de capture par impact inertiel et par interception. Les prédictions du modèle ont été validées en se basant sur des données de la littérature et de données expérimentales obtenues à l'aide d'une tour pilote à pulvérisation. Une simulation des performances d'une tour de dépolluage à pulvérisation, en utilisant le modèle de collection par inertie et interception, a été réalisée. Ce modèle montre que l'augmentation du débit d'arrosage améliore significativement le rendement. A partir d'une certaine valeur du débit d'arrosage cependant, un palier est atteint. Les résultats de la simulation montrent, par ailleurs, l'existence d'un diamètre optimal de l'orifice de pulvérisation.

De manière globale, le présent travail montre qu'une réduction de 90%, du taux de poussières contenu dans les gaz émanant du système actuel de dépolluage des rejets gazeux de séchage du phosphate, constitué d'une batterie de cyclones, peut être obtenue par l'introduction d'une tour de dépolluage par pulvérisation.

Remerciements

Les auteurs remercient les responsables de l'Office Chérifien des Phosphates (OCP) qui leur ont permis de réaliser des essais sur le site industriel de Khouribga-Maroc.

Références

- [1] H.S. Peavy, D.R. Donald, G. Tchobanoglous, Environmental Engineering, second ed., McGraw-Hill Book Co., Singapore, 1985.
- [2] S. Viswanathan, Numerical study of particle collection by single water droplets, Ind. Eng. Chem. Res. 38 (11) (1999) 4433–4442.
- [3] F. Albrecht, Theoretische Untersuchungen über die Ablagerung von Staub aus strömender Luft und ihre Anwendung auf die Theorie der Staubfilter, Phys. Z. 32 (1931) 48–56.
- [4] I. Langmuir, K. Blodgett, Report R.L.225, General Electric Research Laboratory, Schenectady, New York, 1944.

- [5] G. Schuch, F. Löffler, Über die Abscheidewahrscheinlichkeit von Feststoffpartikeln an Tropfen in einer Gasströmung durch Trägheitseffekte, *Verfahrenstechnik* 12 (1978) 302–306.
- [6] D.D. Degani, G.I. Tardos, Inertial deposition of small particles on a sphere at intermediate and high Reynolds numbers: A time dependent study, *J. Air Poll. Control Ass.* 31 (9) (1981) 981–986.
- [7] W.E. Ranz, J.B. Wong, Impaction of dust and smoke particles on surface and body collectors, *Ind. Eng. Chem.* 44 (6) (1952) 1371–1381.
- [8] W.H. Walton, A. Woolcook, The suppression of airborne dust by water spray, *Int. J. Air Poll.* 3 (1960) 129–135.
- [9] J.R. Starr, B.Y. Mason, The capture of airborne particles by water drops and simulated snow crystals, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 92 (1966) 490–499.
- [10] S. Calvert, J. Goldshmid, D. Leith, Scrubber performance for particle collection, *AIChE Symp. Ser.* 70 (137) (1974) 357–364.
- [11] F.A.L. Dullien, *Introduction to Industrial Gas Cleaning*, Academic Press Inc., New York, 1989.
- [12] W. Strauss, *Industrial Gas Cleaning*, second ed., Pergamon Press, Oxford, 1975.
- [13] L. Chaguer, S. Lakhouaja, Contribution à la modélisation et à l'optimisation de fonctionnement de la tour de lavage des gaz issus d'un four sécheur des phosphates, thèse de PFE, ENIM, Rabat, 1998.
- [14] D. Khummongkol, B. Saniam, V. Phimolmas, Removal of dust by impingement of gas on a water surface, *Energy Internat. J.* 17 (11) (1992) 1007–1011.