

# ETUDE EXPERIMENTALE DE L'ABATTAGE HUMIDE COMME PROCEDURE D'ASSAINISSEMENT DE L'AIR

N. Gaudel\*<sup>1</sup>, D. Bemer<sup>1</sup> et F. Gérardin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INRS, 1 rue du Morvan, F-54500, Vandœuvre-lès-Nancy, France

\*Courriel de l'orateur : naima.gaudel@inrs.fr

## TITLE

**Experimental study of aerosol particles scavenging by drops as a process of air depollution**

## RESUME

Les poussières sont fréquemment observées dans les atmosphères de travail, et la prévention des maladies professionnelles dues à l'exposition des salariés à ces particules est un enjeu en termes d'hygiène industrielle. Dans ce travail, l'étude expérimentale d'une situation d'abattage humide a été réalisée. Les résultats mettent en évidence l'influence de nombreux paramètres (diamètre des particules d'aérosol, diamètre des gouttes, vitesse des gouttes, hauteur du spray, etc.) sur l'efficacité de collecte. Ces résultats permettront d'améliorer le dimensionnement de ce procédé en fonction des situations rencontrées.

## ABSTRACT

Dust is frequently observed in work atmospheres, and the prevention of occupational diseases due to employee exposure to these particles is a challenge in terms of industrial hygiene. In this work, an experimental study of aerosol scavenging by drops was carried out. The results highlight the influence of many parameters (aerosol particle diameter, droplet diameter, droplet velocity, spray height, etc.) on collection efficiency. These results will allow improving the sizing of this process according to the situations encountered.

**MOTS-CLES** : abattage humide, aérosol, efficacité de collecte, goutte / **KEYWORDS**: scavenging, aerosol, collection efficiency, droplet

## 1. INTRODUCTION

Les particules en suspension dans l'air (aérosols) peuvent provenir de sources naturelles ou anthropiques. Dans un contexte industriel, leur émission peut advenir lors de nombreux procédés (concassage de minerais, manipulation de produits pulvérulents type encres, démolition de bâtiments, ...). Parmi les solutions permettant d'atténuer les émissions de ces polluants particuliers, on retrouve le procédé d'abattage humide qui consiste à employer une pulvérisation de gouttes d'eau pour capturer les particules dispersées dans l'air. De nombreux travaux sur l'efficacité de collecte résultant de ce procédé ont été réalisés et proposent des modèles empiriques. Ces modèles reposent sur les principaux mécanismes physiques inhérents à la collecte des particules par des gouttes d'eau : impaction inertielle, interception à la surface, interception par diffusion brownienne, captures phorétiques et interactions électrostatiques. Les modèles d'efficacité de collecte ont été obtenus de manière théorique, numérique et expérimentale dans de nombreuses configurations, et pour une large gamme de nombre de Reynolds de goutte ( $Re_g$ ) et de nombre de Stokes particulaire ( $St_p$ ). Ces études ont montré que l'efficacité de collecte ( $E_c$ ) en fonction du diamètre aérodynamique des particules ( $d_{ae}$ ) évolue de la manière suivante :  $E_c$  présente un minimum de  $d_{ae} \approx 0,1$  à  $1 \mu\text{m}$  dénommé « Greenfield gap » (Greenfield, 1957), et deux maxima de part et d'autre correspondant aux particules « browniennes » ( $d_{ae} < 0,1 \mu\text{m}$ ) et « inertielles » ( $d_{ae} > 1 \mu\text{m}$ ). Parmi les précédents travaux, les configurations types rencontrées dans l'industrie sont peu documentées, *i.e.* une pulvérisation de gouttes en contre-courant du flux de l'aérosol avec  $Re_g \approx 100$  et  $St_p \approx 1$ . Dans ces gammes de paramètres, on retrouve principalement des travaux numériques proposant des modèles de capture (Beard, 1974 ; Mohebbi *et al*, 2003 ; Wang *et al*, 2015). Des travaux expérimentaux ont également été réalisés (Calvert *et al*, 1972 ; Wang and Pruppacher, 1977). Ils confirment la tendance des résultats obtenus par les différents modèles disponibles, mais restent limités en termes de reproductibilité et de variation des paramètres. Notre étude fait suite aux travaux de G. Cherrier (Cherrier *et al*, 2017) qui ont permis de développer un modèle prédictif de l'efficacité de collecte des aérosols polluants par abattage humide adapté aux situations de travail.

Le présent objectif est de mettre en œuvre un banc expérimental qui s'approche d'une situation d'abattage humide rencontrée en milieu industriel, tout en maîtrisant les paramètres expérimentaux. L'influence de ces paramètres sur l'efficacité de collecte est étudiée, et les résultats sont comparés à des modèles de type impaction inertielle. Ces expériences ont pour but *in fine* d'orienter les choix des futurs utilisateurs en terme de morphologie et de type de spray à utiliser (cône/section carrée/train de gouttes, spray plein/creux/plat, taille

des gouttes, ...) selon les poussières à abattre (taille et nature des particules, hygrométrie de l'environnement, exposition de salariés, ...).

## 2. MATERIEL ET METHODES

Le banc expérimental utilisé pour réaliser des essais d'abattage humide est présenté sur la Figure 1. Un flux d'air ascendant est généré par aspiration en sortie de banc (1). Le débit d'air est mesuré à l'aide d'un diaphragme situé en entrée de banc (2), après 2,50 m de conduite en amont. Les débits d'air imposés sont dans l'intervalle  $Q_{air} = [68 - 132]$  m<sup>3</sup>/h, correspondant à des vitesses d'air  $v_{air} = [0,15 - 0,30]$  m/s. On suppose que la vitesse de l'air est celle des particules. L'abattage humide a lieu dans la colonne parallélépipédique en plexiglas (3) de section 0,119 m<sup>2</sup> et de hauteur 2,4 m. En entrée de cette colonne (4), trois grilles de diffusion permettent la stabilisation et l'homogénéisation de l'écoulement d'air. Le bas de la colonne est adaptée pour permettre le positionnement de buses de pulvérisations à différentes hauteurs dans la colonne (5), réglable de  $H = 5$  cm à 50 cm (pas de 5 cm). Le spray est orienté selon la verticale vers le bas, sa génération se fait donc en contre-courant du flux d'air. Des systèmes de prélèvement sont disponibles en amont et en aval de la colonne d'abattage (6), placés dans les sections droites. Un siphon (7) permet de récupérer l'eau tout en s'assurant qu'il n'y a pas d'entrée d'air. Une trappe a également été créée afin de permettre le nettoyage/séchage de la colonne (8). Des filtres HEPA sont placés en entrée et en sortie de banc.

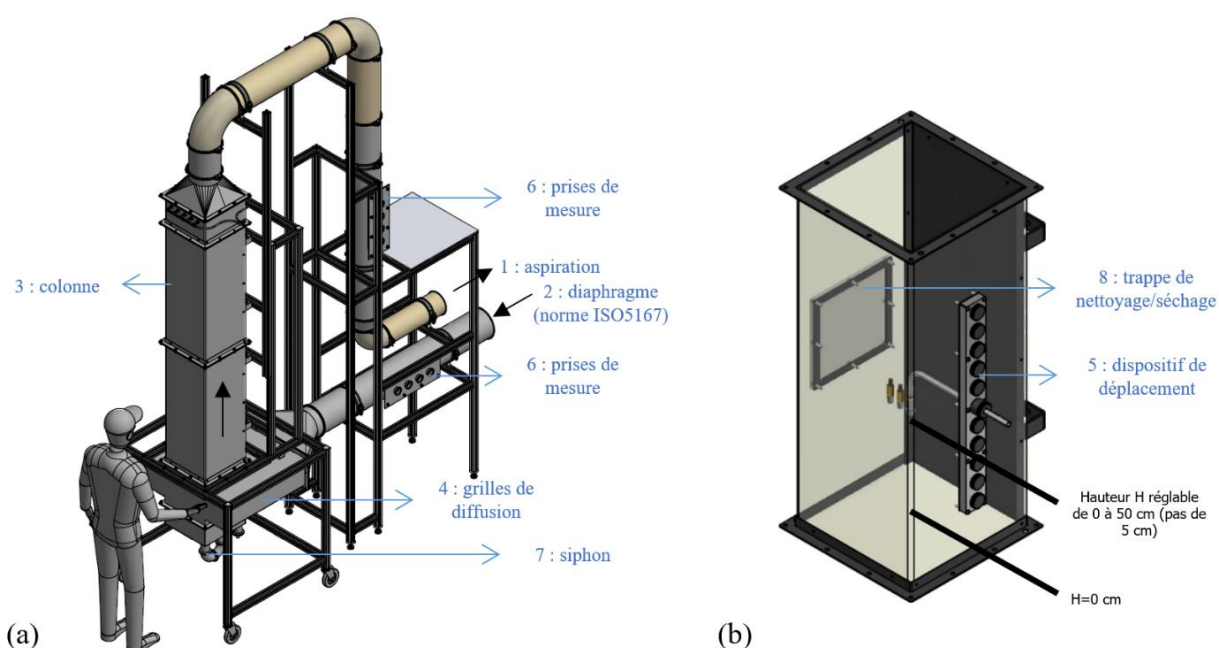


Figure 1: (a) Schéma général du banc expérimental d'abattage humide. Les flèches noires représentent le flux d'air. (b) Zoom sur la partie basse de la colonne et la génération du spray d'eau.

Les particules utilisées dans cette étude sont des alumines (DURMAX, masse volumique 3,95 g/cm<sup>3</sup>), polydispersées afin d'avoir une gamme de diamètre étendue. L'aérosol d'alumine est généré par un RGB 1000 (PALAS), dont les paramètres ont été choisis afin d'assurer un nombre de particules suffisant pour être représentatif et inférieur aux limites des appareils utilisés pour les mesures granulométriques : vitesse de montée du piston 25 mm/h et vitesse de rotation de la brosse 750 rpm.

Afin de connaître l'efficacité de collecte, il est nécessaire de connaître la granulométrie en nombre de l'aérosol généré avec et sans abattage humide. Dans ce papier, nous présentons les résultats de mesures obtenus avec un Aerodynamic Particle Sizer (APS 3321, TSI), utilisé avec un diluteur 20. Ce compteur de particules permet d'obtenir des distributions de tailles de particules allant d'un diamètre aérodynamique de 0,5 à 20 µm, par la mesure du temps de vol des particules individuelles dans un écoulement en accélération à l'aide d'un photodétecteur d'avalanche. L'ensemble des prélèvements est réalisé en condition isocinétique.

Le spray de gouttes est généré par une buse placée en partie centrale de la colonne. Deux types de buses sont utilisés : une buse à section carrée « 1/8 GG-SS 3.6SQ » et une buse à cône plein « 1/8 GG1 SS » (Spraying System). Les pressions d'eau mises en œuvre dans ces travaux sont dans l'intervalle  $P_{eau} = [0,7 - 3]$  bar, correspondant à des débits liquides  $Q_{liq} = [0,78 - 2,09]$  L/min. La calibration pression/débit d'eau a été réalisée au laboratoire. Les caractéristiques granulométriques et morphologiques (angle du spray, vitesse de pénétration, etc.) ont été réalisées en prestation externe (CERTAM, Rouen) par des méthodes laser et des mesures Spraytec (Malvern).

Les mesures APS sont effectuées en aval de la colonne (prises de mesures 6 en hauteur sur la Figure 1(a)). La distribution granulométrique est mesurée pour des valeurs de  $H$  et de  $Q_{air}$  déterminées. La contribution du réentrainement des gouttes ainsi que des particules présentes dans l'environnement a été vérifiée et considérée comme négligeable (de l'ordre de  $10^{-2}$  particules par  $cm^3$ ). Une expérience typique se déroule de la façon suivante : (1) alumine avec pulvérisation d'eau à débit d'eau connu  $N_{avec}$  et (2) alumine seule, sans pulvérisation d'eau  $N_{sans}$ . L'efficacité de collecte est calculée à partir des distributions granulométriques en nombre ( $N_p$ ), et définie par l'Équation 1 :

$$\text{Équation 1 : } E_c(\%) = \frac{N_{sans} - N_{avec}}{N_{sans}} \times 100$$

### 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

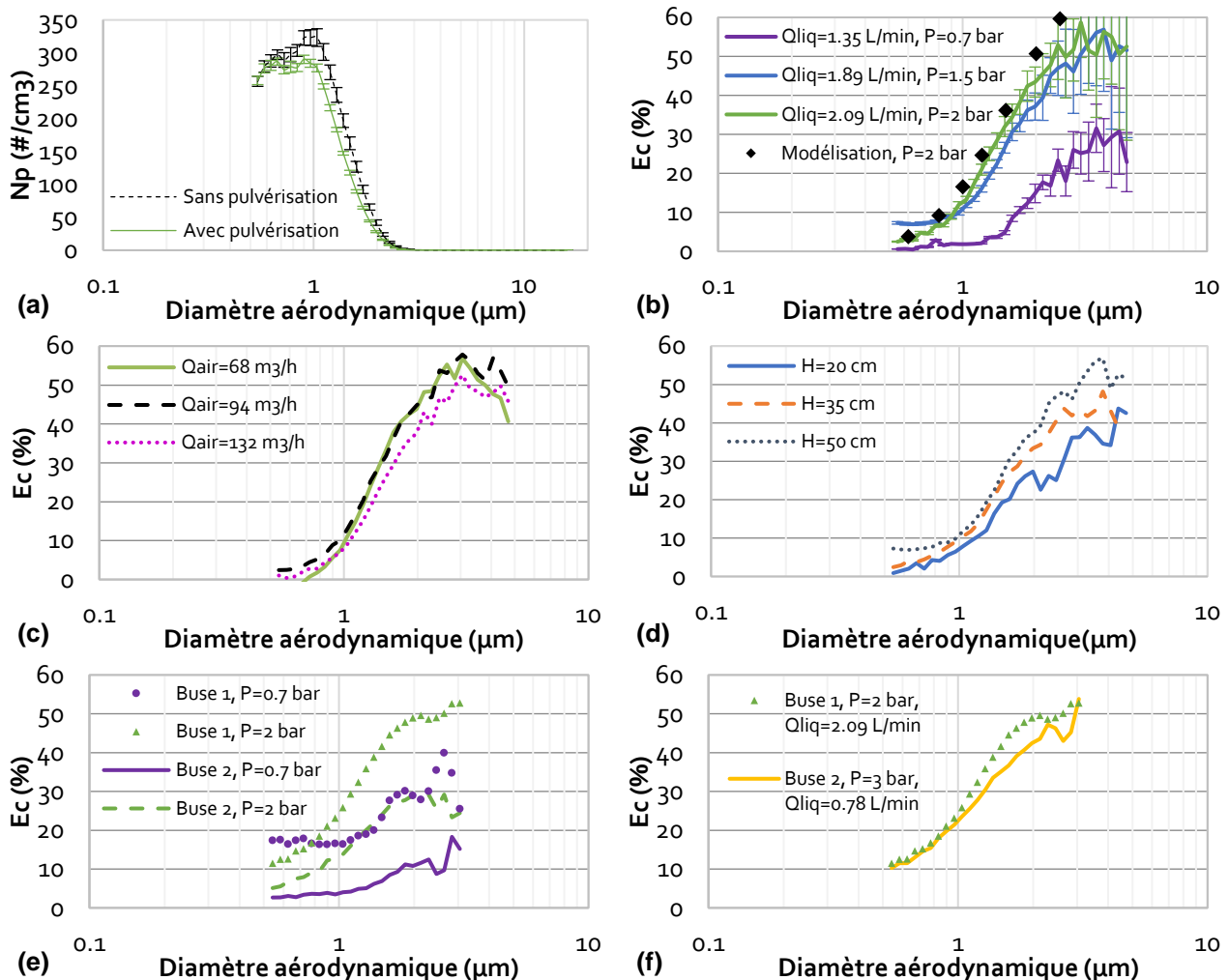


Figure 2 : **(a)** Buse à section carrée,  $H = 20$  cm,  $Q_{air} = 132$  m<sup>3</sup>/h,  $Q_{liq} = 2,09$  L/min. Distributions granulométriques en nombre d'un aérosol d'alumine avec et sans pulvérisation d'eau. **(b)** Buse à section carrée,  $H = 50$  cm,  $Q_{air} = 132$  m<sup>3</sup>/h.  $E_c$  en fonction de  $d_{ae}$  pour différents  $Q_{liq}$ . Les symboles représentent les résultats de simulation pour le cas  $P = 2$  bar. **(c)** Buse à section carrée,  $H = 35$  cm,  $Q_{liq} = 2,09$  L/min.  $E_c$  en fonction de  $d_{ae}$  à différents  $Q_{air}$ . **(d)** Buse à section carrée,  $Q_{air} = 132$  m<sup>3</sup>/h,  $Q_{liq} = 1,89$  L/min.  $E_c$  en fonction de  $d_{ae}$  à différents  $H$ . **(e)** Buse 1  $\equiv$  Buse à section carrée. Buse 2  $\equiv$  Buse à cône plein.  $H = 35$  cm,  $Q_{air} = 94$  m<sup>3</sup>/h. Comparaison de  $E_c$  en fonction de  $d_{ae}$  pour deux buses à même pression d'eau. **(f)** Comparaison de  $E_c$  en fonction de  $d_{ae}$  pour deux buses à  $Q_{liq}$  équivalents. *Remarque : Les essais de reproductibilité ont montré une incertitude sur  $E_c$  inférieure à 7 %. Pour plus de visibilité, les barres d'erreur ne sont pas représentées sur les figures.*

La Figure 2(a) représente les distributions granulométriques typiques d'un aérosol d'alumine obtenues avec et sans pulvérisation. Pour chaque classe de taille, l'ajout d'une pulvérisation de gouttes d'eau mène à une diminution du nombre de particules, bien que l'effet soit peu visible. Les efficacités de collecte calculées

(Équation 1) mettent clairement en évidence le phénomène d'abattage par pulvérisation d'eau. L'influence des différents paramètres a été étudiée.

Pour une buse, une hauteur de positionnement et un débit d'air fixés, augmenter le débit liquide mène à une efficacité de collecte plus importante (Figure 2**(b)**). Les distributions granulométriques des gouttes ont montré une variation du diamètre médian  $d_{50}$  de 100  $\mu\text{m}$  entre  $P = 0,7$  et 2 bar : augmenter la surface spécifique de contact mène à une plus grande efficacité. De plus, la section de la colonne couverte par le spray par rapport à la section totale de la colonne à  $P = 0,7$  bar est de l'ordre de 77 % contre 100 % à  $P = 2$  bar.

Pour une buse, une hauteur de positionnement et un débit liquide fixés, augmenter le débit d'air n'a pas d'influence sur l'efficacité de collecte (Figure 2**(c)**). Pour cette buse, la vitesse des gouttes est de 11 m/s au bout de 35 cm de chute. En revanche, la vitesse de l'air dans la colonne est comprise entre 0,15 et 0,30 m/s. Dans les gammes de débits d'air et d'eau étudiées, la vitesse de l'air est négligeable devant celle des gouttes : l'efficacité de collecte n'est pas impactée par le débit d'air.

Pour une buse et des débits d'air et liquide fixés, augmenter la hauteur de positionnement de la buse mène à une efficacité de collecte plus importante (Figure 2**(d)**). Cela provient de deux phénomènes couplés dus à l'augmentation de la hauteur : la diminution du diamètre des gouttes (augmentation du  $d_{50}$  de 50  $\mu\text{m}$  entre  $H = 5$  et 25 cm) et l'augmentation de la section couverte par le spray (33 % contre 100 % entre  $H = 20$  et 50 cm). Il est à noter que l'impact de la hauteur sur les valeurs d' $E_c$  est négligeable devant celui du débit liquide.

La Figure 2**(e)** suggère que, pour une pression d'eau fixée, l'abattage avec la buse à cône plein est moins efficace qu'avec la buse à section carrée. En revanche, la Figure 2**(f)** montre que la buse à cône plein est aussi efficace à  $Q_{liq} = 0,78$  L/min que la buse à section carrée à  $Q_{liq} = 2,09$  L/min. En effet, les deux buses couvrent quasiment toute la section de la colonne (93 % contre 100 % entre la buse à cône plein et celle à section carrée), mais la buse à cône plein produit des gouttes beaucoup plus fines que la buse à section carrée (150  $\mu\text{m}$  contre 360  $\mu\text{m}$ , respectivement).

Une résolution numérique simple basée sur le modèle de collecte par impaction proposé par Calvert *et al* (1972) a été réalisée avec Matlab. Les conditions imposées pour la résolution sont celles obtenues expérimentalement. Les résultats numériques sont confrontés aux résultats expérimentaux (symbole sur la Figure 2**(b)**), et sont en accord. Cela suggère que l'impaction inertielle est prédominante pour les aérosols de diamètre aérodynamique supérieur au micron, comme déjà montré dans les études précédentes.

#### 4. CONCLUSIONS

Dans cette étude, nous avons mis en œuvre un banc expérimental qui s'approche d'une situation d'abattage humide rencontrée en milieu industriel, tout en maîtrisant les paramètres expérimentaux. L'influence de ces paramètres (vitesse des gouttes, vitesse des particules, hauteur de positionnement de la buse et type de buse) a été étudiée, afin de pouvoir orienter les choix de pulvérisation selon la situation de travail.

Il a été mis en évidence que l'efficacité de collecte peut être aussi importante avec une consommation moindre, en choisissant judicieusement une surface couverte par le spray quasi-totale et des gouttes très fines, en jouant à la fois sur la hauteur de positionnement et les caractéristiques des buses.

Nous avons montré qu'un modèle simple de collecte inertielle peut être un bon compromis pour orienter de futurs utilisateurs sur les paramètres à choisir pour optimiser le procédé d'abattage humide.

Dans la suite, il sera intéressant de développer une nouvelle méthodologie pour obtenir l'efficacité de capture expérimentale d'aérosol de diamètre inférieur au micron afin d'étoffer la gamme de diamètre susceptible d'être rencontrée dans l'industrie.

Beard, K. (1974) Experimental and numerical collision efficiencies for submicron particles scavenged by small raindrops, *J. Atmos. Sci.* 31.

Calvert, S., Lundgren, D. and Mehta, D.S. (1972) Venturi scrubber performance, *J. Air Pollut. Control Assoc.* 22, 529–532.

Cherrier, G., Belut, E., Gerardin, F., Tanière, A. and Rimbart, N. (2017) Aerosol particles scavenging by a droplet: Microphysical modeling in the Greenfield gap, *Atmos. Environment* 166, 519-530.

Greenfield, S.M. (1957) Rain scavenging of radioactive particulate matter from the atmosphere, *J. Meteorol.* 14, 115–125.

Mohebbi, A., Taheri, M., Fathikaljahi, J. and Talaie, M.R. (2003) Simulation of an orifice scrubber performance based on Eulerian/Lagrangian method, *J. Hazard. Mater.* 100, 13–25.

Wang, A., Song, Q. and Yao, Q. (2015) Study on inertial capture of particles by a droplet in a wide Reynolds number range, *J. Aerosol Sci.* 93, 1–15.

Wang, P.K. and Pruppacher, H.R. (1977). An experimental determination of the efficiency with which aerosol particles are collected by water drops in subsaturated Air, *J. Atmos. Sci.* 34, 1664–1666.