INFLUENCE DES CONDITIONS OPERATOIRES SUR LA CAPTURE DES NANOPARTICULES PAR UNE COLONNE DE LAVAGE À L'ÉCHELLE PILOTE

E. ADAH[1], A. Joubert[1], M. Henry[2], S. Durécu[2] et L. Le Coq*[1]

[1]IMT Atlantique, GEPEA, CNRS UMR 6144, CS 20722, 44307, Nantes, France
[2]Séché Environnement, Centre de Recherche, 01150 Saint-Vulbas, France
*Courriel de l'orateur : laurence.le-coq@imt-atlantique.fr

TITLE

Influence of operating conditions on the capture of nanoparticles by a pilot-scale spray scrubber

RESUME

Ce travail étudie l'influence de trois paramètres de fonctionnement sur l'efficacité de collecte de nanoparticules par un laveur à échelle pilote conçu et exploité dans des conditions représentatives d'un laveur à échelle réelle de l'unité d'incinération II de Trédi à Salaise (38). Les résultats expérimentaux ont montré que des gouttelettes de petite taille et une augmentation du débit de liquide favorisent la collecte des nanoparticules. Pour un débit de liquide donné, l'augmentation du débit de gaz conduit à une augmentation de l'efficacité de collecte jusqu'à une valeur de débit de gaz limite à partir de laquelle l'efficacité de collecte diminue en raison d'un phénomène d'entraînement / évaporation des gouttelettes dans le flux d'air influencé par la taille de ces dernières.

ABSTRACT

This work investigates the influence of three operating parameters on the collection efficiency of nanoparticles by a pilot-scale scrubber designed and operated under conditions representative of a full-scale scrubber at Trédi Salaise II incineration plant. The experimental results showed that small droplet size and an increase in liquid flow rate promote the collection of nanoparticles. For a given liquid flow rate, the increase in gas flow rate leads to an increase in collection efficiency up to a limit gas flow rate value from which the collection efficiency decreases due to a phenomenon of entrainment / vaporization of droplets in the air flow influenced by the size of the droplets.

MOTS-CLÉS: Laveur à pulvérisation, Nanoparticules, efficacité de collecte, Box-Behnken design/ **KEYWORDS:** Spray scrubber, Nanoparticles, collection efficiency, Box-Behnken design

1. INTRODUCTION

Un nombre croissant de nanomatériaux manufacturés (NM) est présent dans les produits industriels et de consommation courante. Compte tenu de l'absence de réglementation sur leur fin de vie, les NM sont actuellement traités comme n'importe quel autre déchet, généralement par incinération en raison de leur nature potentiellement dangereuse. Pour limiter les émissions de particules dans les usines d'incinération, on utilise une combinaison de technologies pour l'épuration des gaz de combustion telles que les cyclones, les précipitateurs électrostatiques, les filtres à manches et les laveurs. Les laveurs sont principalement conçus pour traiter les polluants gazeux acides, mais participent aussi à la collecte des particules. La capture des particules dans un laveur à pulvérisation est régie par plusieurs mécanismes tels que la diffusion brownienne, l'interception, l'impaction inertielle, la thermophorèse, la diffusiophorèse, les forces électriques et la gravité (Kim *et al.* 2001). Ces mécanismes peuvent agir seuls ou en combinaison selon les conditions de fonctionnement telles que le rapport liquide/gaz, la température du gaz, le diamètre des gouttelettes, et dépendent également de la taille des particules. Selon des études (*e.g*. Lim et al. 2006), les laveurs seraient inefficaces pour la collecte de particules inférieures à 1,0 µm. Or, nous avons rapporté dans Adah *et al.* (2021) qu'un laveur à pulvérisation à échelle pilote fonctionnant dans des conditions nominales typiques d'une usine d'incinération de déchets dangereux participe effectivement à l'élimination des nanoparticules.
Dans la présente étude, un plan d'expériences de type Box-behnken est employé pour évaluer l'influence de trois paramètres opérationnels clés sur l'efficacité de collecte de nanoparticules par un laveur à échelle réduite : le diamètre des gouttelettes, le débit du liquide et le débit du gaz. Le pilote a été conçu et exploité de manière à représenter une colonne de lavage à grande échelle de l'unité d'incinération II de Trédi à Salaise (38).

2. MATERIELS ET METHODES

Dans cette étude, un plan d'expériences de type Box-Behnken design (BBD) à trois niveaux et trois facteurs est utilisé pour évaluer l'influence de la variation systématique et simultanée de trois paramètres indépendants

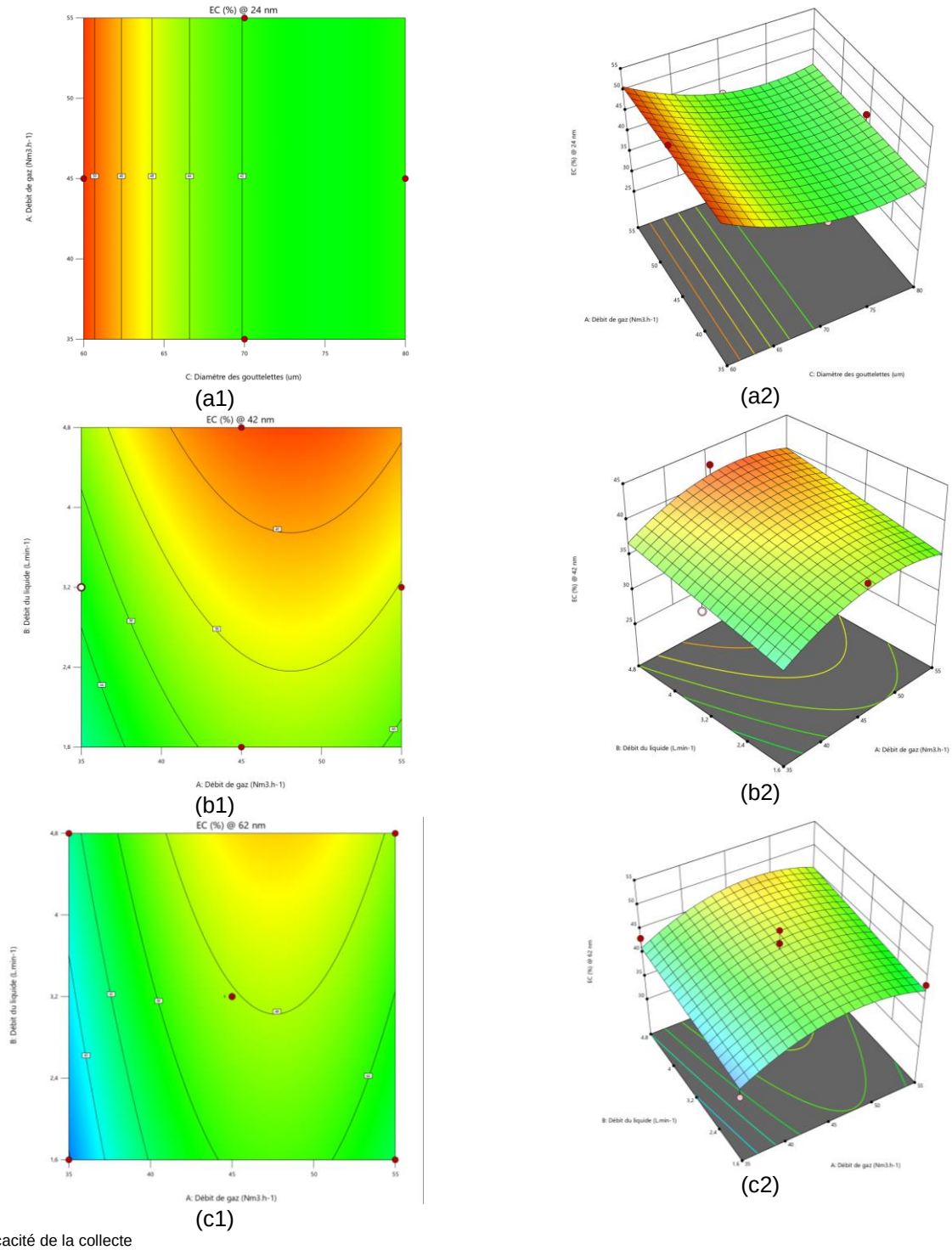
DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2023-32953 Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs

sur la capture de nanoparticules par le laveur : le débit de gaz entre 35 et 55 $Nm^3.hr^{-1}$, débit de liquide entre 1,6 et 4,8 $L.min^{-1}$ et diamètre des gouttelettes entre 60 et 80 µm.
Le dispositif expérimental, décrit dans Adah *et al.* (2021), consiste en un laveur à échelle réduite conçu en similitudes d'échelle géométrique avec le laveur présent dans la ligne de traitement des fumées de l'unité d'incinération II de Trédi à Salaise (38) en termes de rapport hauteur/diamètre, rapport liquide/gaz, température du gaz, humidité du gaz, temps de résidence du gaz, régime d'écoulement du gaz, diamètre des gouttelettes et concentrations des particules. Le laveur de laboratoire a une hauteur de 1,9 m et un diamètre de 0,3 m et comprend quatre étages de pulvérisation. Les buses de pulvérisation génèrent des gouttelettes d'eau d'un diamètre de Sauter moyen de 60 à 80 µm selon la pression d'écoulement du liquide. Un ventilateur centrifuge situé en aval de l'épurateur assure le débit d'air dans le dispositif expérimental. Le conditionnement de l'air se fait en deux étapes : tout d'abord, il est chauffé à 70°C, puis une injection de vapeur de 7 à 12 $kg.hr^{-1}$ est réalisée (la valeur dépend du débit de gaz afin d'obtenir une humidité relative de 1%) et enfin l'air est chauffé à 200°C. A ce stade, des nanoparticules de carbone sont injectées (générateur DNP 2000 Palas). A l'entrée et à la sortie de l'épurateur, un comptage granulométrique des particules est effectué (SMPS, Grimm). Le laveur est alimenté avec de l'eau à 60°C. Pour diminuer la concentration en particules, la température du gaz et l'humidité dans la ligne d'échantillonnage, une dilution en deux étapes est effectuée avant le comptage. Le logiciel Design Expert 13 (V.13.05.0, Stat-Ease Inc., MA, USA) a été utilisé pour l'analyse du modèle statistique issu des données du plan d'expériences. Les résultats d'efficacité de collecte sont étudiés pour trois tailles de particules - 24, 42 et 62 nm – correspondant respectivement à la zone de collecte principalement par diffusion brownienne, la zone de minimum d'efficacité et la zone de collecte par impaction.

3. RESULTATS

Les figures a1 et a2 montrent l'effet combiné du débit de gaz (facteur A) et du diamètre des gouttelettes (facteur C) sur la collecte de particules de 24 nm pour un débit de liquide constant (4.8 $L.min^{-1}$). L'efficacité de collecte à cette taille de particule est significativement influencée par le facteur C. L'efficacité maximale de collecte de 52,1% coïncide avec une région où le diamètre des gouttelettes est de 60 µm, soit la valeur minimale de ce facteur dans le plan d'expériences. La probabilité de contact entre les gouttelettes et les particules augmente dans la région dominée par la diffusion lorsque la taille des gouttelettes diminue (diminution du nombre de Peclet). Une efficacité de collecte minimale de 29,9% est obtenue pour un diamètre de gouttelettes de 80 µm correspondant à la valeur haute du facteur C. Le facteur A (débit de gaz) a un effet négligeable sur une taille de particule de 24 nm pour un débit de liquide constant de 4.8 $L.min^{-1}$.
Les figures b1 et b2 montrent l'influence combinée des débits de gaz (facteur A) et de liquide (facteur B) sur l'efficacité de collecte à une taille de particule de 42 nm pour un diamètre de gouttelettes constant de 60 µm. Pour un débit de gaz donné, lorsque le débit de liquide augmente de 1,6 à 4,8 $L.min^{-1}$ (valeurs min et max du fateur B), la collecte des particules augmente avec la densité de gouttelettes dans l'épurateur. Une efficacité de collecte maximale de 42,6 % est obtenue dans la région de 4,8 $L.min^{-1}$ de débit de liquide et pour un débit de gaz de 48 $Nm^3.h^{-1}$. La figure b1 indique également que pour un débit de liquide donné et en particulier entre 3 et 4 $L.min^{-1}$, l'augmentation du débit de gaz conduit à une augmentation de l'efficacité de collecte jusqu'à une valeur de débit de gaz limite (environ 48 $Nm^3.h^{-1}$) à partir de laquelle l'efficacité de collecte diminue. Le même comportement est observable sur les figures c1 et c2 qui montrent l'influence combiné des débits de gaz (facteur A) et de liquide (facteur B) sur l'efficacité de collecte des NPs à 62 nm pour un diamètre de gouttelettes constant de 70 µm : par exemple pour un débit de liquide de 4.8 $L.min^{-1}$, l'efficacité de collecte augmente avec le débit de gaz jusqu'à environ 48 $Nm^3.h^{-1}$, à partir duquel la tendance s'inverse. Ces résultats s'expliquent principalement par un phénomène d'entraînement / évaporation des gouttelettes dans le flux d'air. Les résultats montrent que ce phénomène a une influence d'autant plus significative sur l'efficacité de collecte et apparait pour des débits de liquide d'autant plus faible que le diamètre des gouttelettes est petit (60 µm *vs* 70 µm).

DOI : 10.25576/ASFERA-CFA2023-32953 Cet article est publié sous la seule responsabilité de ses auteurs



EC: efficacité de la collecte

Figure 1. Influence des facteurs du plan d'expériences sur l'efficacité de collecte pour les 3 diamètres de nanoparticules investigués :(a1) et (a2) Influence du débit de gaz et du diamètre des gouttelettes à un débit de liquide constant 4,8 $L.min^{-1}$ sur la collecte des particules de 24 nm ; (b1) et (b2) Influence du débit de gaz et du débit de liquide à un diamètre de gouttelette constant de 60 µm sur la collecte des particules de 42 nm; (c1) et (c2) Influence du débit de gaz et du débit de liquide à un diamètre de gouttelette constant de 70 µm sur la collecte des particules de 62 nm.

4. CONCLUSIONS

Les laveurs à pulvérisation présents dans les usines d'incinération des déchets participent à la collecte des nanoparticules. Il y a donc transfert de nanoparticules de la phase gazeuse à la phase liquide. Les performances de capture des nanoparticules peuvent être modifiées par les conditions de fonctionnement. Le diamètre des gouttelettes joue un rôle important sur les performances de l'épurateur. Des gouttelettes de petite

taille favorisent la collecte des nanoparticules. Pour les trois tailles de particules rapportées (24, 42 et 62 nm), une augmentation du débit de liquide favorise l'efficacité de collecte du laveur. Pour un débit de liquide donné, l'augmentation du débit de gaz conduit à une augmentation de l'efficacité de collecte jusqu'à une valeur de débit de gaz limite à partir de laquelle l'efficacité de collecte diminue en raison d'un phénomène d'entraînement / évaporation des gouttelettes dans le flux d'air plus ou moins marqué suivant la taille de ces dernières.

Ce travail a été financé par l'ADEME et la Région Pays de la Loire (n°TEZ19-002) ainsi que Séché Environnement.

Kim, H. T., Jung, C. H., Oh, S. N. & Lee, K. W. Particle removal efficiency of gravitational wet scrubber considering diffusion, interception, and impaction. Environ. Eng. Sci. 18, 125–136 (2001)

Adah, E. et al. Spray Scrubber for Nanoparticle Removal from Incineration Fumes from the Incineration of Waste Containing Nanomaterials: Theoretical and Experimental Investigations. Aerosol Sci. Technol. 1–23 (2021)

Lim, K.S., Lee, S.H., Park, H.S.: Prediction for particle removal efficiency of a reverse jet scrubber. J. Aerosol Sci. 37, 1826–1839. https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2006.06.010 (2006)