NOUVEAU DISPOSITIF POUR LE PRÉLÈVEMENT PERSONNEL DES AEROSOLS SEMI-VOLATILS SUR LES LIEUX DE TRAVAILS.

N. REKEB^{1,2}, B. SUTTER¹ E. BELUT¹, C. BROCHARD¹, S. MELIN¹ et E. GEHIN²

¹INRS, 1 rue du Morvan, F-54500 Vandœuvre, France ²Univ Paris Est Creteil, CERTES, F-94000 Creteil, France *Courriel de l'orateur : noredine.rekeb@inrs.fr

TITLE: NEW DEVICE FOR PERSONAL SAMPLING OF SEMI-VOLATILE AEROSOLS IN THE WORKPLACE

RESUME

Dans cet article, nous présentons un nouveau dispositif de Prélèvement Personnel des Aérosols Semi-volatils (PPAS), inspiré du principe de l'impacteur virtuel. Le dispositif permet de mesurer séparément la concentration massique des phases particulaire et vapeur d'un aérosol semi-volatil. Les performances du PPAS ont été évaluées par simulation numérique et validées par des tests expérimentaux menés dans un banc de génération d'aérosols organiques. L'efficacité de transmission du dispositif est supérieure à 86 % pour des particules de diamètre aérodynamique > 0,05 μ m et atteint une valeur de 100 % pour les particules de diamètre aérodynamique compris entre 2 et 20 μ m. Le dispositif est portatif avec une perte de charge maximale de 160 Pa compatible avec les capacités des pompes de prélèvement individuelles, permettant ainsi de réaliser des prélèvements de 8 h sur les lieux de travail.

ABSTRACT

In this article, we present a new device for sampling semi-volatile aerosols (PPAS), inspired by the virtual impactor concept. The device allows measuring separately the concentration of the particulate and vapour phases of a semi-volatile aerosol. The performances of the device were evaluated by numerical simulation and validated by experiments conducted in an organic aerosol generation test rig. The transmission efficiency of the device is higher than 86 % for particle aerodynamic diameters > 0.05 μ m and reaches a value of 100% for particles aerodynamic diameters between 2 and 20 μ m. The PPAS device is portable with a maximum pressure drop of 160 Pa adapted to the performances of individual sampling pumps, thus allowing 8-hour sampling at the workplace.

MOTS-CLES: Aérosols, semi-volatils, Efficacité de transmission, séparation dichotomique / **KEYWORDS**: Aerosol, semi volatiles, transmission efficiency, dichotomous separation.

1. INTRODUCTION

Les composés organiques semi-volatils (COSV) sont classés parmi les composés chimiques dangereux sur la santé humaine. Plusieurs secteurs d'activités sont concernés par la présence des COSV tels que les fluides de coupe, les fumés de bitumes et les pesticides. Les COSV sont présents simultanément sous deux phases, la phase condensée (liquide ou solide) et la phase gazeuse. Plusieurs études toxicologiques ont montré un effet sur la santé différent pour la phase particulaire et vapeur, car elles sont collectées selon des mécanismes et des localisations différents dans les voies respiratoires. L'évaluation de l'exposition des salariés aux COSV sur les lieux de travail nécessite donc de prélever et collecter séparément les phases particulaires et vapeurs afin d'évaluer au mieux les risques pour leur santé.

De nombreuses techniques sont proposées dans la littérature pour séparer les deux phases d'un COSV telles que, les dénuder, les précipitateur électrostatiques, les cassette 37 mm + tube adsorbant et les impacteurs virtuels. Malheureusement, l'ensemble de ces techniques sont sujettes à des biais liés généralement à l'évaporation de la phase particulaire au cours du prélèvement. L'évaporation des particules collectées conduit à une estimation erronée de l'exposition des salariés, traduite par une sous-estimation de la phase particulaire et surestimation de la phase vapeur. Parmi les techniques existantes, un dispositif s'avère prometteur, il s'agit du Semi-Volatile Aerosol Dichotomous Sampler (SADS) proposé par l'université de Minnesota à partir du principe de l'impacteur virtuel (Kim and Raynor, 2009). Les performances du dispositif à échantillonner un aérosol semi-volatil ont été étudiées en détail par Rekeb et al. (2021,2020) à la fois à l'aide de la simulations numérique et d'expérimentations. Les travaux de simulations numériques ont montré que l'efficacité de transmission (η) du SADS est supérieure à 86 % pour les particules de tailles¹ allant de 0,1 jusqu'à 1 µm et η égale à 100 % pour les particules de tailles¹ comprises entre 1 et 20 µm. En revanche, l'étude expérimentale a relevé des dépôts importants sur les parois du SADS qui peuvent aller jusqu'à 45 % pour les particules > à 2 µm¹. Ces dépôts non prédits numériquement sont principalement causés par un désalignement entre les

¹ Diamètre aérodynamique

buses du SADS, ce qui dégrade de façon considérable l'efficacité de transmission du SADS. De plus, des problèmes de répétabilité en plus de divergence inter-spécimens ont été également observés.

L'objectif de cet article est de présenter les performances d'un nouveau dispositif de Prélèvement Personnel des Aérosols Semi-volatils (PPAS) développé par l'INRS en collaboration avec le CERTES (UPEC) sur la base d'une étude d'optimisation CFD des performances du SADS. Les performances du dispositif ont été étudiées numériquement, puis validées expérimentalement en utilisant un aérosol liquide monodispersé. Cette étude est valorisée par le dépôt d'une demande de brevet effectuée par l'INRS et le CERTES en juin 2021 (ref : FR2107292).

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Dispositif de prélèvement personnel d'aérosols semi-volatils (PPAS)

Le principe de fonctionnement du PPAS est illustré à partir d'une vue de coupe sur La Figure 1. L'aérosol est aspiré au travers de l'orifice d'entrée avec un débit total de 2,1 L.min⁻¹. Ce débit est séparé en un débit principal de 1,8 L.min⁻¹ (86 % du débit total) et un débit secondaire de 0,3 L.min⁻¹ (14 % du débit total) à l'aide de deux pompes portables connectées respectivement à la sortie du flux principal et secondaire. L'aérosol prélevé est accéléré dans un cône d'accélération dénommé « buse d'accélération », afin de conférer aux particules une vitesse et ainsi une inertie dépendante de la taille de chacune des particules. En sortie d'orifice d'accélération, la vitesse de la vapeur et des particules est ainsi maximale. L'aérosol accéléré est projeté dans « l'espace de séparation » où a lieu une séparation partielle entre les particules et les vapeurs. Une « buse de collecte », en opposition à la buse d'accélération, permet le captage des particules en aspirant 86 % du débit total. L'orifice de collecte débouche sur un cône de transmission menant à la sortie du flux principal. L'espace de séparation est entouré d'un disque d'homogénéisation de la vitesse d'air du flux d'air secondaire, permettant d'obtenir des vitesses d'air axisymétriques et de conserver la projection des particules dans l'alignement des deux buses. Les extrémités du disque d'homogénéisation aboutissent à un « plénum » de forme ovoïde dont le but est de conduire, sans pertes de charge ni dépôt, les vapeurs séparées vers la sortie secondaire avec 14 % du débit total. Les sorties principales et secondaires sont constituées d'un tube permettant de connecter des dispositifs de collecte de l'aérosol constitués d'une cassette fermée de 25 mm en série avec un tube absorbant.



Figure 1: Schéma de fonctionnement du PPAS

Apres analyse chimique des masse collectées au niveau de chacune des sorties, la concentration massique de la vapeur est calculée par la formule (1) et celle des particules par la formule (2)

$$C_v = M_s / (t_p Q_s) \tag{1}$$

$$C_{p} = \frac{M_{p-}(\frac{Q_{p}}{Q_{s}}) M_{s}}{(Q_{p}+Q_{s}) t_{p}}$$
(2)

Avec C_v la concentration massique en vapeur, M_p et M_s la masse de l'aérosol (particules + vapeur) collectés respectivement coté flux principal et secondaire, t_p le temps de prélèvement, Q_p et Q_s débit de prélèvement respectivement coté sortie flux principal et secondaire.

2.2. Méthode de test des performances du PPAS

Tout d'abord, les performances du PPAS ont été évaluées par simulation numérique en utilisant le modèle CFD décrit dans les travaux de REKEB et al. (2020). Un premier prototype a été usiné sur la base de ces travaux de simulation numérique. Par la suite, le PPAS a été exposé en même temps que le SADS (Rekeb et al., 2021) à des aérosols liquides monodispersés de glycérol générés par le générateur CMAG 3475 (TSI)

selon le principe de Sinclair-La Mer. Pour cette génération, des noyaux de condensations en fluorescéine sodée ont été employés, afin d'accroître la sensibilité des analyses et observer de très faibles quantités de dépôt de particules. Les performances du dispositif sont évaluées sur la base du calcul de l'efficacité spectrale de transmission :

$$\eta(d_a) = \frac{M_p(d_a)}{M_{p_{in}}(d_a)} \tag{3}$$

Avec $\eta(d_a)$ l'efficacité spectrale de transmission pour le diamètre aérodynamique d_a , $M_p(d_a)$ la masse de particules de diamètre d_a collectées à la sortie du flux principal et et $M_{p_{in}}(d_a)$ la masse totale de particules de diamètre d_a entrant dans le dispositif.

3. RESULTATS

3.1. Pertes de charge

La perte de charge représente un paramètre important intégré dans le dimensionnement du PPAS. Il est nécessaire d'avoir une valeur de la perte de charge adaptée à celle du fonctionnement des pompes de prélèvement individuelles existantes pour assurer un prélèvement sur une durée de 8 h. Le Tableau 1 regroupe les valeurs de pertes de charge mesurées expérimentalement et calculées numériquement à la sortie du flux principal et secondaire pour le SADS et le PPAS.

Perte de charge	Sortie du flux principal (Pa)		Sortie du flux secondaire (Pa)	
	Expérience	CFD	Expérience	CFD
SADS	1600 ± 173	1600	3700 ± 120	3681
PPAS	80 ± 20	55,7 ± 2,3	160 ± 12	152,7 ± 2,8

Tableau 1: La valeur de la perte de charge expérimentale et numérique du PPAS et du SADS

Nous remarquons un bon accord entre les résultats de simulation numérique et les mesures expérimentales de la valeur de la perte de charge à la sortie du flux principal et secondaire pour les deux dispositifs PPAS et SADS. Cela confirme que le test expérimental valide le modèle CFD. La valeur de perte de charge du PPAS a été réduite d'environ un facteur 10 par rapport à celle du SADS.

3.2. Efficacité de transmission

La Figure 2 présente l'évolution de l'efficacité de transmission numérique et expérimentale du PPAS et SADS, en fonction du diamètre aérodynamique des particules.



Figure 2 : Efficacité de transmission du PPAS et SADS

D'après les résultats de la Figure 2, la courbe de η du SADS obtenue par simulation numérique évolue entre 80 % et 98 % pour les particules ayant un diamètre aérodynamique compris entre 0,05 et 1,5 µm, et la valeur de η atteint rapidement une valeur de 100 % pour des particules de taille¹ comprises entre 2 et 20 µm. Cette efficacité obtenue par CFD du SADS n'est pas confirmée par les points expérimentaux. Cet écart est traduit par une dégradation de η jusqu'à une valeur moyenne d'environ (58 ± 2) % pour des particules micrométriques d'une taille¹ de 2, 3 et 4 µm. Cependant, la courbe de η du PPAS calculée par simulations numérique s'approche mieux des points expérimentaux. Tout d'abord, pour des particules de taille¹ allant de 0,05 jusqu'à 1,5 µm la courbe de η évolue entre 86 % et 98 %, et la courbe se stabilise ensuite à une valeur de 100 % pour les particules de taille¹ comprise entre 2 et 20 µm. Afin d'illustrer les causes des dégradation de η observées durant les tests expérimentaux et non prédits par les simulations numériques, la Figure 3 présente la répartition massique des particules à la sortie du flux principal et secondaire ainsi que la fraction déposée pour le SADS et le PPAS. Les résultats de la Figure 3 montrent que l'écart observé entre la courbe de η du SADS obtenu par simulation numérique et les points expérimentaux sur la Figure 2 est engendré par le dépôt de particules sur les parois. En effet, les fractions massiques moyennes déposées pour les particules de taille¹ 2, 3 et 4,5 µm dans le SADS sont d'environ (43 ± 6) %, avec plus de (35 ± 3) % de ces dépôts se situant essentiellement sur les parois extérieures de la buse de collecte (Rekeb et al., 2021). Cela est dû à un désalignement entre les buses d'accélération et de collecte alors que les simulations sont basées sur un alignement parfait des deux buses. Malgré le désalignement existant, les particules fines de 0,15 µm¹ ne se déposent pas en grandes quantités sur les parois, car elles parviennent à contourner les parois de la buse de collecte en sortie de la buse d'accélération. Ces particules fines possèdent une faible inertie permettant ainsi de répondre sur des temps courts aux sollicitations de l'air.

Dans le cas du PPAS, nous remarquons que η des particules de 0,15 µm¹ calculées par simulation numérique et mesurée expérimentalement sont respectivement de l'ordre de (87 ± 1) % et de (93 ± 6) %. L'écart existant peut s'expliquer par le fait que la distribution granulométrique des particules de 0,15 µm¹ est polydispersée ($\sigma_g = 1,6$), ce qui permet l'existence de particules de taille¹ > 0,15 µm en augmentant la valeur de η . En outre, la valeur de η du PPAS est supérieure 94 %, pour les particules d'une taille¹ de 2, 3 et 4,5 µm. Une valeur de 100 % n'est pas atteinte, car des dépôts moyens de l'ordre (6 ± 3) % ont été observés expérimentalement et non prédit par simulation numérique. Ces dépôts de particules ont été observés sur les parois interne de la buse de collecte débouchant sur la sortie du flux principal. Cela est dû principalement à la qualité d'usinage du dispositif réalisé en interne dans l'atelier de l'INRS. Des difficultés ont été rencontrées lors de l'usinage des buses, ce qui a engendré un état de surface de mauvaise qualité sur les parois de la buse de collecte avec des rainures crées par l'outil d'usinage qui apparaissent de façon claire.

Par ailleurs, comme ces dépôts sont situés à l'intérieur de la buse de collecte, la mesure de la concentration en particules reste correcte, car dans le cas d'un prélèvement réel les particules s'évaporent et elles seront collectées sur un filtre placé en série avec un tube adsorbant à la sortie du flux secondaire.



Figure 3 : Fraction massique des particules dans le PPAS et SADS

4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'utilisation du PPAS pour l'échantillonnage des aérosols semi-volatils permet de réaliser un prélèvement dichotomique des phases particulaire et vapeur d'un aérosol semi-volatil avec une efficacité de transmission supérieure à 86 % pour des particules de diamètre aérodynamique supérieur à 0,05 µm et atteignant 100 % pour les particules de diamètre aérodynamique compris entre 2 et 20 µm. Le PPAS permet de répondre aux contraintes d'encombrement et de pertes de charge (< 160 Pa) liées au prélèvement individuel sur le lieu de travail. Néanmoins, une attention particulière doit être portée à l'usinage du dispositif par des spécialistes en mécanique de précision. Sur la base de ces travaux, d'autres versions moins encombrantes du dispositif seront proposées à l'avenir en simplifiant la géométrie des buses afin de faciliter l'usinage du dispositif. Il serait également intéressant d'améliorer l'efficacité de transmission des particules fines, même si elles représentent une fraction massique mineure par rapport aux particules micrométriques.

5. REFERENCES

Kim, S.W., Raynor, P.C., 2009. A New Semivolatile Aerosol Dichotomous Sampler. The Annals of Occupational Hygiene 53, 239–248. https://doi.org/10.1093/annhyg/mep008

- Rekeb, N., Sutter, B., Belut, E., Géhin, E., 2021. TEST DES PERFORMANCES D'UN DISPOSITIF POUR LE PRELEVEMENT PERSONNEL DES AEROSOLS SEMI-VOLATILS DANS UN BANC DE GENERATION D'AEROSOLS ORGANIQUE.
- REKEB, N., SUTTER, B., BELUT, E., GEHIN, E., 2020. DÉVELOPPEMENT D'UN DISPOSITIF PORTABLE POUR LE PRÉLÈVEMENT DES AÉROSOLS SEMI-VOLATILS PAR SIMULATION NUMÉRIQUE. https://doi.org/10.25576/ASFERA-CFA2020-19720