



Etude du réentraînement en phase vapeur d'aérosols liquides semi-volatils après filtration sur filtre à fibres

Benjamin Sutter, Jean-Christophe Appert-Collin, Denis Bemer, Dominique Thomas

► To cite this version:

Benjamin Sutter, Jean-Christophe Appert-Collin, Denis Bemer, Dominique Thomas. Etude du réentraînement en phase vapeur d'aérosols liquides semi-volatils après filtration sur filtre à fibres. 25ème Congrès Français sur les Aérosols, Jan 2010, Paris, France. hal-00873329

HAL Id: hal-00873329

<https://hal.science/hal-00873329>

Submitted on 15 Oct 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ETUDE DU REENTRAINEMENT EN PHASE VAPEUR D'AEROSOLS LIQUIDES SEMI-VOLATILS APRES FILTRATION SUR FILTRE A FIBRES

B. Sutter (1,2), J.C. Appert-Collin (2), D. Bémer (1) et D. Thomas (2)

(1) INRS, Rue du Morvan, CS 60027, 54519 Vandoeuvre Lès Nancy Cedex, France

(2) LSGC-CNRS, Nancy Université, 1, rue Grandville BP 20451, 54001, Nancy Cedex, France
jean-christophe.appert-collin@ensic.inpl-nancy.fr

TITLE: Study of the feed under vapor phase of semi volatile aerosols collected after filtration on fibrous filter

ABSTRACT

Fibrous filters are commonly used in order to decrease concentration of liquid aerosols at workstation, and to control their concentration in the workspaces. However the effectiveness of these filters is called into question by the capacity of the aerosols deposited to evaporate when not saturated air passes through. The comprehension of the phenomena related to the evaporation of semi-volatile liquid aerosols collected on filters is thus necessary for the forecast of the mass losses. For the first time, the evaporation of various model aerosols, composed of heavy alkanes (pure or mixed) is observed, using a simultaneous quantification of the vapor concentration of each compound downstream of the clogged filter by a chromatographic analysis in gas phase with FID detector. Mass load, granulometry and composition of aerosols are the tested parameters. The results obtained are discussed and compared with a theoretical model of evaporation.

RESUME

De nombreuses sources d'aérosols liquides (fluides de coupes, pesticides,...) sont présentes dans les atmosphères industrielles. Pour contrôler ou pour diminuer l'exposition des salariés à ces aérosols potentiellement toxiques, il est nécessaire de les filtrer sur des médias fibreux. Cependant, lorsqu'un air non saturé en vapeurs traverse un filtre colmaté, une perte par évaporation des gouttes déposées sur les fibres peut se produire. Par voie de conséquence, les salariés se retrouvent être exposés à des vapeurs plus concentrées par rapport à l'état initial de l'aérosol filtré et les mesures de contrôle d'exposition (concerne les « préleveurs ») sont entachées d'une erreur qui peut être importante. Cette étude a pour objectif de fournir un ensemble de données expérimentales, la littérature étant assez pauvre dans ce domaine, afin d'identifier et de comprendre les phénomènes prépondérants dans l'évaporation d'un aérosol liquide semi-volatile collecté sur un filtre à fibres, de composition pure ou non, pour au final pouvoir améliorer les quelques modèles théoriques de la littérature.

INTRODUCTION

De nombreuses sources d'aérosols liquides sont présentes dans le milieu industriel. Ces aérosols, peuvent être, par exemple, des fluides de coupe (Raynor and Leith 1999), des pesticides, etc. qui sont nocifs voire toxiques pour l'Homme. Pour contrôler et pour diminuer l'exposition des salariés aux aérosols potentiellement toxiques, ils sont habituellement filtrés par des filtres à fibres. Cependant, lorsqu'un air non saturé percole à travers un filtre colmaté, une perte par évaporation des gouttes déposées sur les fibres peut se produire. Par voie de conséquence, les salariés sont exposés à des vapeurs plus concentrées par rapport à l'état initial de l'aérosol filtré et les mesures de contrôle d'exposition sont entachées d'une erreur qui peut être importante.

Cette étude a donc pour but d'alimenter en données expérimentales la littérature très pauvre dans ce domaine, afin d'identifier et de comprendre les phénomènes prépondérants dans l'évaporation d'un aérosol liquide semi-volatile collecté sur un média fibreux, de composition pure ou non, pour *in fine* améliorer les modèles théoriques de la littérature.

Des premiers essais (Sutter et al, 2009) ont permis d'observer le comportement de phtalates purs et de certains alcanes (C14 à C16).

DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET METHODE

Dans un premier temps, l'aérosol étudié (phtalate ou alcane C14 à C16) doit être généré puis transporté de façon homogène jusqu'au filtre étudié (tableau 1), où il sera déposé. Dans un deuxième temps, le filtre colmaté est placé dans une cassette d'évaporation alimenté en air propre et équipée de capteurs permettant de contrôler les paramètres de la filtration au cours du temps. Les phases de colmatage et d'évaporation des filtres sont donc séparées afin de limiter les influences de la première sur la seconde.

Tableau 1 : Caractéristiques des filtres testés

Matériau	Polyester	Verre			Quartz haute qualité
Filtre (notation)	P	D	B	A	W
Grammage (g.m^{-2})	528	75	70	70	75
Epaisseur (mm)	1,72	0,58	0,60	0,65	0,40
Compacité	0,222	0,056	0,052	0,048	0,073
$d_{f,Davies}$ (μm)	20,4	1,12	2,85	5,59	0,53
K (m^2)	$3,8.10^{-11}$	$1,7.10^{-12}$	$1,2.10^{-11}$	$2,7.10^{-11}$	$6,4.10^{-13}$

avec $d_{f,Davies}$ le diamètre des fibres déterminé à partir du modèle de Davies, 1973.

Le système d'acheminement de l'aérosol généré évolue selon deux configurations, en fonction du type de générateur utilisé et du type d'aérosol souhaité. Dans un premier temps, le dispositif schématisé dans la figure 1a, achemine l'aérosol polydispersé produit par le générateur DeVilbiss. Dans un deuxième temps, le système présenté dans la figure 1b, a été conçu pour l'utilisation du générateur d'aérosol monodispersé MAG 3000. La masse déposée sur les filtres est de l'ordre de quelques centaines de microgrammes. Cependant, pour déterminer la masse exacte déposée, deux pesées sur une balance de précision, avant et après le colmatage, sont réalisées. La masse ainsi déterminée tient lieu de référence pour le reste de l'essai.

Après colmatage, les filtres sont placés dans le système d'évaporation schématisé dans la figure 2. Le corps du dispositif est constitué d'un tube en acier inoxydable permettant notamment de limiter l'adsorption des vapeurs issues du filtre sur les parois, et minimiser ainsi les erreurs de mesures des concentrations en vapeurs au cours du temps. Deux configurations, avec et sans chauffage du dispositif sont à distinguer. Pour tous les essais réalisés, la vitesse d'approche de l'air est fixée à 5 cm.s^{-1} ce qui équivaut à un débit volumique en air de $2,72 \text{ l.min}^{-1}$. La température est également contrôlée par des thermocouples et des cordons chauffants.

Le suivi en temps réel de la cinétique d'évaporation est indispensable pour la compréhension des phénomènes dynamiques mis en jeu. Celle-ci est réalisée par prélèvement sur support adsorbant, désorption et dosage par chromatographie en phase gazeuse avec détecteur FID.

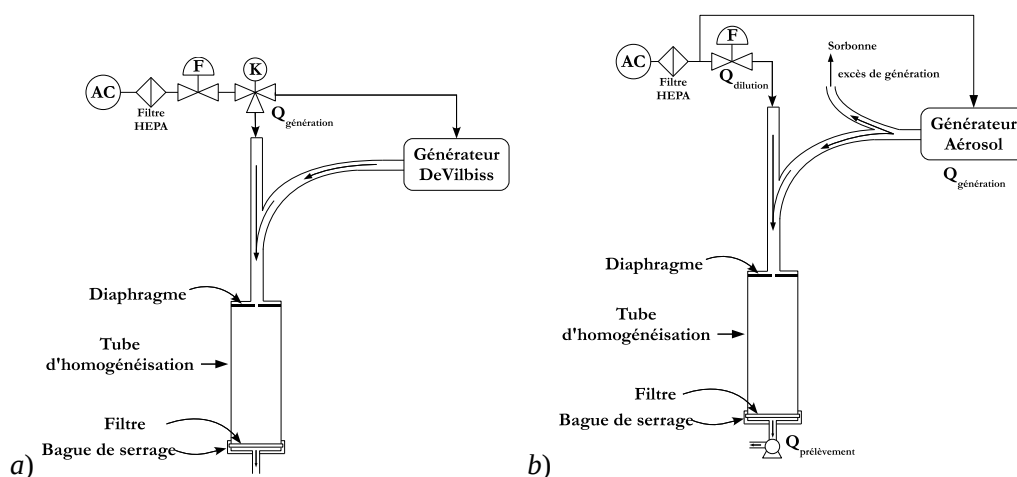


Figure 1 : Schéma des systèmes de génération d'aérosols et de colmatage de filtres à fibres

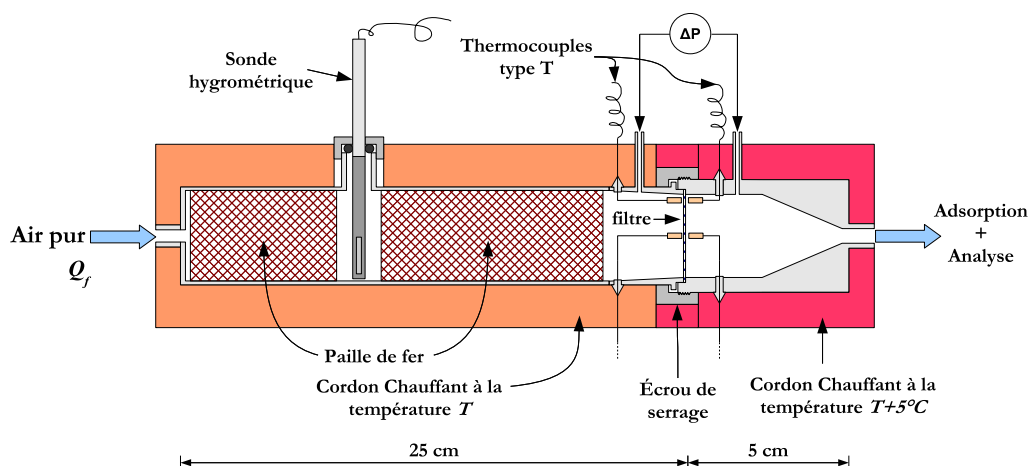


Figure 2 : Schéma de fonctionnement du système d'évaporation de filtre colmaté.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les essais d'évaporation effectués sur les composés purs de phtalates et d'alcanes possèdent en grande majorité un comportement d'évaporation quasi-similaire (Sutter, 2009).

La figure 3 présente les résultats obtenus pour l'évaporation d'aérosols de C₁₆ collectés sur un filtre Whatmann, pour une masse collectée de 517 µg, et une vitesse d'approche d'air sur le filtre de 4,6 cm.s⁻¹ à température ambiante.

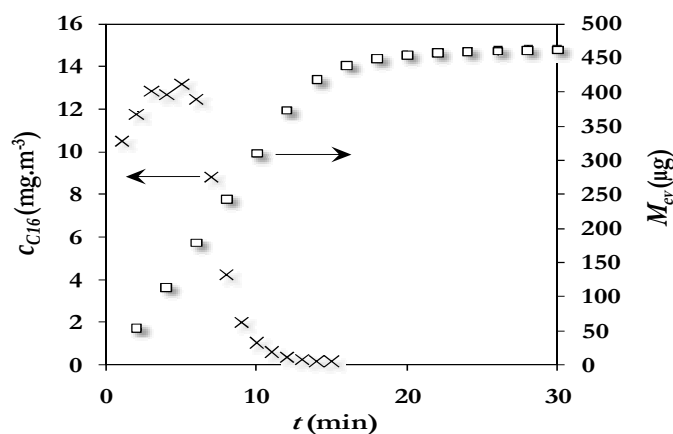


Figure 3 : Evaporation d'aérosols pur monodispersés de C₁₆, DAMM = 1 µm, $v = 4,6 \text{ cm.s}^{-1}$, filtre W

L'évaporation de l'aérosol s'effectue en 2 grandes étapes :

- Etape 1 : Vitesse d'évaporation maximale. La concentration saturante en vapeur, correspondante à la température de l'air à l'amont du filtre, est atteinte. Le système filtre-aérosol collecté est à une température identique à celle de l'air le traversant.
- Etape 2 : Diminution brutale de la concentration en vapeur à l'aval du filtre. La masse et la surface liquide de l'aérosol associée ne sont plus suffisantes pour produire une vapeur saturante à l'aval du filtre.

Soit t_1 le temps correspondant à la transition entre ces 2 phases.

Lorsque $t < t_1$, la mise en régime rapide du système est représentée arbitrairement par un mécanisme de premier ordre jusqu'à atteindre un plateau de vitesse où la vitesse est maximale. L'évaporation se produit selon un régime appelé « régime de plateau ».

La vitesse d'évaporation maximale théorique $R_{\max, \text{theo}}$ est alors égale à :

$$R_{\max, \text{theo}} = Q_f c_{\text{sat}}$$

Lorsque $t > t_1$, la vitesse d'évaporation décroît et apparaît modélisable selon un phénomène du premier ordre par rapport à la masse d'aérosol présente sur le filtre. L'évaporation se produit alors selon un régime appelé « régime de décroissance ».

La vitesse d'évaporation peut alors se modéliser selon un modèle A défini par le couple d'équations suivant :

$$\text{Modèle A} \quad \left\{ \begin{array}{l} t < t_1 \quad \frac{dM_{ev}(t)}{dt} = R_{\max, A} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right] \\ t > t_1 \quad \frac{dM_{ev}(t)}{dt} = R_A(t_1) \left[\frac{M_{ev, \infty} - M_{ev}(t)}{M_{ev, \infty} (1 - X_1)} \right] \end{array} \right.$$

$$\text{avec :} \quad \left\{ \begin{array}{l} t = 0 \quad M_{ev} = 0 \\ t = t_1 \quad R_A(t_1) = R_{\max, A} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right] \end{array} \right.$$

où τ_1 est une constante de temps qui est un paramètre d'ajustement du modèle aux points expérimentaux permettant de prendre en compte l'effet de mise en régime de l'évaporation.

Pour pouvoir comparer les vitesses expérimentales d'évaporation $R_{\max, \text{exp}}$ de tous les essais présentant un régime de plateau, nous les avons normées par la vitesse maximale théorique $R_{\max, \text{theo}}$ correspondante à chaque essai. Ainsi, la vitesse relative peut être tracée en fonction de la charge d'aérosol collectée (figure 4). On remarque alors des comportements différents entre les filtres testés.

Pour tous les filtres testés avec du C₁₆, sauf le filtre W, on observe un bon accord entre $R_{\max, \text{exp}}$ et $R_{\max, \text{theo}}$, quelle que soit $M_{ev, \infty}$. Les valeurs des vitesses normées supérieures à l'unité n'ont pas de sens physique car sont dues à l'optimisation mathématique du modèle semi-empirique. En revanche, pour les filtres W, $R_{\max, \text{exp}}$ évolue clairement en fonction de la charge jusqu'à une masse critique d'environ 750 µg où $R_{\max, \text{theo}}$ est atteinte indépendamment de la granulométrie.

Ce comportement dissemblable des filtres W vis-à-vis du C₁₆ peut être lié à des interactions goutte-fibre différentes entre des fibres de quartz, de verre et de polyester, avec des interactions de type Van der Waals plus importantes dans le cas de fibres de quartz que dans les autres cas. La structure hétérogène des filtres W avec la présence de zones plus ou moins denses se répétant régulièrement sur la surface frontale du filtre, contrairement aux autres filtres où la structure semble homogène, peut être également une source d'explications.

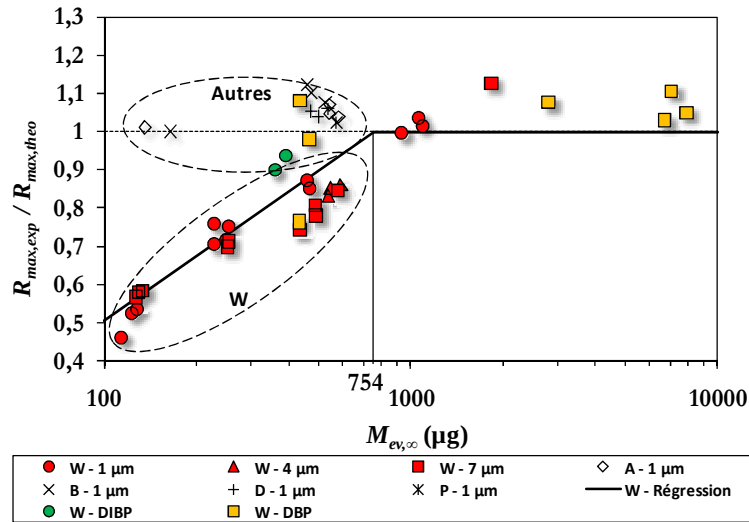


Figure 4 : Vitesse maximale normée en fonction de la masse de C_{16} collectée pour tous les essais.

De même, on peut s'intéresser à la vitesse d'évaporation dans l'étape 2 de l'évaporation (décroissance du 1^{er} ordre).

La figure 5 représente la vitesse d'évaporation $R(t)$, normée par la vitesse maximale théorique $R_{max,theo}$ en fonction de la masse d'aérosol restante déposée $M_a(t)$, pour trois essais sur des filtres W et deux différentes masses totales d'aérosol de C_{16} évaporées de 36,3 et 121 μg .

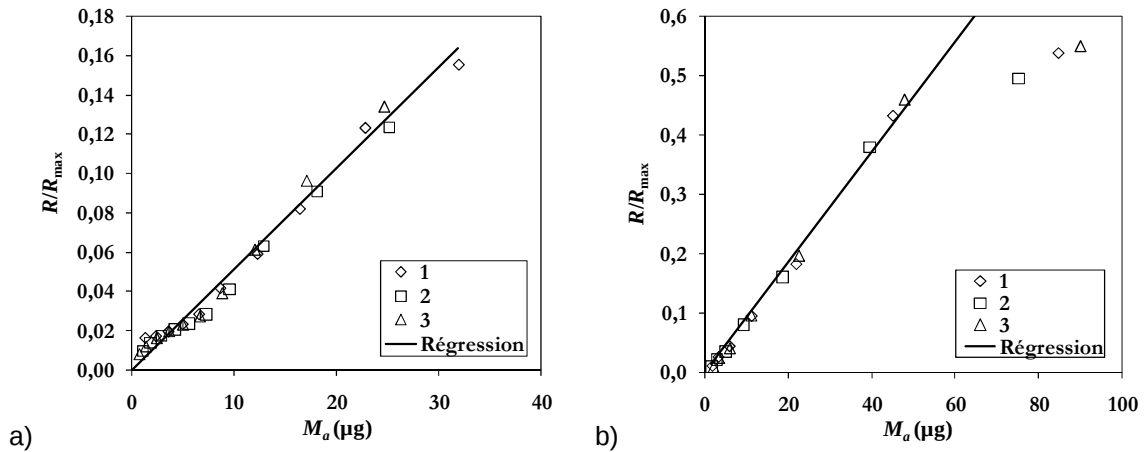


Figure 5 : Vitesse d'évaporation normée d'un aérosol de C_{16} monodispersé en fonction de la masse résiduelle pour 3 essais. Filtre W et DAMM = 1 μm . a) $M_{ev,\infty} = 36,3 \mu g$. b) $M_{ev,\infty} = 121 \mu g$.

La cinétique d'évaporation apparaît clairement linéaire en fonction de $M_a(t)$ pour les essais de masse initiale collectée $M_{ev,\infty} = 36,3 \mu g$. Il est encore possible d'observer le comportement linéaire de la cinétique d'évaporation pour des charges de C_{16} de l'ordre de $M_{ev,\infty} = 121 \mu g$. On constate que la cinétique d'évaporation devient décroissante du premier ordre lorsque M_a est inférieure à 40 μg environ. Ces observations sont également valables pour toutes les granulométries et tous les types de filtres testés avec le C_{16} .

Pendant le régime de décroissance, la cinétique d'évaporation est dominée par le transfert interfacial et doit, d'après la littérature, être modélisable par les lois de Fick. Si on l'applique à un ensemble de N_i sphères de même diamètre en faisant intervenir la masse d'aérosol présente sur le filtre $M_a(t) = M_{ev,\infty} - M_{ev}(t)$, on obtient l'équation suivante :

$$\phi(t) = N_i \, 2\pi \left(\frac{6}{\pi} \frac{M_a(t)}{\rho N_i} \right)^{1/3} D c_{sat} f$$

avec f le facteur de correction appliqué (Fucks, Kelvin, etc...).

Le calcul cette équation pour le cas a) donne une vitesse d'évaporation réduite d'environ 16 pour $M_a = 1 \, \mu\text{g}$ et 54 pour $M_a = 36 \, \mu\text{g}$. Donc en plus d'une évolution de la vitesse d'évaporation théorique non cohérente avec l'expérience, le flux théoriquement obtenu par la diffusion pure surestime largement le flux maximal que l'on peut espérer obtenir dans les conditions de l'expérience.

La modélisation du régime de décroissance par les modèles semi-empiriques selon une cinétique de premier ordre semble donc tout à fait justifiée. Cela signifie, selon toute probabilité, que l'évaporation n'est pas gouvernée par un processus diffusionnel pur observé lors d'évaporation de gouttes en suspension dans un air calme et modélisé par les lois de Fick.

CONCLUSION

L'évaporation d'un aérosol liquide semi volatil peut être décrite par deux phases principales. Pendant la première, l'évaporation est maximale et s'effectue selon un régime de plateau car la vitesse d'évaporation est constante lorsque la température du filtre est elle-même constante. Pendant la seconde phase, la vitesse d'évaporation chute brutalement et passe en régime de décroissance.

Nous avons également développé des modèles semi-empiriques représentant fidèlement les données expérimentales afin de pouvoir ensuite comparer les différents paramètres expérimentaux testés de ces modèles pour mettre en évidence l'influence ou non de ceux-ci sur l'évaporation. L'exploitation de ces modèles semi-empiriques nous ont permis de mettre en évidence :

- le désaccord entre l'évaporation de l'aérosol collecté et les lois de Fick pendant le régime de décroissance et pour de très faibles masses collectées inférieures à $40 \, \mu\text{g}$,
- un comportement différencié, non clairement explicable, de l'évaporation d'aérosols de C_{16} déposés sur un filtre W par rapport aux autres filtres testés,
- la non influence de la masse d'aérosol initialement déposée ainsi que de la granulométrie sur la cinétique d'évaporation pendant le régime de décroissance.

Ces interrogations ont conduit à une étude microscopique de l'évaporation de gouttes déposées sur filtre (Sutter, 2009)

BIBLIOGRAPHIE

Davies, C. N. (1973). *Air Filtration*. Academic Press London, New York.

Furuuchi, M., Fissan, H. and Horodeck, J. (2001). "Evaporation behavior of volatile particles on fibrous filter flushed with particle-free dry air." *Powder technology* 118(1-2): 171-179.

Raynor, P. C. and Leith, D. (1999). *Evaporation of accumulated multicomponent liquids from fibrous filters*. *The Annals of Occupational Hygiene* 43(3): 181-192.

Sutter, B., Appert-Collin J.C., Bémer D., Thomas D. "Etude de l'évaporation d'un aérosol liquide semi-volatil collecté sur filtre à fibres", 24^{ème} Congrès sur les aérosols, Paris, janvier 2009

Sutter, B. « Etude de l'évaporation d'aérosols liquides semi-volatils collectés sur médias fibreux » - thèse INPL novembre 2009

Zhang, X. Q. and McMurtry, P. H. (1987). "Theoretical analysis of evaporative losses from impactor and filter deposits." *Atmospheric Environment* 21(8): 1779-1789.