



**HAL**  
open science

## Evaporation de gouttes onduloïdes déposées sur fibres : mise en évidence d'un comportement atypique

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

### ► To cite this version:

Benjamin Sutter, Jean-Christophe Appert-Collin, Denis Bemer, Dominique Thomas. Evaporation de gouttes onduloïdes déposées sur fibres : mise en évidence d'un comportement atypique. 26ème Congrès Français sur les Aérosols, Jan 2011, Paris, France. hal-00873006

**HAL Id: hal-00873006**

**<https://hal.science/hal-00873006>**

Submitted on 14 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.

# EVAPORATION DE GOUTTES ONDOLOÏDES DEPOSEES SUR FIBRES : MISE EN EVIDENCE D'UN COMPORTEMENT ATYPIQUE

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) LRGP-CNRS, Nancy Université, 1, rue Grandville BP 20451, 54001, Nancy Cedex, France  
[benjamin.sutter@inrs.fr](mailto:benjamin.sutter@inrs.fr)

**TITLE:** Evaporation of ondoloïd droplets deposited on fibres: demonstration of an atypical behaviour.

## 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. This study presents a new approach on the evaporation behavior by making observation of deposited droplet on fiber at a microscopic scale. Observations demonstrated that the kinetic of evaporation is not correlated to the so called Fick's laws, as expected. There are some elements which prove that the evaporation kinetic is determined by the initial diameter of the droplet at the moment of collection on the fiber.

## RESUME

Les filtres à fibres sont communément utilisés pour diminuer la concentration des aérosols liquides sur les lieux de travail et pour contrôler leurs concentrations. Cependant, l'efficacité de ces filtres est remise en question par la capacité de ces aérosols déposés à s'évaporer lorsque de l'air non saturé passe au travers. La compréhension du phénomène lié à l'évaporation d'aérosols liquides semi-volatils est donc nécessaire pour prédire la perte d'une masse d'aérosol. Cette étude présente une nouvelle approche pour la compréhension du comportement de l'évaporation en faisant des observations de gouttes déposées sur des fibres à l'échelle microscopique. Les observations ont montré que la cinétique d'évaporation n'est pas corrélée aux lois de Fick, comme attendu. Il existe quelques éléments prouvant que la cinétique d'évaporation est conditionnée par le diamètre initial des gouttes au moment de leur collecte sur les fibres.

## INTRODUCTION

L'INRS et le LRGP de Nancy se sont associés afin d'étudier le comportement des aérosols liquides semi-volatils collectés sur les filtres à fibre. Il a été constaté que lors de prélèvements de contrôle des expositions des salariés, ou lors de l'utilisation de process d'épuration d'air par les entreprises, les aérosols collectés s'évaporent au cours du temps. Ce phénomène d'évaporation à dans chaque cas des conséquences différentes :

- une sous-estimation de la concentration particulaire de l'aérosol prélevé associée à une sur-estimation de la concentration en vapeur lorsque celle-ci est quantifiée,
- une exposition des salariés à une concentration en vapeurs plus importante qu'avant la filtration et sous certaines conditions, une exposition à un aérosol liquide plus fin produit par condensation des vapeurs issues des filtres, dans le cas de recyclage d'air dans l'espace de travail.

Peu d'études expliquant et modélisant le comportement des aérosols semi-volatils collectés existent dans la bibliographie (Raynor & Leith, 1999; Raynor *et al.*, 2000; Zhang & McMurry, 1987). Toutes ces études modélisent l'évaporation des particules collectées à l'aide de la théorie de la diffusion ou loi de Fick. Cependant, des études préliminaires ont été menées et ont démontrées que cette loi de Fick ne pouvait expliquer le comportement global de l'aérosol collecté (Sutter, 2009 ; Sutter *et al.*, 2010).

Afin de comprendre le comportement à l'échelle microscopique d'un aérosol liquide semi-volatil déposé sur un filtre à fibre, un système de porte filtre permettant l'observation des gouttes collectées sous microscope optique a été créé. Les résultats issus des observations sont présentés ici.

## DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET METHODE

La génération de l'aérosol liquide semi-volatil couplé à sa collecte sur le filtre testé et l'observation des gouttes collectées sur les fibres du filtre sont deux étapes distinctes.

### 1. Génération et collecte de l'aérosol

La génération et la collecte de l'aérosol est schématisé sur la figure 1. Un nébuliseur DeVilbiss n°40 est utilisé pour générer un aérosol liquide polydispersé. Ce générateur offre la possibilité de changer la nature chimique du liquide nébulisé. Il est alimenté en air comprimé filtré et sec (filtre HEPA, humidité relative < 1% à 20°C), à un débit de 8 L.min<sup>-1</sup>.

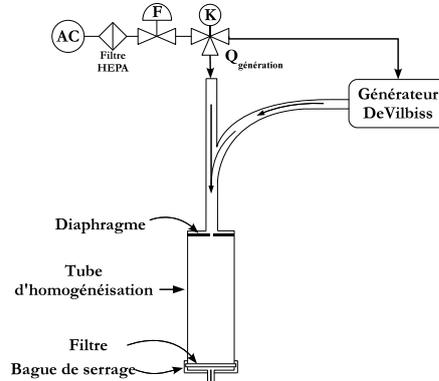


Figure 1 : Schéma du système de génération d'aérosols et de colmatage de filtres à fibres

Une électrovanne trois voies (tout ou rien) (TH Contact) contrôlée par un temporisateur (Crouzet - Syrelec n°814) permet de générer une bouffée calibrée d'aérosol qui est entraînée jusqu'au filtre via un tube d'homogénéisation. Ce tube est conçu en métal inoxydable, d'un diamètre interne de 34 mm, d'une longueur de 25 cm et est équipé d'un diaphragme d'un diamètre de 3 mm à son entrée. La totalité du débit d'air (8 L.min<sup>-1</sup>) traverse le filtre testé. Un temps de 10 secondes doit être respecté entre la génération de la bouffée et le retrait du filtre colmaté afin de garantir le dépôt total de l'aérosol sur le filtre et de limiter l'évaporation de celui-ci après collecte.

Quatre composés organiques ont été ici sélectionnés pour réalisés les tests présentés. Il s'agit de n-octanol, de n-dodécane (C<sub>12</sub>), de n-tétradécane (C<sub>14</sub>) et de n-hexadécane (C<sub>16</sub>). Ces composés produisent un aérosol polydispersé quasi identique avec en moyenne un diamètre aérodynamique massique médian de 4 µm pour un écart-type géométrique égale à 2,2.

Les masses totales d'aérosol collectées ne sont pas quantifiées car nous nous intéressons uniquement à l'évaporation de quelques gouttes ondulées déposées sur des fibres et situées dans le champ d'observation microscopique. Les générations effectuées sont donc très courtes et sont de l'ordre de 5 secondes afin de déposer suffisamment de gouttes sur le filtre pour pouvoir observer plusieurs gouttes dans le même champ optique du microscope tout en évitant au maximum les phénomènes de coalescence et d'interaction entre les gouttes.

Les filtres testés possèdent une composition de leurs fibres différentes (quartz, verre borosilicaté de différente pureté), ainsi que des efficacités différentes. Les caractéristiques de deux filtres utilisés lors des tests présentés dans ce papier, sont synthétisées dans le tableau 1 suivant :

Tableau 1 : Caractéristiques des filtres testés.

Matériau	Verre		Quartz
	A-320CW		haute qualité
Référence	Bernard Dumas S.A.		1851-037 QM-A
Fournisseur	Bernard Dumas S.A.		Whatman International Ltd
Filtre (notation)	A		W
Grammage ( $\text{g.m}^{-2}$ )	70		75
Épaisseur (mm)	0,65		0,40
Compacité	0,048		0,073
$d_{f,Davies}$ ( $\mu\text{m}$ )	5,59		0,53
$\Delta p_f$ (Pa) à $5 \text{ cm.s}^{-1}$	21,5		580
$K$ ( $\text{m}^2$ )	$2,7 \cdot 10^{-11}$		$6,4 \cdot 10^{-13}$

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

## 2. Observation des gouttes collectées sur les fibres des filtres testés

Un support de filtre a été spécialement conçu afin de pouvoir placer les filtres préalablement colmatés en mode de filtration tout en observant les gouttes déposées sur les fibres. Le dispositif créé est schématisé par la figure 2 suivante :

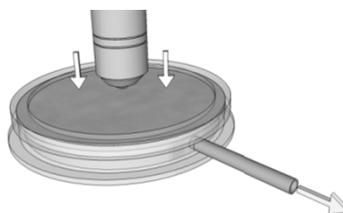


Figure 2 : Schéma du dispositif d'observation des gouttes déposées sur les fibres du filtre test.

L'air du laboratoire est donc aspiré par ce dispositif et est considéré comme pur. En effet, les vapeurs issues des filtres colmatés sont collectées par un lit de charbon actif, ce qui exclut tout risque de contamination de l'air du laboratoire. Le débit de filtration est fixé à 1 ou 2  $\text{l.min}^{-1}$  en fonction de l'essai.

Les observations microscopiques ont été réalisées uniquement sur les premières gouttes déposées sur les premières fibres du filtre. En effet, ces gouttes ont la particularité de n'être exposées qu'à de l'air pur du laboratoire contrairement aux gouttes situées en aval et qui sont exposées aux vapeurs issues des gouttes situées en amont. Les cinétiques d'évaporation ainsi mesurées correspondent à des cinétiques maximales.

Le traitement des images provenant de la caméra est réalisé par deux logiciels spécifiques (Visilog 5.4 de chez NOESIS et CamStudio). Le schéma de principe de la chaîne d'acquisition est donné dans la figure 3.

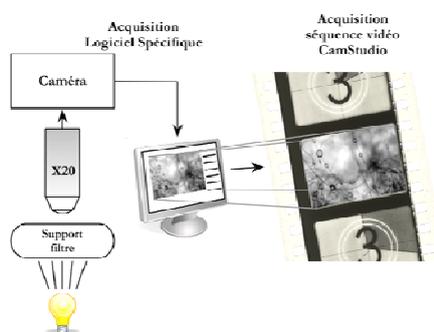


Figure 3 : Schéma de principe de la chaîne d'acquisition des séquences vidéo d'évaporation de gouttes déposées sur des fibres.

Les images extraites des acquisitions sont ensuite exploitées. Les mesures du diamètre maximal de chaque goutte ondulées observées noté  $dg$  et du diamètre de la fibre support noté  $df$  sont réalisées en fonction du temps. Le modèle de Carroll (McHale *et al.*, 1997) permet, à l'aide de ces mesures au

cours du temps, de déterminer la variation du volume des gouttes ondoïdes observées au cours de la perméation à l'air.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les suivis d'évaporation sélectionnés sont présentés dans la figure 4. Les résultats sont présentés par couple filtre-composés et chaque suivi est caractérisé par le diamètre de la fibre  $df$  et le diamètre initial  $d_g$  en micromètre.

On constate que la majorité des évolutions est linéaire sauf dans certains cas.

- *Temps d'évaporation très long* : on constate qu'en fin d'évaporation, il y a une modification du comportement d'évaporation avec une diminution de la pente et donc de la cinétique d'évaporation. Ce phénomène est en partie attribuable aux incertitudes de mesures liées aux gouttes de faibles volumes. Mais ce ralentissement de l'évaporation peut aussi être expliqué par des processus physiques mal cernés. On peut noter par ailleurs que cette réduction de la cinétique n'a lieu que pour un volume résiduel très faible (environ 15 % du volume initial).

- *Rupture de pente avec augmentation au cours de l'évaporation* : un suivi présente une rupture de pente au cours de l'évaporation : W-C14, 1,8-13,6. Ce cas se produit lorsque la goutte observée se situe à une distance suffisamment faible d'une goutte voisine pour que les vapeurs de la goutte voisine diminuent la cinétique de la goutte observée. Cette influence disparaît lorsque la goutte voisine s'est évaporée.

De façon générale, la décroissance du volume est affine avec le temps. Ceci signifie que le débit d'évaporation de la goutte  $\dot{v}_g$  ( $\mu\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) est constant au cours du temps, quel que soit le diamètre  $d_g$ .

Les auteurs proposant des modèles théoriques pour prédire l'évaporation d'aérosols collectés sur des filtres à fibres (Raynor & Leith, 1999; Zhang & McMurry, 1987) ont développé leurs calculs sur la théorie de la diffusion autrement appelée Loi de Fick. Appliquée à une goutte sphérique, l'expression du flux de vapeur  $\Phi_D$  issu de la surface de la goutte est

$$\Phi_D = 2\pi dpD(c_0 - c_\infty) \quad (1)$$

Avec  $D$  le coefficient de diffusion ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $c_0$  la concentration en vapeur à la surface de la goutte ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $c_\infty$  la concentration en vapeur dans l'environnement lointain de la goutte ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ) et  $dp$  le diamètre de la goutte (m).

Exprimée en termes de débit d'évaporation  $\dot{v}_g$  ( $\mu\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), l'expression (1) devient :

$$\dot{v}_g = 2\pi dpD(c_0 - c_\infty) / \rho \quad (2)$$

Avec  $\rho$  la masse volumique du liquide considéré ( $\text{g} \cdot \mu\text{m}^{-3}$ ).

On constate que le débit d'évaporation  $\dot{v}_g$  dépend du diamètre de la goutte supposée sphérique. Le débit d'évaporation diminue donc avec l'évaporation de la goutte. Or, les observations expérimentales vont à l'encontre d'un processus d'évaporation purement diffusionnel, où le débit d'évaporation est constant au cours de l'évaporation.

Il est intéressant de noter que les vitesses d'évaporation expérimentales sont du même ordre de grandeur que celles prévues par un processus diffusionnel pur : par exemple, pour une goutte déposée de C<sub>16</sub> de 9,8  $\mu\text{m}$  évaporant à 25°C dans un milieu gazeux supposé exempt de vapeur, le processus diffusionnel pur donne une vitesse d'évaporation de 6,5  $\mu\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  contre 1,1  $\mu\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  expérimentalement.

On constate également que les pentes des droites tracées par corrélation des points expérimentaux sont très variées. La vitesse d'évaporation semble donc être sensible à des paramètres divers non maîtrisés.

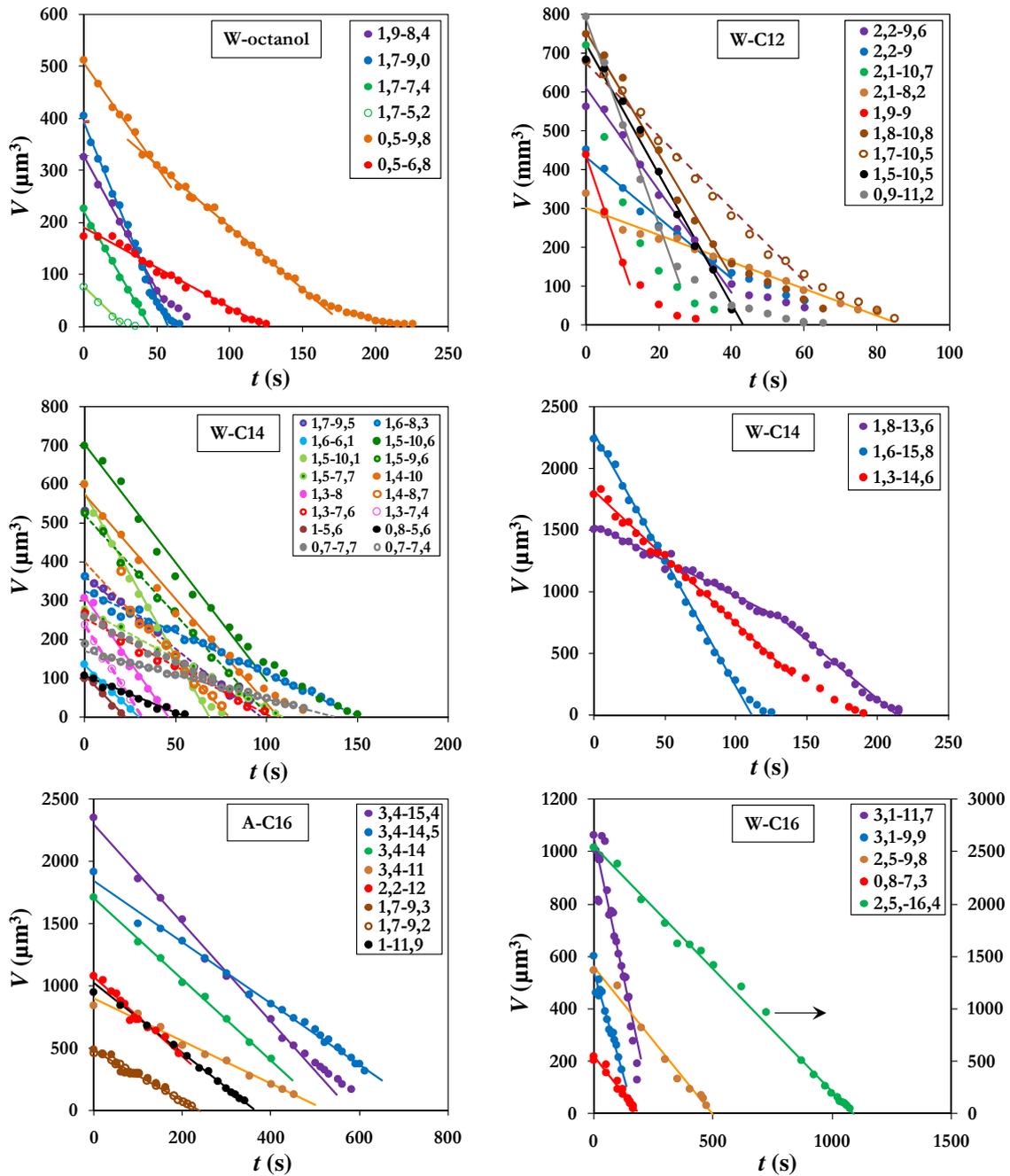


Figure 4 : Evolution du volume de goutte en fonction du temps pour tous les couples filtre-composé testés. Chaque suivi est nommé par les dimensions  $d_f$ - $d_g$  initiales correspondantes.

L'analyse des observations microscopiques a montré que les débits d'évaporation pouvaient être corrélés aux diamètres des gouttes initiaux. Ceci signifie que la cinétique d'évaporation d'une goutte est conditionnée par sa géométrie de dépôt sur la fibre support et reste constante jusqu'à la quasi disparition de celle-ci. Cette observation est un élément supplémentaire pour démontrer que l'évaporation d'une goutte déposée sur une fibre n'est pas contrôlée par un phénomène de surface contrairement à ce qui est attendu par la théorie.

## CONCLUSION

Le suivi de l'évaporation de gouttes de composés organiques semi-volatils a été réalisé à l'aide d'une méthode de microscopie optique simple et innovante. Les gouttes observées ont toutes le même type de comportement à savoir une cinétique d'évaporation constante au cours du temps à l'exception des

derniers instants de vie des gouttes. Cette cinétique est différente pour chaque couple goutte-fibre, et semble être corrélée par le diamètre initial des gouttes au moment du dépôt de celles-ci sur les fibres. Ces résultats expérimentaux vont à l'encontre de la théorie de la diffusion pure utilisée dans des modèles développés dans la littérature pour prédire le comportement d'un aérosol semi-volatile collecté sur un filtre à fibre.

D'autres observations doivent être menées pour identifier le phénomène d'évaporation mis en jeu. En effet, les expériences menées ici permettent d'invalider l'utilisation la théorie de la diffusion pour modéliser le comportement des gouttes déposées sur des fibres, mais ne permettent pas d'identifier le processus qui devient prépondérant et qui permettrait de modéliser ce comportement.

## **BIBLIOGRAPHIE**

- Davies, C.N. (1973). *Air Filtration* (Academic Press London ed.). Academic Press London, New York.
- McHale, G., K&auml;b, N., Newton, M., & Rowan, S. (1997). Wetting of a High-Energy Fiber Surface. *Journal of colloid and interface science*, **186**, 453-461.
- Raynor, P.C., & Leith, D. (1999). Evaporation of accumulated multicomponent liquids from fibrous filters. *Annals of Occupational Hygiene*, **43**, 181.
- Raynor, P.C., Volckens, J., & Leith, D. (2000). Modeling evaporative loss of oil mist collected by sampling filters. *Applied occupational and environmental hygiene*, **15**, 90-96.
- Sutter, B. (2009). *Etude de l'évaporation d'aérosols liquides semi-volatils collectés sur médias fibreux*. Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy.
- Sutter, B., Berner, D., Appert-Collin, J.-C., Thomas, D., & Midoux, N. (2010). Evaporation of Liquid Semi-Volatile Aerosols Collected on Fibrous Filters. *Aerosol Science and Technology*, **44**, 395-404.
- Zhang, X., & McMurry, P. (1987). Theoretical analysis of evaporative losses from impactor and filter deposits. *Atmospheric Environment (1967)*, **21**, 1779–1789.