



HAL
open science

Etudes des pertes par évaporation suite à la filtration d'un aérosol semi-volatile ou volatil par un média fibreux

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

► To cite this version:

Benjamin Sutter, Jean-Christophe Appert-Collin, Denis Bemer, Dominique Thomas. Etudes des pertes par évaporation suite à la filtration d'un aérosol semi-volatile ou volatil par un média fibreux. 1ères Journées Filtration des Aérosols, Jun 2007, Nancy, France. pp.C10. hal-00874469

HAL Id: hal-00874469

<https://hal.science/hal-00874469>

Submitted on 17 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 DES PERTES PAR EVAPORATION SUITE A LA FILTRATION D'UN AEROSOL SEMI-VOLATIL OU VOLATIL PAR UN MEDIA FIBREUX

B. SUTTER ^{a,b}, J.-C. APPERT-COLLIN ^a, D. BEMER ^b et D. THOMAS ^a

(a) Nancy Université, LSGC/CNRS, BP 20451, 54001 Nancy cedex
e-mail : Jean-Christophe.Appert-Collin@ensic.inpl-nancy.fr

(b) Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), BP 27, 54500 Vandoeuvre les Nancy
e-mail : Benjamin.Sutter@inrs.fr

Résumé. L'organisation du dépôt de particules d'un aérosol liquide lors de la filtration par un filtre à fibres commence à être largement étudiés et correctement identifiés. Ces études ont porté essentiellement sur les liquides non volatils. Cependant, la plupart des installations industrielles fonctionnent de façon discontinue : i.e filtration suivie d'un balayage par de l'air propre. Il est légitime de se poser la question d'un ré-entraînement sous forme vapeur dans le cas des aérosols semi volatils ou volatils. L'étude menée ici, couvre principalement l'aspect expérimental même si une modélisation simple sera présentée. Il s'agit dans un premier temps d'étudier le ré-entraînement par évaporation d'aérosols liquides modèles (alcools) initialement collectés sur un media fibreux lors d'une filtration puis balayés uniquement par de l'air propre. Divers paramètres ont été étudiés : vitesse de balayage de l'air propre, température de l'air, charge initiale du filtre. Afin de comprendre les phénomènes d'évaporation pour les faibles charges, des détecteurs de vapeurs ont été étudiés.

INTRODUCTION

Les aérosols liquides sont produits dans de nombreux secteurs d'activité. Citons les plus importants avec les brouillards d'huiles d'une part, dans les industries métallurgiques, de fabrication de machines, et de construction automobile. Selon une estimation réalisée en 1999, plus de 215000 personnes seraient exposées à ces brouillards d'huiles qui, selon leur composition, sont cancérigènes et/ou irritants [1]. D'autre part, l'épandage de pesticides sur les domaines agricoles, l'application de produits anticorrosion par pulvérisation, les bains de traitement acides, la fabrication de pigments, etc, sont autant d'activités productrices d'aérosols susceptibles d'entrer en contact avec l'homme.

L'évaluation des risques liés aux aérosols en suspension dans l'air en milieu professionnel nécessite l'échantillonnage sur un support de collecte fibreux pendant plusieurs heures [2, 3]. De même, l'épuration de l'air par captage puis filtration des brouillards s'effectue dans la majorité des cas par l'utilisation d'un média fibreux. Or, il a été observé que certains composés dits « semi-volatils » (pression de vapeur saturante inférieure au Pascal), contenus par exemple dans les brouillards d'huiles et de pesticides, peuvent s'évaporer après leur collecte sur le média filtrant [3-6]. De plus, les vapeurs issues des médias filtrants peuvent se recondenser soit sous forme d'aérosol lorsque la température diminue, soit sur les surfaces froides à proximité (sol, murs, etc) [4].

Le ré-entraînement sous forme vapeurs des composés semi-volatils collectés induit une sous-estimation de la concentration de l'aérosol dans le cas d'une évaluation d'exposition, et une surestimation de l'exposition aux vapeurs issues des filtres d'épuration lorsque l'air est recyclé.

Nous nous sommes proposés d'étudier la dynamique d'évaporation de ces aérosols liquides semi-volatils collectés sur des filtres à fibres pour développer un modèle théorique permettant d'estimer de manière fiable la perte de masse sous forme de vapeur de l'aérosol collecté, lors du passage d'air pollué ou non à travers un filtre.

Plusieurs modèles théoriques ont d'ores et déjà été développés dans la littérature. Citons ceux de Raynor *et al* [4, 5] qui, sur la base de l'équation de Maxwell, modélise l'évaporation d'un aérosol à multiples composés (huile de coupe) ; Zhang *et al* [7-9] ont développé un modèle d'évaporation d'un aérosol collecté sur un filtre à fibres, uniquement lié à la perte de charge à travers celui-ci; enfin, le modèle de Furuuchi *et al* [3] basé également sur l'équation de Maxwell, qui modélise l'évaporation d'un aérosol liquide pure et semi-volatil, collecté sur un média fibreux, mais utilisant un facteur de correction empirique. Chaque modèle est donc une partie de la solution au problème posé.

Pour développer un modèle théorique fiable, des données expérimentales doivent être fournies. Nous avons donc étudié l'évaporation d'un aérosol d'hexanol collecté sur filtre à fibres de quartz selon une méthode gravimétrique puis à l'aide d'une détection des vapeurs à l'aval du filtre par un détecteur à photo-ionisation (PID) et des capteurs à semi-conducteurs. Ce papier présente les moyens et méthodes permettant le suivi de l'évaporation de ce composé modèle, et comparera les résultats expérimentaux à un modèle d'évaporation théorique simple. Des capteurs à semi-conducteurs seront enfin testés pour évaluer leur aptitude à quantifier les vapeurs d'hexanol, afin d'être intégrés à cette étude.

MATERIELS ET METHODE

La méthode gravimétrique utilisée permet la pesée d'un filtre colmaté d'aérosol à différents temps de filtration d'air. La masse d'hexanol évaporée par le passage de l'air est donc directement accessible. Cette méthode est destinée au suivi d'évaporation de fortes charges d'aérosol collectées, ici 70 g.m^{-2} . Un suivi par détection de vapeur d'hexanol à l'aval du filtre colmaté a alors été réalisé à l'aide d'un détecteur PID.

Pour valider les méthodes de suivi, elles ont été réalisées avec les mêmes températures et vitesses de perméation d'air propre à travers les filtres. Arbitrairement, nous avons choisi trois températures d'air à l'amont du filtre colmaté de 22, 30 et 40°C et des vitesses de percolation de 1,25 ; 2,5 et 5 cm.s^{-1} représentatives des conditions d'utilisation industrielle. Les filtres utilisés sont des filtres à très haute efficacité (THE) Whatman® QM-A de diamètre 3,7 cm, et de diamètre utile déterminé à 3,4 cm.

L'évaporation d'un liquide est soumise à la concentration en vapeur de ce liquide dans le gaz environnant. Ainsi, pour observer une évaporation maximale d'un aérosol d'hexanol collecté sur un filtre, il est nécessaire d'avoir une concentration nulle en vapeur d'hexanol dans l'air situé à l'amont du filtre. Pour pouvoir obtenir cette condition, le système de colmatage du filtre en aérosol est séparé du système de perméation de l'air propre.

La configuration expérimentale pour les systèmes de colmatage et d'évaporation est synthétisée dans la Figure 1. La distribution d'air est commune aux deux systèmes. Le traitement des filtres et dessiccateurs permet d'obtenir un air exempt de pollution par les COV et de vapeur d'eau. Le système de colmatage est constitué d'un nébulisateur en verre DeVILBISS model 40 suivi d'une canalisation d'homogénéisation verticale de 30 cm au bout de laquelle est placé le filtre. L'aérosol déposé sur les filtres est légèrement polydispersé avec un diamètre massique médian égale à $3,85 \mu\text{m}$ pour un débit d'alimentation en air de 8 l.min^{-1} . Le débit d'air est maintenu constant à l'aide d'un régulateur de débit massique Brooks. Le système de génération est capable de générer environ 1 mg d'aérosol d'hexanol par seconde. Le filtre ainsi colmaté est ensuite placé dans une cassette support enveloppée par des cordons chauffant permettant de maintenir constante la température de l'air propre injecté dans celle-ci (Figure 2). L'air est préalablement chauffé par un passage dans un serpentin de 20 m plongé dans un bain d'eau thermostaté, puis est injecté dans la cassette support et traverse le filtre colmaté, permettant ainsi l'évaporation de l'hexanol collecté. Avec cette méthode, la température est régulée à $\pm 1,5^\circ\text{C}$.

Dans le cas du suivi par la méthode gravimétrique, la perméation de l'air au cours de l'évaporation de l'aérosol d'hexanol doit être interrompue pour déplacer la cassette support contenant le filtre sur le plateau d'une balance de précision Sartorius Genius (précision : 0,01 mg). La masse initiale d'aérosol collecté noté M_0 est calculée selon (1) et la masse au temps t noté $M_e(t)$ est déterminée selon (2).

$$M_0 = m_3(t_0) - (m_1 + m_2) \quad (1)$$

$$M_e(t) = m_3(t_0) - m_3(t) \quad (2)$$

Avec m_1 la masse de la cassette seule, m_2 la masse du filtre vierge, $m_3(t_0)$ la masse de l'ensemble cassette + filtre colmaté avant perméation d'air propre, et $m_3(t)$ la masse de l'ensemble cassette + filtre au temps t pendant la perméation d'air propre.

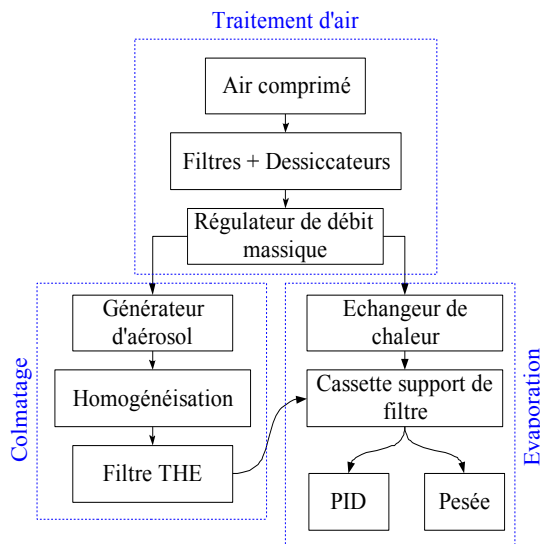


Figure 1 : Configuration expérimentale

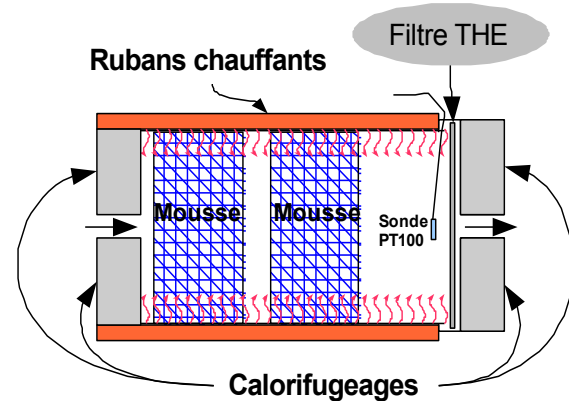


Figure 2 : Schéma conceptuel de la cassette support de filtre

La génération de l'aérosol est activée et désactivée manuellement, ce qui induit des variations sur la quantité d'aérosol collectée par les filtres entre les expériences. Pour pouvoir comparer les essais entre eux, nous calculons la masse réduite évaporée au temps t notée $M_e'(t)$ (adimensionnelle) selon l'équation (3).

$$M_e'(t) = \frac{M_e(t)}{M_0} \quad (3)$$

Le PID MiniRAE 2000 a été utilisé pour suivre l'évaporation de l'aérosol d'hexanol collecté sur filtre. Le principe de fonctionnement de ce capteur repose sur l'ionisation des molécules du gaz prélevé [10].

Du point de vue de la mise en œuvre, cet appareil est d'une utilisation relativement simple mais nécessite cependant un contrôle régulier. L'encrassement de la cellule d'ionisation de l'appareil au cours du temps provoque une dérive de l'appareil que l'on peut éliminer par un calibrage à l'isobutylène 100 ppm_v. Toutes les molécules dont le potentiel d'ionisation est inférieur au potentiel de la lampe UV de l'appareil seront détectées. Ainsi cet appareil n'est pas sélectif, et présente une sensibilité variable selon les molécules détectées. En conséquence, pour quantifier un composé dilué dans un gaz, il est nécessaire que ce composé soit le seul parmi les autres molécules du gaz à être ionisé ; nous nous plaçons dans ce cas précis, avec des vapeurs d'hexanol dans de l'air purifié.

L'appareil donne alors une réponse sous la forme d'une tension 0-5 Volts, qui est linéaire en fonction de la concentration en vapeur d'hexanol. Un étalonnage permet de corrélérer cette tension à la concentration réelle en vapeur.

Les premiers essais de détection de vapeur à une température de 30°C via le PID ont révélé une condensation importante des vapeurs d'hexanol dans l'appareil issues du filtre colmaté en phase de perméation d'air. D'autre part, nous avons démontré que le PID était plus froid que les vapeurs détectées (environ 5°C de différence) [11]. Par conséquent, les vapeurs issues du filtre colmaté sont proches ou égales à leur concentration saturante. Nous pouvons alors proposer un modèle simple d'évaporation en nous basant sur un flux maximal d'évaporation $\Phi_{M_{max}}$ nécessaire pour saturer l'air traversant le filtre (4), en prenant en compte les effets thermiques dus à l'évaporation Φ_{MT} (car

l'évaporation d'un liquide induit un refroidissement noté ΔT et modifie la pression de vapeur saturante de celui-ci) (5).

$$\Phi_{M_{\max}} = \frac{P_{v_{sat}}^T}{R.T} \cdot M \cdot Q \quad (4)$$

Avec $P_{v_{sat}}^T$ la pression de vapeur saturante de l'hexanol à la température T de l'essai (Pa), R la constante des gaz parfaits ($J.mol^{-1}.K^{-1}$), M la masse molaire de l'hexanol ($g.mol^{-1}$), et Q le débit volumique d'air traversant le filtre ($m^3.s^{-1}$).

$$\Phi_{MT} = \frac{P_{v_{sat}}^{T-\Delta T_{\max}}}{R.(T - \Delta T_{\max})} \cdot M \cdot Q \quad \text{avec} \quad \Delta T_{\max} = \frac{P_{v_{sat}}^T . L_v}{R.T . C_{p_{air}} . \rho_{air}} \quad (5)$$

L_v chaleur latente d'évaporation de l'hexanol ($J.mol^{-1}$), $C_{p_{air}}$ capacité calorifique de l'air ($J.kg^{-1}.\text{°C}^{-1}$), ρ_{air} masse volumique de l'air à la température T considérée ($kg.m^{-3}$).

ΔT_{\max} , calculé avec $P_{v_{sat}}^T$, est une surestimation de la chute de température réelle. Donc le flux théorique Φ_{MT} ainsi calculé est une sous-estimation du flux réel, mais en est la meilleure approximation par rapport à $\Phi_{M_{\max}}$.

Pour éliminer les phénomènes de condensation dans le PID, nous avons chauffé sa sonde de prélèvement à une température supérieure à la température de l'essai à l'aide d'un ruban chauffant. Un calibrage doit donc être fait dans ces conditions de chauffe pour éliminer tout effet de la température sur la lecture de l'appareil.

RESULTATS

Suivi gravimétrique et détection PID

Les premiers essais avec suivi gravimétrique ont montré que la totalité de l'aérosol collecté est ré-entraînée sous forme vapeur. Quelle que soit la charge du filtre, la vitesse d'évaporation dans la partie linéaire est la même (Figure 3), ce qui est cohérent avec le modèle décrit précédemment où le flux ne dépend que de la température et du débit d'air traversant le filtre. On observe une partie linéaire jusqu'à environ 80% de la charge initiale puis une courbe type 1^{er} ordre. Cette rupture à environ 80% de la masse totale évaporée a également été observée dans certaines publications.

Cependant, le suivi réalisé avec le PID montre que le changement de mode d'évaporation (entre linéaire et 1^{er} ordre) se produit au-delà de 95% (Figure 4). Cette différence observée est uniquement due à la méthode de suivi car aucun autre paramètre n'a été modifié. A l'heure actuelle, nous n'avons pas d'explication convenable pour comprendre cette différence.

Indépendamment du moment où se situe la transition entre les deux modes d'évaporation, nous pouvons comparer les résultats obtenus lors de la première phase d'évaporation entre les deux méthodes de suivi avec le modèle d'évaporation élaboré précédemment.

La Figure 5 présente l'évolution de la quantité d'hexanol évaporée en fonction du temps. Le modèle théorique, tracé en pointillés, est calculé pour les trois températures testées. Les évolutions expérimentales de la masse d'hexanol évaporée dans le temps (tracés continus) sont déterminées via la méthode gravimétrique et via la détection par PID pour chaque température.

Il est important de rappeler que le modèle théorique maximise les effets thermiques dus à l'évaporation, et que par conséquent, si les vapeurs sont effectivement à saturation, les courbes expérimentales d'évolution de la masse d'aérosol évaporée doivent être supérieures aux courbes théoriques.

Nous observons que pour une température ambiante de 22°C, les données expérimentales sont effectivement supérieures à la théorie. Les données issues de la détection PID sont parfaitement corrélées à la théorie contrairement à celles obtenues par gravimétrie qui sont bien supérieures.

En revanche, pour des températures égales à 30 et 40°C, la gravimétrie produit des résultats inférieurs à la théorie. La détection par PID donne des résultats en accord avec la théorie pour une température de 30°C, qui deviennent inférieurs lorsque la température est de 40°C.

Les différences importantes des résultats obtenus par méthode gravimétrique à T= 30 et 40°C avec la théorie peuvent s'expliquer par une mauvaise maîtrise des conditions thermiques de la cassette support. Une différence de température de quelques degrés entre la température cible et la température réelle induit une différence importante entre la théorie et l'expérimentation. Lorsque l'expérimentation est réalisée à température ambiante, les résultats, bien que plus élevés par rapport à la théorie, sont cohérents avec celle-ci car il n'y a pas d'action de régulation de température dans le système.

Nous avons obtenu des résultats cohérents avec la théorie pour des températures de 22 et 30°C, en utilisant une détection par PID. En revanche, pour une température de 40°C, ce n'est plus le cas. Le calibrage de l'appareil, qui doit être réalisé dans les mêmes conditions de détection que les gaz prélevés, pose vraisemblablement problème pour des températures élevées.

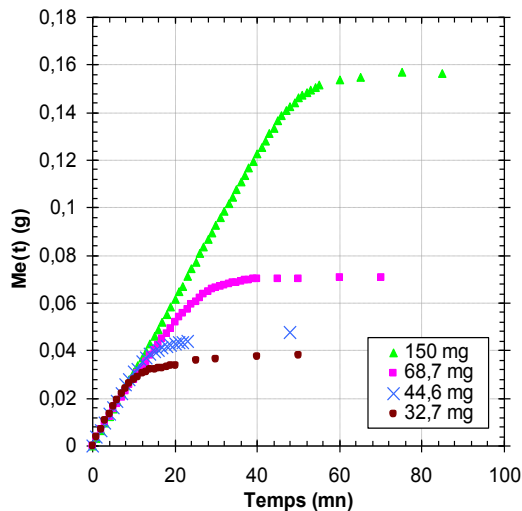


Figure 3 : Masse d'aérosol d'hexanol évaporée en fonction du temps, à vitesse de filtration constante de $1,25 \text{ cm.s}^{-1}$, à température ambiante et pour différentes charges

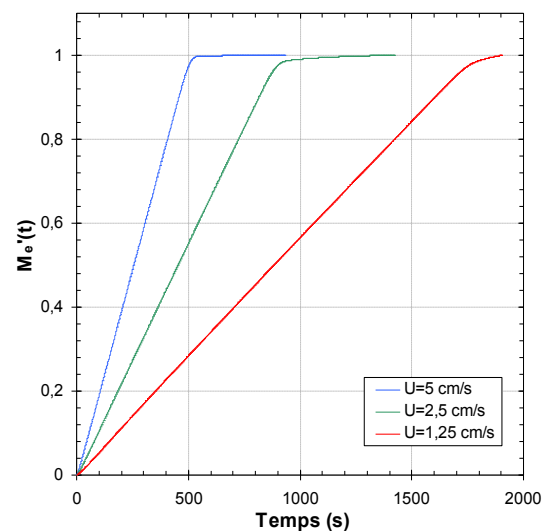


Figure 4 : Masse relative d'hexanol évaporé en fonction du temps, déterminée par détection PID, à température ambiante, pour différentes vitesses de filtration d'air propre et une masse initiale d'aérosol collectée $M_0=60 \text{ mg}$.

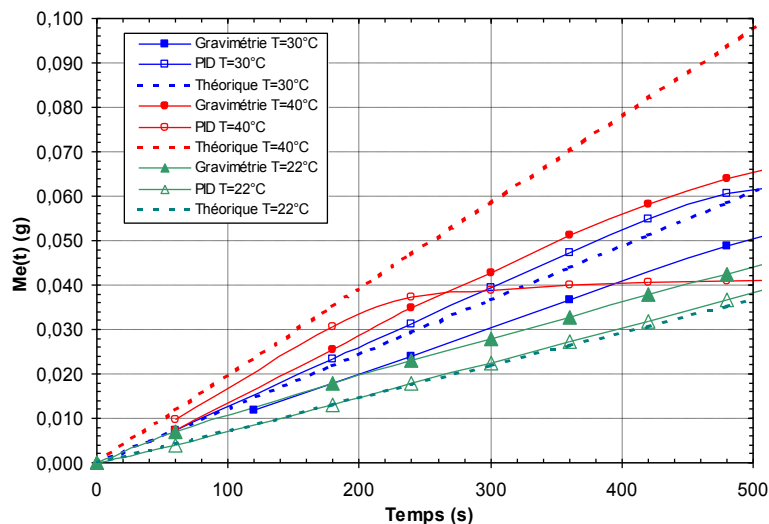


Figure 5 : Masses évaporées d'hexanol expérimentales et théoriques en fonction du temps, pour différentes températures et une vitesse de filtration d'air de $2,5 \text{ cm.s}^{-1}$.

Capteurs à semi-conducteurs

Les microcapteurs à oxydes métalliques ou semi-conducteurs ont été étudiés, suite aux problèmes de condensation des vapeurs observés dans le PID, pour suivre l'évolution de la concentration en vapeurs d'hexanol à l'aval du filtre colmaté. Ces capteurs sont commercialisés à bas coût et sont de très faible encombrement, donc facilement adaptable au système d'évaporation des aérosols utilisés. Cependant, la non sélectivité de ces capteurs ainsi que la variation de leur réponse en fonction des paramètres environnementaux auxquels ils sont exposés nous oblige à étudier en détail leurs comportements en fonction, d'une part, de la concentration en vapeur d'hexanol et d'autre part, des paramètres environnementaux tels que la température et l'humidité du gaz soumis à détection.

Le principe de fonctionnement de ces capteurs repose sur le changement de conductivité d'une couche métallique d'oxyde d'étain suite à l'adsorption de molécules réductrices ou oxydantes à sa surface. Un équilibre dynamique s'établit entre adsorption et désorption grâce à une résistance chauffante qui permet d'élever la température de la couche sensible à environ 500°C. La réponse R des capteurs est calculée selon (6).

$$R = \frac{G(X) - G(0)}{G(0)} \quad (6)$$

Avec $G(X)$ et $G(0)$ les conductances de la couche sensible à, respectivement, une concentration X et une concentration nulle en vapeur d'hexanol.

Nous avons testé 3 types de capteurs de la société FIGARO qui portent les références suivantes : TGS 2600, TGS 2620, TGS 2100. Des tests préliminaires ont permis de démontrer que ces capteurs réagissaient fortement aux vapeurs d'hexanol. Leur réponse R en fonction de la concentration en hexanol est modélisable à l'aide d'une fonction puissance.

Ces capteurs ont été exposés à des vapeurs d'hexanol ayant une concentration fixée à 80 mg.m⁻³, une température de 30°C, et une humidité relative variant 10 à 80% en fonction des besoins. Les réponses de 3 capteurs TGS 2600 et de 2 capteurs TGS 2100 ont été respectivement tracées sur la Figure 6 et la Figure 7. Les incertitudes tracées en lignes pointillées correspondent aux incertitudes maximales et minimales de l'ensemble des capteurs du même type, calculées selon la norme XP X 007-020.

Les capteurs TGS 2600 voient leur réponse diminuer de 20% lorsque l'humidité augmente de 10 à 50%. Leur réponse semble ensuite se stabiliser pour une humidité relative supérieure à 50%. Les capteurs TGS 2620 réagissent de façon identique. En revanche, les capteurs TGS 2100, de conception différente, voient leur réponse augmenter de 30% lorsque l'humidité augmente de 10 à 80%.

L'humidité des gaz détectés par ces capteurs a donc une influence importante sur la réponse des capteurs à semi-conducteurs. Mais la variation de la réponse engendrée par la variation d'humidité n'est pas la même en fonction de la conception des capteurs.

De plus, nous observons une dispersion importante des réponses entre les capteurs de même type. Il est important de préciser que chaque capteur est unique et possède sa propre sensibilité. Cependant, l'évolution de la sensibilité en fonction de l'humidité est identique entre les capteurs du même type.

La température peut aussi avoir un effet sur la réponse des capteurs. Ceci s'explique par le fait qu'avec l'augmentation de la température du mélange gazeux détecté, la vitesse de diffusion de chaque constituant augmente et donc l'équilibre dynamique d'adsorption-désorption est modifié. Pour connaître l'ordre de grandeur des variations de réponse induites par la température, les mêmes capteurs ont été exposés à des vapeurs d'hexanol à 65 mg.m⁻³ dont l'humidité absolue a été maintenue constante. Les réponses des capteurs de même type ont été moyennées et tracées sur la Figure 8.

La réponse des capteurs, quel que soit le type, augmente en fonction de la température. La différence entre la valeur maximale et minimale de chaque type est d'environ 60%, ce qui est très important. La réponse des capteurs TGS 2600 et TGS 2620 augmente fortement entre 20 et 30°C puis se stabilise au-delà de 30°C. En revanche, la réponse des capteurs TGS 2100 augmente de façon linéaire en fonction de la température.

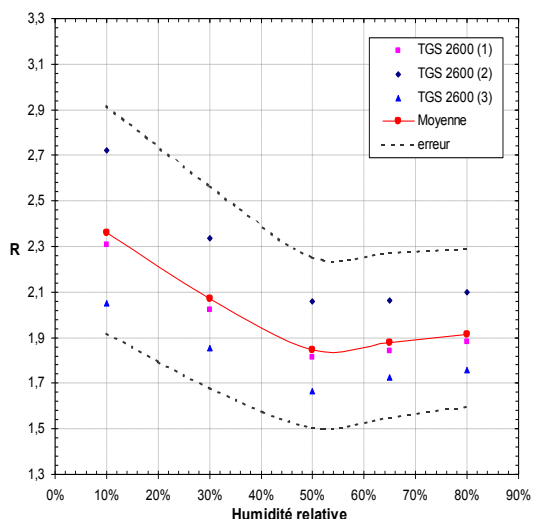


Figure 6 : Evolution de R en fonction de l'humidité pour les capteurs TGS 2600 à 80 mg.m^{-3} de vapeur d'hexanol.

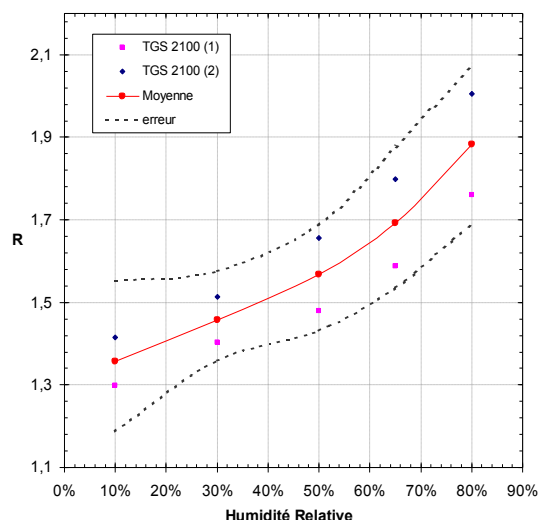


Figure 7 : Evolution de R en fonction de l'humidité pour les capteurs TGS 2100 à 80 mg.m^{-3} de vapeur d'hexanol.

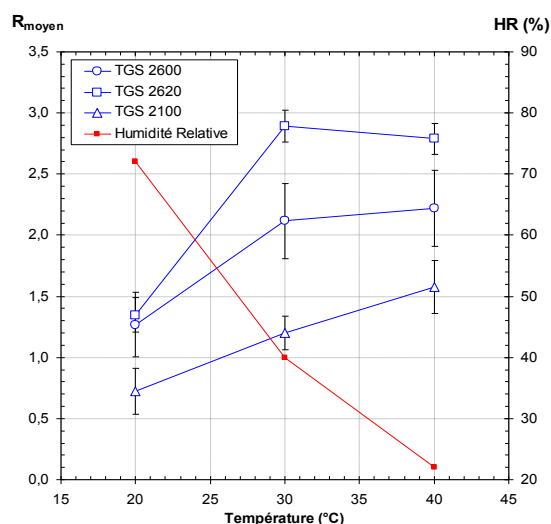


Figure 8 : Evolution de la réponse moyenne R de chaque famille de capteurs à une vapeur d'hexanol à 65 mg.m^{-3} , et pour différentes températures.

Nous avons vu précédemment que lorsque l'humidité relative diminue la réponse du capteur TGS 2100 diminue. Or, ici, la température augmente alors que l'humidité relative diminue. Par conséquent, l'augmentation de la réponse observée pour ce capteur est bien provoquée par l'augmentation de la température du gaz détecté. La même analyse pour les capteurs TGS 2600 et TGS 2620 est plus délicate. D'autres tests doivent être effectués pour dissocier les effets combinés de l'humidité et de la température.

CONCLUSION

Après avoir montré la faisabilité et l'intérêt de l'étude sur l'évaporation d'aérosols initialement collectés sur un filtre à fibres par suivi gravimétrique, ces expériences avec mesure de vapeur par photo-ioniseur demandent à être améliorées mais ont donné des résultats très intéressants. On a pu ainsi effectuer le suivi en continu de l'évaporation de l'hexanol pour différentes masses collectées et pour différentes vitesses de passage de l'air. La comparaison avec le flux maximum évaporable à saturation montre une bonne adéquation à température ambiante mais montre un léger écart à température plus élevée. L'utilisation de capteurs à semi-conducteurs, par leur plus grande sensibilité, va permettre de compléter l'étude pour de faibles masses d'aérosols déposés, des produits à faible

tension de vapeur (<100mPa). Mais l'étude de leur comportement vis à vis des paramètres environnementaux doit préalablement être approfondie.

En ce qui concerne la modélisation, il s'agira d'affiner le modèle et de se doter des modèles plus sophistiqués décrits dans la littérature. La modélisation de l'évaporation de dépôts de particules sous forme de gouttelettes sera également étudiée.

REFERENCES

- [1] LAFONTAINE M., DELSAUT P., Risques liés à l'utilisation des fluides de coupe, Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail, 186, ND 2164-186-02, (2002).
- [2] AFNOR, Atmosphère des lieux de Travail. Contrôle et caractérisation des erreurs de pesée des aérosols collectés, NF ISO 15767:2003(F), (2004).
- [3] FURUUCHI M., FISSAN H., HORODECK J., Evaporation behavior of volatile particles on fibrous filter flushed with particle-free dry air, Powder technology, 118, 1-2, 171-179, (2001).
- [4] RAYNOR P.C., COOPER S., LEITH D., Evaporation of polydisperse multicomponent oil droplets, American Industrial Hygiene Association journal, 57, 12, 1128-1136, (1996).
- [5] RAYNOR P.C., LEITH D., Evaporation of accumulated multicomponent liquids from fibrous filters, The Annals of Occupational Hygiene, 43, 3, 181-192, (1999).
- [6] RISS B., EWALD W., WILHELM H., Quantification of re-evaporated mass from loaded-mist eliminators, Journal of Environmental Monitoring, 1, 373-377, (1999).
- [7] ZHANG X.Q., MCMURRY P.H., Evaporative losses of fine particulate nitrates during sampling, Atmospheric Environment, 26A, 18, 3305-3312, (1992).
- [8] ZHANG X.Q., MCMURRY P.H., Theoretical analysis of evaporative losses of adsorbed or absorbed species during atmospheric aerosol sampling, Environmental science and technology, 25, 3, 456-459, (1991).
- [9] ZHANG X.Q., MCMURRY P.H., Theoretical analysis of evaporative losses from impactor and filter deposits, Atmospheric Environment, 21, 8, 1779-1789, (1987).
- [10] GALLAND B., COURTOIS B., Solvants organiques dans l'atmosphère des lieux de travail - Les détecteurs portables à lecture directe, Brochures INRS, ED 952, 8-9, (2005).
- [11] SUTTER B., Etude des pertes par évaporation lors de la perméation à l'air d'un filtre à fibres initialement chargé d'un aérosol semi-volatile., Rapport de stage 3^{ème} année de l'Ecole polytechnique d'ingénieur de l'Université de Savoie - Spécialité Génie de l'Environnement, 30 - 36, (2006).