

Notes techniques

AÉROSOLS SEMI-VOLATILS: DE L'IDENTIFICATION AU PRÉLÈVEMENT

Des études récentes concernant les aérosols semi-volatils ont révélé des interactions entre les particules et les vapeurs. Encore faut-il être capable d'identifier le caractère semi-volatil d'une substance pour développer une méthode de prélèvement et d'analyse prenant en compte les deux phases, particulaire et vapeur. Cet article a pour but de donner une définition adaptée de ce qu'est un aérosol semi-volatil et d'appliquer cette définition à des composés dont les méthodes de prélèvement et d'analyse ont été développées récemment à l'INRS.

DANIÈLE
JARGOT,
BENJAMIN
SUTTER
INRS,
département
Métrologie
des polluants

Le prélèvement et l'analyse d'aérosols semi-volatils, tels que les fumées de bitume ou l'acrylamide, sont des sujets relativement nouveaux par rapport au prélèvement de particules non volatiles ou de vapeurs. La définition même du terme «aérosol» a évolué en 2012 pour tenir compte des interactions entre les particules et les vapeurs situées dans leur proche environnement. Un nouveau champ de recherche et développement s'est

donc ouvert et nécessite aujourd'hui la conception de méthodes de prélèvement et d'analyse dédiées à des substances semi-volatiles.

D'une manière générale, un aérosol généré par un procédé est transporté de sa source vers l'environnement de travail en fonction des flux d'air présents. Au cours de ce transport, l'aérosol semi-volatil va évoluer en fonction des conditions environnementales rencontrées. Les particules et les vapeurs vont se disperser et se diluer dans l'air,

RÉSUMÉ

De l'identification à la publication d'une nouvelle méthode de prélèvement et d'analyse, les substances semi-volatiles imposent une attention toute particulière. En effet, la publication récente d'études dans le domaine du prélèvement et de la filtration d'aérosols semi-volatils bouleverse les pratiques établies jusqu'ici.

La conjonction entre la science de l'aérosol non volatil et celle des vapeurs est aujourd'hui en cours et a produit quelques documents de référence sous la forme de normes et d'un guide méthodologique MétroPol¹, permettant d'ores et déjà de développer des méthodes qualifiées dédiées aux aérosols semi-volatils. Il est cependant nécessaire d'identifier

au préalable cette propriété pour la substance recherchée. Pour répondre à ce besoin, des calculs théoriques simplifiés ont donc été proposés et appliqués à quatre substances suspectées d'être semi-volatiles: acrylamide, MTHPA, MHHPA et HHPA. Le développement de leur méthode de prélèvement et d'analyse est donné en exemple.

Semi-volatile aerosols: from identification to sampling

From identification to publication of a new sampling and analysis method, semi-volatile substances require very specific attention. The recent publication of studies in the field of sampling and filtering of semi-volatile aerosols has shaken up hitherto established practices. Non-volatile aerosol science and vapour

science are currently being brought together and this has produced some reference documents in the form of standards and of a "MétroPol" (pollutants metrology) methodological guide, that now make it possible to develop qualified methods dedicated to semi-volatile aerosols. However, it is necessary firstly to identify

that property for the substance being looked at. To meet this need, simplified theoretical calculations have thus been proposed and applied to four substances suspected of being semi-volatile: acrylamide, MTHPA, MHHPA and HHPA. The development of their sampling and analysis method is given by way of example.

exacerbant ainsi l'évaporation des particules (Cf. Figure 1, partie amont).

Que ce soit pour l'épuration de l'air par des systèmes de protection collectifs ou la mise en œuvre de prélèvements individuels destinés à évaluer l'exposition des salariés, les problèmes liés à la filtration d'un aérosol semi-volatile sont identiques. L'air pollué est traité par filtration pour collecter les particules de l'aérosol. La concentration particulière à l'aval du filtre va alors diminuer en fonction de l'efficacité de collecte du filtre. Cependant, les particules collectées sur le filtre ne sont pas stabilisées. Elles vont pouvoir continuer à s'évaporer lorsque l'air traversant le filtre n'est pas saturé en vapeurs. La concentration en vapeurs est bien plus élevée à l'aval du filtre qu'à l'amont, pouvant même atteindre la concentration saturante lorsque la masse de particules collectée sur le filtre est suffisante [1-4]. Tout refroidissement de l'air à l'aval du filtre va favoriser la condensation de ces vapeurs formant ainsi un aérosol dit « secondaire », généralement plus fin que celui initialement traité (Cf. Figure 1, partie aval).

Dans le cas de prélèvements individuels, la collecte des vapeurs à l'aval du média filtrant est essentielle pour ne pas sous-estimer les valeurs réelles d'exposition aux composés organiques semi-volatils (COSV).

Des modèles, fondés sur la loi de Raoult, ont été développés afin de déterminer les quantités de vapeurs émises par un filtre chargé d'un composé pur ou en mélange. Cependant, ces modèles ne sont applicables que pour des charges d'aérosols collectées sur les filtres supérieures à 1 g/m² [2]. De telles charges d'aérosols sont rarement atteintes dès le début des prélèvements individuels. Par conséquent, ces modèles sont inapplicables sur le terrain pour estimer les pertes par évaporation des particules collectées.

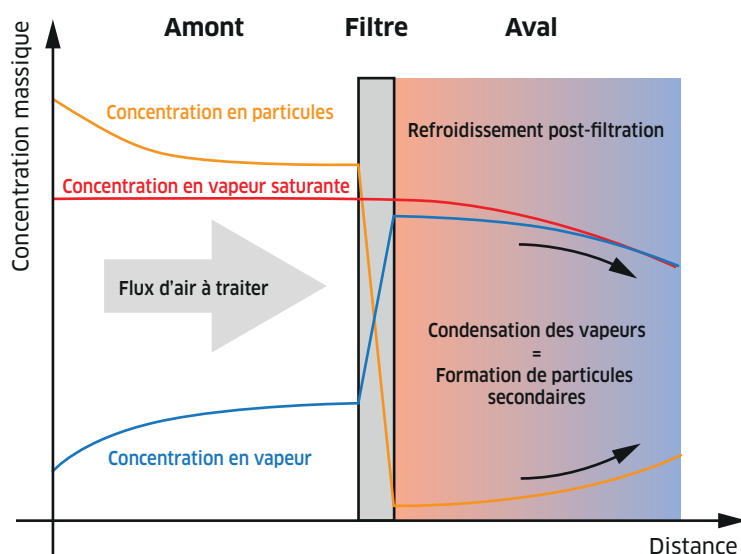
Lors d'un prélèvement individuel d'un aérosol semi-volatile, il est donc indispensable de collecter simultanément les particules et les vapeurs qui le constituent et de calculer la somme des deux fractions afin de déterminer la concentration totale du composé d'intérêt.

L'identification préalable du caractère semi-volatile d'une substance est primordiale avant de développer une méthode de prélèvement et d'analyse de cette substance selon le protocole dédié aux aérosols semi-volatils.

Définition et aide à l'identification

Bien que la dénomination de « composés organiques semi-volatils (COSV) » soit largement employée, il est très difficile d'en donner une définition consensuelle claire.

L'Agence pour la protection de l'environnement américaine (EPA) propose de définir les COSV



↑ FIGURE 1 Schéma du comportement d'un aérosol semi-volatile de l'amont à l'aval d'un média filtrant [5].

selon leur point d'ébullition, compris entre 240 et 400 °C [6]. Même si cette définition est pragmatique, elle est néanmoins imprécise.

Le paramètre physique qui mesure la capacité d'un composé à s'évaporer est la pression de vapeur saturante, notée P_{vs} et exprimée en Pascals (Pa) et non la température d'ébullition, notée T_{eb} (°C), qui définit pour une pression donnée la température à partir de laquelle la totalité du liquide passe sous forme de vapeur. Les deux paramètres sont parfois liés, mais en fonction de la nature de la molécule étudiée, ils peuvent ne pas être corrélés.

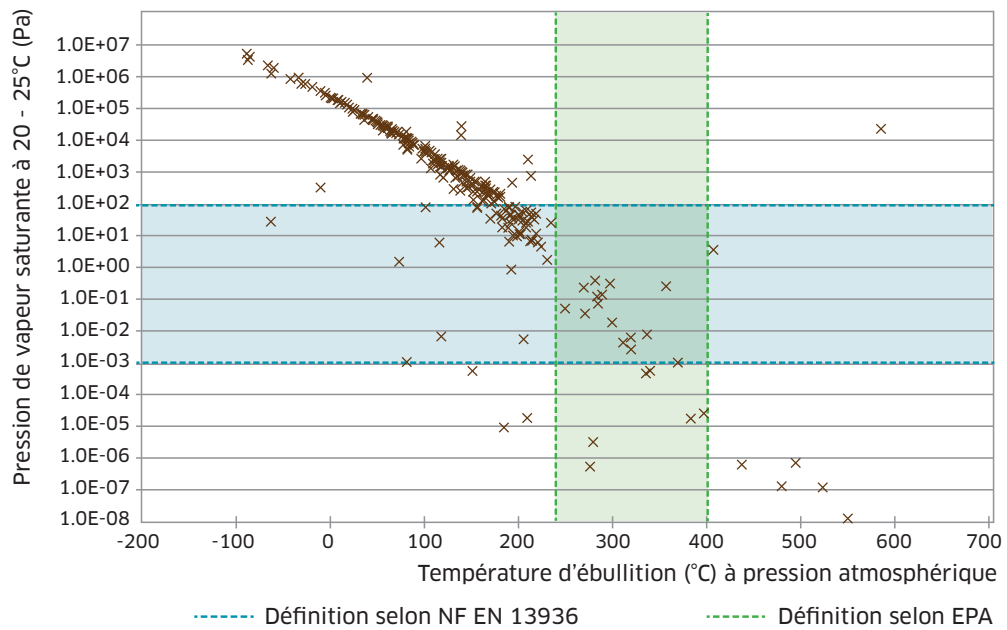
La figure 2 représente la pression de vapeur saturante en fonction de la température d'ébullition pour 254 composés présents dans la base de données Métropol¹. Une corrélation peut être observée entre les deux paramètres uniquement pour les composés les plus volatils avec $10 \text{ Pa} \leq P_{vs} < 10^7 \text{ Pa}$ et $-100^\circ\text{C} \leq T_{eb} < 240^\circ\text{C}$, même s'il existe des exceptions.

Pour ces raisons, la norme NF EN 13936 [7] propose de définir les COSV selon leur pression de vapeur saturante, comprise entre 0,001 et 100 Pa. Ce n'est cependant pas le seul paramètre à prendre en compte pour évaluer le caractère semi-volatile d'une substance. Lors de prélèvements individuels, la surface du filtre permettant la collecte de la fraction particulière ainsi que le débit et le temps de prélèvement ont une incidence sur la capacité d'une substance à se vaporiser au cours du prélèvement.

La concentration en vapeur à l'aval d'un filtre chargé de suffisamment de substance peut être proche ou égale à la concentration saturante théorique. Ainsi, en maximisant le phénomène de transfert de matière qui a lieu dans le filtre chargé et en prenant en compte le 1/10^e de la valeur limite de la substance, limite de quantification basse requise pour le développement de méthodes de



→ FIGURE 2
Pression de
vapeur saturante
en fonction de
la température
d'ébullition des
composés
présents dans la
base de données
MétroPol.



prélèvement et d'analyse, un coefficient de semi-volatilité σ (sans unité) peut être calculé d'après l'équation suivante:

$$\sigma = \frac{m_{\text{max.evaporable}}}{m_{\text{min.quantifiable}}} = \frac{P_{vs} \cdot M \cdot Q \cdot t}{R \cdot T} \times \frac{1}{C_{VL} \cdot Q \cdot t} = \frac{10 \cdot P_{vs} \cdot M}{R \cdot T \cdot C_{VL}}$$

avec P_{vs} (Pa) la pression de vapeur saturante de la substance déterminée à la température ambiante du prélèvement, M ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) la masse molaire de la substance, Q ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$) le débit de prélèvement, t (min) le temps de prélèvement, R (égale à $8,314 \text{ Pa} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) la constante des gaz parfaits, T (K) la température ambiante et C_{VL} ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) la concentration correspondant à la valeur limite de la substance.

Le coefficient de semi-volatilité σ permet de déterminer la limite entre la non-volatilité et la semi-volatilité d'une substance. Cette limite peut être fixée à $\sigma = 0,1$, correspondant à une perte massique maximale acceptable de 10 % d'une masse correspondant à $1/10^6$ de la valeur limite.

Cependant, la limite entre semi-volatilité et volatilité ne peut pas être fixée par σ . En revanche, le temps de vie d'un aérosol avant évaporation totale est à mettre en relation avec le temps de transfert de celui-ci depuis sa source jusqu'au salarié potentiellement exposé. Lorsque le temps de vie est inférieur au temps de transfert, l'aérosol généré peut être considéré comme volatil et seule la phase vapeur peut être prélevée. Dans le cas contraire, les deux phases doivent être prélevées.

Le temps de transfert d'un aérosol peut être extrêmement variable en fonction de la distance entre la source et le salarié et des conditions de ventilation de l'air du lieu de travail. Néanmoins, en première

approximation, le temps de transfert est de l'ordre de la seconde lorsque le salarié est très proche de la source et peut aller jusqu'à plusieurs heures, voire l'infini, dans le cas de grands halls non ventilés.

Ainsi, dans un cas très général, un temps de vie d'une seconde d'une particule de $100 \mu\text{m}$, qui est la limite haute de la taille d'une particule d'aérosol, peut constituer une limite maximaliste entre volatilité et semi-volatilité.

Sur la base de simulations d'évaporation de substances peu volatiles, les calculs du temps de vie d'une particule composée de telles substances ($P_{vs} \leq 100 \text{ Pa}$) peuvent être simplifiés par l'équation suivante qui donne un ordre de grandeur du temps de vie de la particule lorsque celle-ci est portée par un air exempt de vapeur:

$$t_{\text{vie}} = \frac{dp^2 \cdot \rho \cdot R \cdot T}{8 \cdot D \cdot P_{vs} \cdot M} = \frac{dp^2}{P_{vs}} \cdot 0,36$$

avec t_{vie} (s), dp (μm) le diamètre de la particule considérée, ρ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) la densité de la substance à l'état liquide ou solide, D ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) le coefficient de diffusion des vapeurs de la substance dans l'air, et la constante de conversion égale à $0,3587 \text{ Pa} \cdot \text{g} \cdot \text{m}^5 \cdot \text{s}^{-1}$. Pour résumer et en généralisant:

- si le temps de vie d'une particule de $100 \mu\text{m}$ est inférieur à une seconde, la substance est volatile. Le prélèvement de la seule phase vapeur est préconisé;
- si le temps de vie d'une particule de $100 \mu\text{m}$ est égal ou supérieur à une seconde, la substance peut être semi-volatile ou non volatile. Il faut alors considérer la valeur de σ ;
- si $\sigma \geq 0,1$: la substance doit être considérée comme semi-volatile. Les fractions particulaires

	ACRYLAMIDE	MTHPA	MHHPA	HHPA
N° CAS	79-06-1	11070-44-3	25550-51-0	85-42-7
Formule chimique brute	C ₃ H ₅ NO	C ₉ H ₁₀ O ₃	C ₉ H ₁₂ O ₃	C ₈ H ₁₀ O ₃
M (g/mol)	71,1	166,2	168,2	154,2
PVs (Pa)	0,9	0,44	0,3	7,12
Teb (°C) (pression atmosphérique)	175 - 300 (décomposition)	157	290	296
Densité (kg/l)	1,13	1,21	1,15	1,19
Cvl (mg/m ³)	0,3	0,05*	0,05*	0,05*
σ (-)	875	6003	4143	90119
t _{vie} (s)	3986	8152	11957	504

* Valeur limite arbitraire déterminée sur la base d'effets irritants observés dans la littérature et des valeurs constatées en entreprise.

← TABLEAU 1
Exemples de
calculs pour
l'identification
du caractère
semi-volatile de
substances.

et vapeurs doivent être prélevées et collectées par le dispositif de prélèvement;

- si $\sigma < 0,1$: la substance est considérée comme non volatile. Le prélèvement de la seule phase particulaire est préconisé.

Dans certains cas, pour des molécules nouvelles ou peu utilisées, P_{US} , indispensable à ces calculs, n'est pas disponible. Il est alors nécessaire de procéder au test empirique préconisé par la norme NF EN 13936 [7] pour évaluer la volatilité de la substance.

De l'identification au développement de la méthode de prélèvement et d'analyse

Quatre agents chimiques ont fait l'objet d'un développement de méthode de prélèvement et d'analyse à l'INRS. Il s'agit de l'acrylamide et de trois anhydrides d'acide: anhydride méthyl-tétrahydroptalique (MTHPA), anhydride méthyl-hexahydroptalique (MHHPA) et anhydride hexahydroptalique (HHPA).

L'application des calculs présentés précédemment a permis d'identifier le caractère semi-volatile de ces substances. Le tableau 1 synthétise les données utilisées ainsi que les résultats des calculs.

Dans le cas de l'acrylamide, nous avons:

$$\sigma = \frac{10 \times 0,3 \times 71,1}{8,314 \times 293 \times 0,3} = 875$$

$$\text{et } t_{\text{vie}} = \frac{100^2}{0,9} \times 0,3587 = 3986 \text{ s.}$$

Pour ces quatre molécules, les données physiques nécessaires aux calculs sont disponibles sur des bases de données en libre accès. Ainsi, il n'est pas nécessaire de procéder au test empirique préconisé par la norme NF EN 13936. Les résultats des calculs démontrent que les quatre substances doivent bien être considérées comme des composés semi-volatils et donc être prélevées et analysées comme telles. Il est toutefois possible que la température ambiante (20°C) prise en compte dans les calculs ne soit pas celle rencontrée sur le terrain.

Lorsque la température réelle est plus élevée, il est probable que l'aérosol puisse se volatiliser plus rapidement que prévu et inversement. Néanmoins, la température réelle de l'environnement de travail est rarement connue et stable.

Ainsi, l'utilisation d'un dispositif de prélèvement dédié aux aérosols semi-volatils pour prélever un aérosol devenu non volatil, dans le cas de températures très basses en hiver, ou s'étant évaporé complètement, dans le cas des températures élevées en été, est une sécurité pour le bon déroulement du prélèvement quelles que soient les conditions environnementales rencontrées.

Exemples de développements récents de méthodes

Cas de l'acrylamide

L'acrylamide est un exemple qui illustre parfaitement la problématique. Ce composé cancérigène, par ailleurs très réactif et hygroscopique, présente la particularité de se sublimer à la température ambiante et peut être émis lors de sa production industrielle, pendant la fabrication et la mise en œuvre de polyacrylamides, mais également par cuisson de certains aliments au-dessus de 120°C. La méthode MétroPol 082: 2008, désormais abrogée, avait été développée en l'absence de connaissances sur le comportement réel de la substance

↓ FIGURE 3
Dispositif de
prélèvement
nouvellement
développé pour
le prélèvement de
l'acrylamide dans
l'air.



© INRS



dans l'air. L'adsorbant proposé, la résine hydrophobe Amberlite XAD[®]2, permettait de prélever la substance uniquement en phase vapeur. La révision de cette méthode entreprise en 2016 a porté sur le choix d'un support de collecte mieux adapté, constitué d'une cassette fermée contenant un filtre en fibres de quartz pour la collecte de la fraction particulaire inhalable, associée en série à un tube contenant deux plages d'Amberlite[®] XAD[®]7, une résine hydrophile, pour le piégeage des vapeurs (Cf. Figure 3).

Le dispositif a été testé en situation réelle sur une gamme étendue de concentrations et dans des conditions ambiantes extrêmes. Une limite de quantification abaissée et l'absence de perturbation sur la rétention de l'acrylamide en présence d'autres copolluants ou de l'humidité de l'air, ont été démontrées. La position horizontale de la cassette associée au tube maintenu verticalement pouvait, par contre, gêner l'activité des salariés équipés d'un masque de protection à cartouche filtrante. Son positionnement a donc été repensé (Cf. Figure 4).

Toutes les mesures ont montré que les salariés pouvaient être exposés, avec des niveaux de concentration proches ou dépassant la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) actuelle. La méthode a été validée pour des concentrations de 3 à 600 µg/m³ pour 480 l d'air prélevés et peut donc être proposée comme référence européenne dans la perspective d'un abaissement de la VLEP à 30 µg/m³.

Cas des anhydrides hydrophthaliques: MTHPA, HHPA, MHHPA

Les anhydrides d'acide sont des composés très réactifs, largement utilisés dans l'industrie des matières plastiques, comme durcisseurs à chaud pour la synthèse des résines époxydiques. Des manifestations respiratoires, provoquées par leur inhalation sous forme de particules en suspension ou de fumées,

sont rapportées dans la littérature dès les concentrations de l'ordre de 50 µg/m³. Les tableaux 66 et 66bis des maladies professionnelles du régime général concernent les travaux exposant à l'inhalation de ces anhydrides d'acide, dits volatils, cités dans la liste candidate des substances préoccupantes du règlement Reach. En 2015, les entreprises utilisatrices se sont inquiétées de l'absence de méthode de mesurage dans la base de données MétroPol.

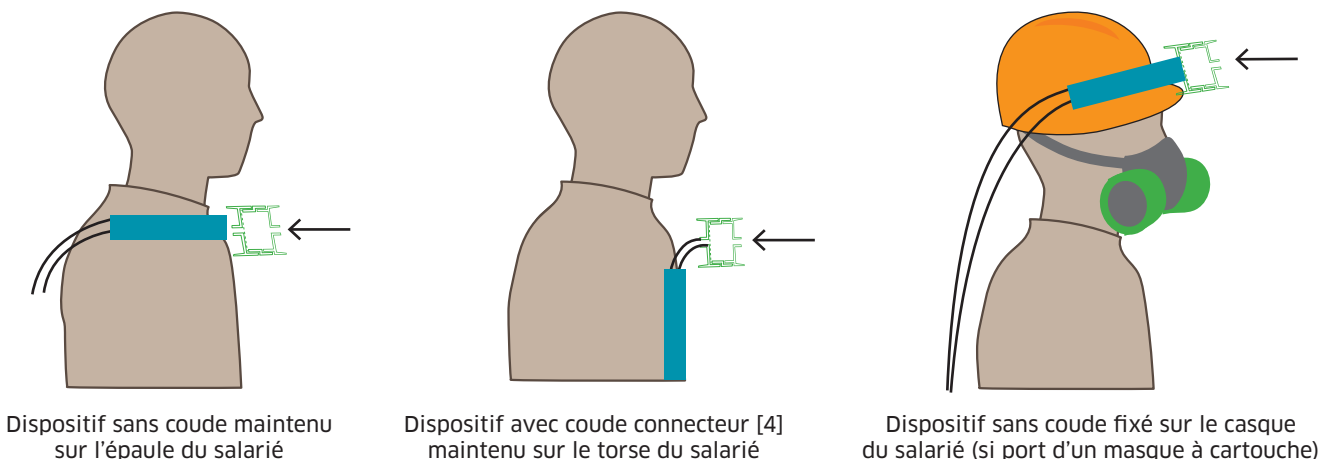
Une méthode de prélèvement et d'analyse avait précédemment été développée selon le protocole dédié aux « gaz et vapeurs », mais son transfert à destination des laboratoires extérieurs à l'INRS n'avait pas abouti, compte tenu de la trop grande variabilité des résultats de mesure et du non-respect des critères de performance habituellement acceptés [8].

Leur caractère semi-volatil et le recensement des procédés de fabrication pouvant exposer les opérateurs à ces anhydrides montrent que ces composés se retrouvent dans l'air sous forme d'un aérosol de vapeurs et de particules ou de gouttelettes et exigent que les méthodes soient validées en conséquence [9].

Les méthodes publiées dans MétroPol, M-305 [10], M-417 [11], M-418 [12] et M-419 [13], comprennent un prélèvement au travers d'une cassette contenant un filtre imprégné d'un réactif de dérivation et permettent la mesure de concentrations comprises entre 200 µg/m³ et 8 mg/m³ de MTHPA seul ou bien entre 40 µg/m³ et 2 mg/m³ d'anhydrides lorsque qu'ils sont utilisés en mélange. Elles répondent à la préconisation de la norme NF EN 13936 [7] et du guide méthodologique dédié aux aérosols semi-volatils de MétroPol [9], sans chercher à quantifier séparément les différentes formes sous lesquelles la substance pourrait avoir été prélevée.

Les difficultés rencontrées lors de la mise en œuvre de ces méthodes sont nombreuses:

↓ FIGURE 4
Exemples de montage de la cassette fermée (dans la sphère des voies respiratoires) à privilégier selon les cas.



- grande réactivité chimique des anhydrides et compétition au cours de la dérivation sur le filtre entre les deux, voire trois espèces, quand des mélanges de durcisseurs sont utilisés;
- compétition des deux formes sous lesquelles le ou les composés ont été collectés, par volatilisation des particules au cours du prélèvement;
- utilisation industrielle des mélanges d'isomères cis- et trans- du 4-MHHPA, et existence d'autres isomères pour lesquels les mesures dans l'air nécessitent d'optimiser la séparation HPLC, afin qu'ils soient tous bien repérés et différenciés des interférents présents dans le blanc de laboratoire. Ces contraintes imposent, pour l'exactitude des mesures, que les étalons soient préparés exactement dans les mêmes conditions que les échantillons et que la droite d'étalonnage soit adaptée à chaque anhydride. Les performances restent donc en deçà du niveau d'exigence habituellement attendu pour les gaz et vapeurs, et sont prises en compte pour le calcul d'incertitude sur les résultats de mesure.

Conclusion et perspectives

L'étude bibliographique et l'analyse théorique du comportement de l'aérosol semi-volatile dans l'air ont permis l'élaboration d'équations relativement simples à mettre en œuvre pour caractériser la volatilité d'une substance.

Lorsqu'une substance est identifiée comme semi-volatile, la méthode de prélèvement doit nécessairement comporter un élément filtrant dédié à la collecte des particules et un élément absorbant ou réactant pour la collecte des vapeurs (qui peut être intégré au premier élément filtrant).

La norme NF EN 13936 [7] ainsi que le guide méthodologique « *Guide pour la mise au point*

des méthodes de prélèvement et d'analyse d'aérosols organiques semi-volatils dans l'air des lieux de travail » [9] donnent les exigences et les essais à réaliser pour l'élaboration de la méthode. Le résultat de quantification final doit uniquement être la somme des quantifications réalisées sur tous les supports de collecte du dispositif de prélèvement. L'évaporation des particules collectées sur le filtre au cours du prélèvement ou la condensation des vapeurs sur les supports de prélèvement ne sont actuellement pas modélisables.

Ainsi, seule la quantité totale de substance (particules + vapeurs) constitue une valeur fiable.

Sur la base de ces documents, quatre méthodes ont été développées pour prélever et analyser l'acrylamide, le MTHPA, le MHHPA et le HHPA.

Une étude théorique a démontré que la phase particulaire et la phase vapeur d'une substance semi-volatile n'ont pas les mêmes effets attendus sur la santé [14]. En effet, une particule, lorsqu'elle est inhalée et collectée dans les poumons, apporte une quantité de matière condensée bien plus importante que la phase vapeur qui va pouvoir être exhalée en partie. Ainsi, les effets sur la santé peuvent être d'importance variable pour une même substance selon sa forme, particulaire ou vapeur. À terme, il devient nécessaire de connaître précisément et sans biais les quantités de particules et de vapeurs présentes dans l'air inhalable des salariés. Les dispositifs de prélèvement actuels ne le permettent pas aujourd'hui. Cependant, des dispositifs de prélèvement « dichotomiques » sont en cours d'étude et de prototypage, afin de répondre à cette nouvelle contrainte. ●

1. *MétoPol est un recueil de méthodes d'évaluation de l'exposition professionnelle validées par l'INRS, accessible librement sur le site www.inrs.fr*

BIBLIOGRAPHIE

[1] RAYNOR P.C. AND LEITH D., Evaporation of accumulated multicomponent liquids from fibrous filters. *Annals of Occupational Hygiene*, 1999. 43(3): p. 181-192.

[2] SUTTER B. ET AL., Evaporation of Liquid Semi-Volatile Aerosols Collected on Fibrous Filters. *Aerosol Science and Technology*, 2010. 44(5): p. 395-404.

[3] RISS B., WAHLMÜLLER E. AND HÖFLINGER W., Quantification of re-evaporated mass from loaded fibre-mist eliminators. *Journal of environmental monitoring: JEM*, 1999. 1: p. 373-377.

[4] DRAGAN G.C. ET AL., An evaluation of the "gGP" personal samplers under semi-volatile aerosols: sampling losses and their implication on occupational risk assessment. *Environ. Sci. Process and Impacts*, 2015. 17(2): p. 270-277.

[5] RISS B., WAHLMÜLLER E. AND HÖFLINGER W., Quantification of re-evaporated mass from loaded fibre-mist eliminators. *J. Environ. Monit.*, 1999. 1(4): p. 373-377.

[6] Environmental Protection Agency. Technical Overview of Volatile Organic Compounds. Available from: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds>.

[7] AFNOR, NF EN 13936 - Exposition sur les lieux de travail - Mesurage de l'agent chimique sous forme de mélange de particules aériennes et de vapeur - Exigences et méthodes d'essai, 2014: Saint-Denis, FR.

[8] INRS, *Guide pour la mise au point des méthodes de prélèvement et d'analyse des gaz et vapeurs organiques dans l'air des lieux de travail*, 2015, INRS, Paris.

[9] INRS, *Guide pour la mise au point des méthodes de prélèvement et d'analyse d'aérosols organiques semi-volatils dans l'air des lieux de travail*, 2015, INRS, Paris.

[10] MTHPA méthode M-305. MétoPol. Métrologie des polluants. INRS, 2017.

[11] MHHPA méthode M-417. MétoPol. Métrologie des polluants. INRS, 2017.

[12] HHPA méthode M-418. MétoPol. Métrologie des polluants. INRS, 2017.

[13] Mélange d'anhydrides HHPA et MHHPA méthode M-419. MétoPol. Métrologie des polluants. INRS, 2017.

[14] VOLCKENS J., Partitioning Theory for Respiratory Deposition of Semivolatile Aerosols. *Annals of Occupational Hygiene*, 2003. 47(2): p. 157-164.