



A. CAURANT

Développement d'un matériau de référence pour la mesure du benzène dans l'air sur cartouche de Carbopack X

Development of a reference material for the monitoring of benzene in air onto Carbopack X tube

Adrien CAURANT^{1,2}, Béatrice LALERE¹, Marie-Caroline SCHBATH¹, Tatiana MACE¹, Christophe SUTOUR¹, Christelle STUMPF¹ et Sophie VASLIN-REIMANN¹

¹ Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE), 1 Rue Gaston Boissier, 75724 Paris Cedex 15, France, beatrice.lalere@lne.fr

² Laboratoire inter-universitaire des systèmes atmosphériques (LISA), UMR 7583, Université Paris 12, Faculté des Sciences et Technologie, 61 Avenue du Général de Gaulle, 94010 Créteil Cedex, France.

Résumé

La qualité de l'air constitue l'une des préoccupations majeures de notre société. Parmi les nombreux composés susceptibles de jouer un rôle sur la santé, les composés organiques volatils (COV) font partie des polluants les plus suivis et réglementés. En France, la surveillance des COV dans l'air ambiant peut être réalisée par prélèvement d'air ambiant sur cartouches de charbon actif sur une période donnée (7 ou 14 jours) par les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA). Cette méthode est constituée de deux parties : d'une part, le prélèvement d'air par des échantillonneurs réalisé par les AASQA et d'autre part, l'analyse de ces prélèvements par des laboratoires d'analyse pouvant être les AASQA elles-mêmes. Pour pouvoir garantir la fiabilité de leurs résultats de mesure, ces laboratoires d'analyse doivent s'assurer de la traçabilité de leurs analyses et valider leurs protocoles analytiques : ceci peut être réalisé en utilisant des matériaux de référence certifiés (MRC). Or, actuellement, il n'existe pas, en France, de matériaux de référence disponibles pour la mesure des COV dans l'air ambiant par prélèvement sur cartouche de charbon actif. C'est pourquoi le LNE a proposé de développer un système de chargement de cartouches en benzène à partir d'un matériau de référence gazeux, afin de pouvoir disposer de cartouches de référence qui pourront être ensuite utilisées notamment pour l'étalonnage des systèmes analytiques et pour l'évaluation des performances des laboratoires à l'analyse des prélèvements de benzène. Après cette phase de développement, le LNE a organisé une comparaison interlaboratoire basée sur la mise en œuvre de ces cartouches de référence, avec des laboratoires experts : il n'apparaît pas de différence significative entre les masses déposées et les masses analysées par les laboratoires. La comparaison permet donc de valider la méthode de chargement développée au LNE.

MOTS CLÉS : MÉTROLOGIE CHIMIQUE, MATÉRIAUX DE RÉFÉRENCE, QUALITÉ DE L'AIR, BENZÈNE, ESSAI INTERLABORATOIRE.

Abstract

Air quality is a major social issue. Among the many compounds that could be harmful for Human health, Volatile Organic Compounds (VOCs) belong to the most monitored and regulated pollutants. In France, the monitoring of VOCs in ambient air is carried out by sampling air onto activated carbon cartridges during a given period (7 or 14 days) by the "Associations Agréées de Surveillance de la Qualité de l'Air" (AASQA). This method consists of two parts: sampling and analysis. To ensure the reliability of their measurement results, laboratories must guarantee the traceability of their analysis and validate their analytical protocols: this can be done by the use of Certified matrix Reference Materials (CRMs). However, in France, no reference materials are available for the measurement of VOCs in air onto sorbent tubes. Therefore, LNE developed a system for loading benzene, from a gaseous reference material onto Carbopack X tubes. These CRMs could be used for the calibration of analytical systems and for the evaluation of analytical laboratories. After this development phase, LNE has organized a proficiency testing between three expert laboratories, based on the implementation of these materials: it shows no significant differences between analyzed masses and loaded masses for each participating laboratories.

KEY WORDS: CHEMICAL METROLOGY, REFERENCE MATERIAL, AIR MONITORING, BENZENE, INTERLABORATORY COMPARISON.

1. Contexte et objectif de l'étude

De nos jours, la surveillance de la qualité de l'air fait partie des préoccupations majeures de notre société en matière d'environnement et de santé. Elle doit être réalisée aussi bien dans l'air ambiant (émission industrielle, trafic automobile. . .) que dans les atmosphères intérieures. En effet, la majorité des individus passent plus de 90 % de leurs temps dans des environnements clos ou semi-clos où ils sont exposés à une multitude de polluants chimiques gazeux ayant des origines très diverses (bâtiments, équipements, environnement extérieur, comportements des occupants) [1].

Les composés organiques volatils (COV) font partie des polluants les plus suivis et réglementés en raison de leur toxicité et de leur récurrence. C'est notamment le cas du benzène, qui a été reconnu comme substance cancérigène pour l'Homme selon la classification européenne et selon le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC). Il possède d'ores et déjà une valeur limite d'exposition en air ambiant ($5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) ainsi qu'un ensemble de valeurs guides de qualité d'air intérieur déterminé en fonction des expositions (ex : $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ pour une durée d'exposition supérieure à un an).

En France, la surveillance du benzène dans l'air ambiant est réalisée par les associations agréées de surveillance de la qualité de l'air (AASQA), par prélèvement sur cartouches de charbon actif. D'après l'annexe VII de la directive 2000/69/CE du 16 novembre 2000 [2] concernant les valeurs limites pour le benzène et le monoxyde de carbone dans l'air ambiant, la méthode de référence pour le prélèvement et l'analyse du benzène dans l'air est « l'aspiration de l'échantillon sur un tube adsorbant, suivie d'une détermination par chromatographie en phase gazeuse ». Suite à cette directive, les normes CEN 14662 concernant la mesure de la concentration en benzène dans l'air ambiant ont été élaborées. Les parties 1, 2 et 3 [3, 5] de cette norme sont dédiées à l'échantillonnage actif, alors que les parties 4 et 5 [6, 7] sont dédiées à l'échantillonnage passif.

Le principe de la méthode décrite dans la norme 14662-1 comprend 2 étapes :

- **le prélèvement** : un volume mesuré d'échantillon d'air est prélevé à travers un tube adsorbant. Si l'adsorbant est choisi de manière appropriée, le benzène est retenu par l'adsorbant ;
- **l'analyse** : les composés piégés sur l'adsorbant sont désorbés thermiquement et sont transférés par un gaz vecteur inerte dans un chromatographe en phase gazeuse couplé à d'un détecteur à ionisation de flamme. L'étalonnage peut être réalisé par voie liquide (solution étalon), par voie gazeuse (mélange gazeux étalon) ou par désorption de tubes dopés (dopage liquide ou gazeux).

Ainsi, dans le but de valider la justesse des méthodes utilisées par les AASQA, d'assurer la traçabilité de leurs mesures et de pour pouvoir comparer les résultats des

différentes études menées, il est nécessaire de disposer, de références communes, traçables au Système international d'unités (SI) et permettant de valider l'ensemble du processus analytique. C'est le rôle des matériaux de référence certifiés (CMR). Or, à ce jour, très peu de matériaux de référence de ce type sont disponibles pour l'analyse des COV dans l'air.

C'est pourquoi le LNE a proposé de développer un système de chargement de ces cartouches en benzène à partir d'un matériau de référence gazeux, afin de pouvoir disposer de cartouches de référence qui pourront être utilisées soit pour valider l'étalonnage des systèmes analytiques, soit pour évaluer la justesse des méthodes d'analyse.

Cet article décrit le système de chargement de cartouches adsorbantes en benzène mis en place au LNE. Il présente l'étude de faisabilité du CMR et les résultats obtenus lors d'un essai interlaboratoire réalisé entre les membres du Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA). Cet essai a permis de valider le système développé.

2. Les cartouches de référence

2.1. Description des cartouches

Les caractéristiques des cartouches adsorbantes ont été déterminées en se basant sur de précédents essais réalisés par le LCSQA [8, 9] et sur la norme NF EN 14662-1. Des tubes en acier inoxydable de type Perkin-Elmer ont été remplis par la société TERA Environnement avec 500 mg de Carbopack X (adsorbant sélectionné en raison de ses propriétés [10]). Les cartouches adsorbantes ainsi préparées ont ensuite été dopées par le LNE avec des masses de benzène de l'ordre de 500 ng, correspondant à la masse de benzène prélevée par la méthode de référence, lorsque la cartouche est exposée à la valeur limite d'exposition en air ambiant ($5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

2.2. Description du traitement préalable

Il est absolument nécessaire de disposer de matériaux parfaitement « propres » pour le chargement, car il faut :

- pouvoir contrôler précisément la quantité de benzène déposée sur la cartouche ;
- obtenir des masses de benzène inférieures à 2 ng dans l'échantillon de blanc, comme le précise la norme NF EN 14662-4.

Les cartouches subissent alors une phase de conditionnement (plusieurs cycles de désorption durant 20 min à 400°C à un débit de $100 \text{ ml}\cdot\text{min}^{-1}$ d'hélium [3]). Ensuite, les cartouches sont fermées hermétiquement à l'aide de bouchons en laiton munis de férules en téflon, puis placées au réfrigérateur à 4°C , afin d'éviter toute contamination de l'adsorbant.

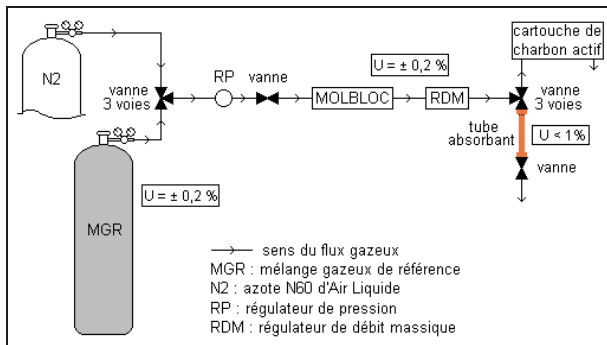


Fig. 1. – Système de chargement des cartouches.

2.3. Description de la méthode de chargement

2.3.1. Principe

Cette étape est réalisée en faisant circuler au travers des cartouches conditionnées un matériau de référence gazeux dont le flux est contrôlé et mesuré à l'aide d'un débitmètre de précision « Molbloc » (DHI) [11].

L'incertitude relative liée à la mesure du débit massique est de l'ordre de $\pm 0,2\%$ relatif sur ce type de débitmètre. Celle-ci correspond à une incertitude deux à cinq fois plus faible que celle généralement constatée sur les débitmètres massiques classiques.

L'utilisation de cet appareil permet donc de connaître de façon très précise la masse de gaz entraînée au travers des cartouches et ainsi, déterminer plus précisément la masse de benzène déposée sur la cartouche de référence.

2.3.2. Conditions opératoires

Avant le chargement, par souci d'homogénéité de température, les cartouches sont placées à température ambiante. Ensuite, afin de respecter les conditions de qualité des blancs prescrites dans la norme, la teneur en benzène des cartouches est contrôlée par analyse. Si la quantité mesurée est inférieure à 2 ng, la cartouche peut alors être chargée. Un schéma du système de chargement est représenté sur la figure 1.

Pendant le chargement des cartouches, le système est balayé en continu par un flux de benzène provenant d'un matériau de référence certifié gazeux MRC 1 ($366,07 \pm 0,75$) nmol·mol⁻¹ fabriqué par gravimétrie au LNE. En dehors des phases de chargement, le système est traversé en continu par de l'azote.

Lors du chargement, la cartouche est positionnée de façon à ce que l'entrée du flux du MRC 1 se fasse par l'extrémité avec encoche de la cartouche. La désorption thermique de la cartouche doit être réalisée dans le sens inverse à celui du chargement, afin de faciliter la désorption des composés (Fig. 2).

Après chargement, la cartouche est déconnectée du système puis fermée à l'aide des bouchons en laiton (Fig. 3) et conservée à 4 °C.

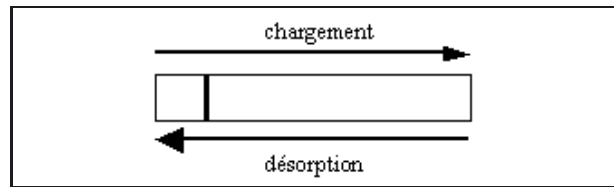


Fig. 2. – Sens de chargement et de désorption des cartouches.



Fig. 3. – Cartouche de référence.

2.4. Calcul de la masse de benzène déposée

Les masses de benzène déposées sur les cartouches de référence de Carbopack X se calculent à partir de la relation (1) :

$$m_{\text{ben}} = \frac{C \times M_{\text{ben}} \times (x + E_{\text{op}} - E_{\text{air}})}{M_{\text{N}_2}} \quad (1)$$

Avec :

m_{ben} La masse de benzène contenue dans la cartouche de référence (ng) ;

C La concentration en benzène du matériau de référence certifié gazeux (nmol·mol⁻¹) ;

M_{ben} La masse molaire du benzène (g·mol⁻¹) ;

x La masse de gaz du matériau de référence certifié déterminée par le débitmètre « Molbloc » (mg) ;

E_{op} L'effet opérateur (mg), lié à l'ouverture et à la fermeture des vannes, traduit l'influence de l'opérateur sur la masse du matériau de référence gazeux traversant les cartouches. Il est estimé lors des essais. La correction apportée est de 0 mg du mélange gazeux associée à une incertitude correspondant à 0,75 s, soit 0,7 mg du mélange gazeux ;

E_{air} Biais (mg) lié au volume d'air présent dans le raccord d'entrée (masse du matériau de référence gazeux) ;

M_{N_2} La masse molaire de l'azote (g·mol⁻¹).

L'incertitude associée au dopage des cartouches de référence est calculée en utilisant la loi de propagation des incertitudes décrite dans la norme NF ENV 13005. Elle s'écrit selon l'équation (2) :

$$u_{m_{\text{ben}}}^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial m_{\text{ben}}}{\partial x_i} \right)^2 \times u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \left(\frac{\partial m_{\text{ben}}}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial m_{\text{ben}}}{\partial x_j} \right) u(x_i, x_j) \quad (2)$$

Tableau 1

Description du calcul d'incertitude réalisé pour le chargement d'une cartouche de référence.

Variable	Unité (variable et incertitude)	Valeur	Incertitude type	Contribution à l'incertitude type (%)
C	$\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$	366,07	0,38	17
M_{ben}	$\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$	78,111 8	0,002 0	0
M_{N_2}	$\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$	28,013 40	0,000 28	0
x	mg	491,54	0,84	46
E_{op}	mg	0,0	0,70	33
E_{air}	mg	0,54	0,24	4

Avec :

$u_{m_{\text{ben}}}$ L'incertitude type associée à la masse de benzène déposée sur la cartouche de référence (ng) ;

m_{ben} La masse en benzène déposée sur la cartouche de référence (ng) ;

x_i Les différentes variables ;

$u(x_i)$ L'incertitude type associée aux différentes variables ;

$u(x_i, x_j)$ La covariance entre les différentes variables.

Le tableau 1 présente les valeurs et les incertitudes types des différentes variables contribuant à la détermination de la masse de benzène déposée sur une cartouche de référence.

L'incertitude associée au dopage tient compte des différentes sources d'incertitude intervenant dans le chargement de la cartouche de référence. L'incertitude relative élargie ($k = 2$) obtenue sur la masse de benzène déposée sur les cartouches est inférieure à 1 %.

3. Production d'un lot de cartouche

Un lot de cartouches chargées a été analysé afin d'évaluer la justesse de la méthode ainsi que l'homogénéité du lot préparé.

3.1. Dopage d'un lot de cartouches de référence

Neuf cartouches de référence contenant 500 mg de CarboPack X ont été chargées en benzène avec le matériau de référence certifié gazeux MRC 1 ($366,07 \pm 0,75$) $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ en suivant le protocole décrit précédemment.

3.2. Analyse des cartouches de référence

3.2.1. Système analytique utilisé

Le système analytique utilisé est un TurboMatrix ATD 50 Perkin-Elmer relié à un chromatographe en phase gazeuse AutoSystem XL Perkin-Elmer couplé à un détecteur à ionisation de flamme (ATD/GC/FID).

3.2.2. Méthode utilisée

L'étalonnage du système analytique a été réalisé par désorption de cartouches étalons chargées par voie gazeuse à partir d'un deuxième matériau de référence certifié gazeux MRC 2 ($372,29 \pm 0,77$) $\text{nmol}\cdot\text{mol}^{-1}$ fabriqué par gravimétrie au LNE, indépendamment du MRC 1.

Neuf cartouches étalons (3×3 niveaux) ont été chargées à partir du MRC 2 pour obtenir des masses de benzène de 415,2 ng, 519,0 ng et 622,8 ng sur l'adsorbant.

Ces cartouches étalons ont été ensuite utilisées pour l'étalonnage du système analytique.

3.2.3. Incertitude sur la masse de benzène analysée

L'incertitude sur la masse de benzène analysée est calculée en tenant compte de la régression linéaire, la répétabilité, la dérive analytique et des étalons. L'incertitude relative élargie ($k = 2$) obtenue est de l'ordre de 3,6 %, sur l'ensemble de gamme d'étalonnage évaluée.

3.3. Comparaison des masses déposées et analysées

Le tableau 2 présente les masses de benzène déposées (MD) et celles analysées (MA), avec leurs incertitudes associées, ainsi que les écarts relatifs calculés entre les MD et les MA pour chacune des cartouches de référence ($\frac{MA-MD}{MD} \times 100$).

Pour chacune des cartouches de référence, les masses de benzène déposées ne sont pas significativement différentes de celles analysées. En effet, les écarts relatifs obtenus sont très faibles (2 %), et aléatoirement positifs et négatifs.

Ces résultats permettent de constater la bonne répétabilité analytique ($CV \approx 0,9$ %) que l'excellente répétabilité de la méthode de chargement des cartouches de référence ($CV \approx 0,2$ %).

Cette étude a donc permis de développer une méthode de chargement fiable, permettant la fabrication de cartouches de référence de benzène, et une méthode d'analyse performante (ATD/GC/FID).

Tableau 2

Masses déposées, masses analysées et écart relatifs obtenus pour les neuf cartouches chargés.

Cartouche de référence	Masse déposée (MD)		Masse analysée (MA)		Ecart relatif (%)
	Valeur (ng)	Incertitude élargie (ng)	Valeur (ng)	Incertitude élargie (ng)	
1	501,2	2,5	504	18	0,7
2	500,4	2,5	491	18	-1,9
3	500,3	2,5	500	18	0,0
4	503,6	2,5	505	18	0,4
5	500,8	2,5	506	18	1,0
6	500,0	2,5	501	18	0,2
7	500,7	2,5	505	18	0,9
8	500,2	2,5	499	18	-0,3
9	500,4	2,5	501	18	0,0
CV (%)	0,2	-	0,9	-	-

CV = coefficient de variation.

4. Essai interlaboratoire

Une comparaison interlaboratoire a été organisée en interne entre les trois membres du Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA), afin d'évaluer la méthode de chargement et de comparer les laboratoires experts entre eux.

4.1. Organisation de la comparaison

Cette étude s'est déroulée de la façon suivante :

- 27 cartouches de référence ont été chargées en benzène à partir du MRC 1 fabriqué par gravimétrie au LNE et en suivant le protocole décrit précédemment ;
- 9 de ces cartouches de référence et une cartouche non chargée, notée « blanc », ont été envoyées à chaque partenaire LCSQA (LNE, INERIS, EMD) ;
- 8 de ces cartouches de référence, ainsi que la cartouche notée « blanc » ont été analysées par chaque laboratoire ;
- la cartouche de référence restante pour chaque laboratoire a été renvoyée au LNE pour analyse afin d'estimer l'influence du transport sur la masse de benzène déposée ;
- chaque participant a précisé, lors du rendu des résultats, le système analytique utilisé, la méthode d'étalonnage, le protocole analytique suivi et les calculs d'incertitude réalisés ;
- les résultats obtenus par les 3 entités participantes ont été ensuite comparés à la masse déposée.

4.2. Résultats des laboratoires

Lors de l'analyse des cartouches, les laboratoires participants ont utilisé des méthodes d'étalonnage et des modes opératoires différents.

La figure 4 représente les écarts relatifs entre la masse de benzène déposée et celle analysée pour chaque

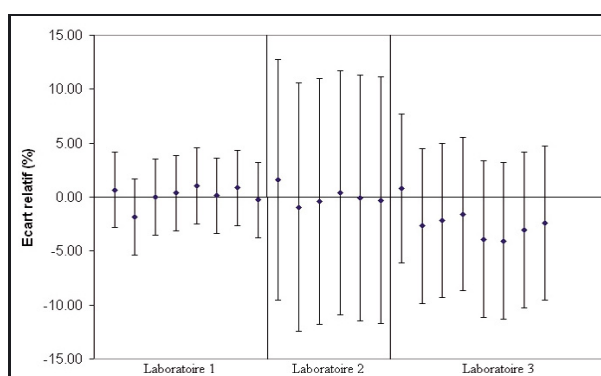


Fig. 4. – Ecart relatif entre la masse de benzène déposée et celle analysée lors de l'étude de faisabilité.

cartouche de référence. Les résultats de deux des huit cartouches de référence du participant 2 n'ont pas été communiqués en raison d'un problème rencontré lors de l'analyse.

Les barres représentées sur ce graphique correspondent aux incertitudes élargies ($k = 2$) calculées par les différents participants.

Les trois participants ont obtenu, aux incertitudes près, des masses analysées équivalentes aux masses déposées. La dispersion interlaboratoire est légèrement plus élevée que la dispersion intralaboratoire. Toutefois, elle reste inférieure (environ 5 %) à celles obtenues par les laboratoires réalisant des analyses pour les AASQA (>10 %).

Pour estimer les incertitudes sur la masse de benzène analysée, les trois laboratoires se sont basés sur le guide d'incertitudes rédigé par le LCSQA en 2007 [12]. Les sources d'incertitudes identifiées par les participants sont la régression linéaire, la répétabilité, la dérive analytique, les étalons et l'efficacité de désorption. Le laboratoire 1 est le seul participant n'ayant pas considéré l'efficacité de désorption comme faisant partie des sources d'incertitude liées à la masse de benzène analysée, car il a considéré

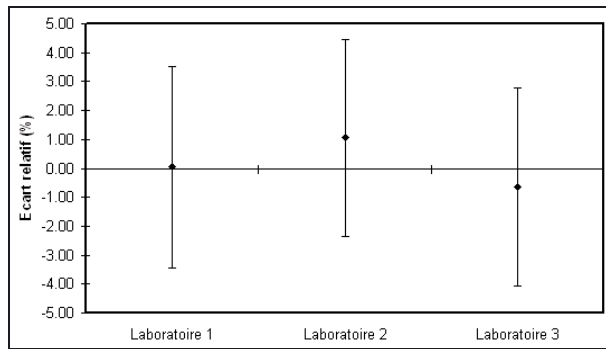


Fig. 5. – Ecart relatif entre la masse de benzène déposée et celle analysée par le LNE pour les cartouches de référence de transport.

qu'elle était déjà prise en compte dans la régression linéaire (étalonnage par tubes dopés). Cette particularité pourrait expliquer les écarts des incertitudes constatés entre le laboratoire 1 et les deux autres. De plus, l'étalonnage réalisé par le laboratoire 2 a été réalisé par l'analyse de cartouches chargées par vaporisation d'une solution alors que les deux autres laboratoires ont utilisé des cartouches chargées par voie gazeuse, entraînant ainsi une incertitude plus importante.

4.3. Influence du transport

L'analyse des cartouches de référence non désorbées, renvoyées au LNE, a permis de déterminer l'influence des conditions de stockage et du transport sur la masse de benzène piégée.

La figure 5 présente les écarts relatifs entre les masses de benzène déposées et celles analysées par le LNE.

Les écarts relatifs calculés pour ces cartouches de référence sont du même ordre de grandeur que ceux trouvés pour les cartouches de référence n'ayant pas subi de transport.

Il n'y a donc pas d'influence significative du transport sur la masse de benzène piégée sur les cartouches de référence de Carbopack X. D'autant plus que ces cartouches de référence ont subi deux transports (aller/retour), à température ambiante et ont été analysées plus d'un mois après leur chargement.

5. Conclusion

Une méthode de chargement de matériau de référence a été développée au LNE, pour la mesure du benzène dans l'air. Le système utilisé pour le chargement des matériaux de référence permet de contrôler précisément et de façon répétable (incertitude élargie, $k = 2$, de 0,2 %) la masse d'un mélange gazeux de référence gravimétrique traversant les cartouches de Carbopack X. La valeur gravimétrique assignée au matériau de référence en benzène pro-

duit est de 500 ng avec une incertitude élargie ($k = 2$) de 2,5 ng.

Un lot de ces matériaux de référence à matrice a alors été produit afin d'organiser une intercomparaison entre laboratoires experts. Les résultats obtenus lors de cet essai ont permis de mettre en évidence l'homogénéité du lot de cartouche produit ainsi que de leur stabilité sur un mois (temps de réalisation de l'intercomparaison).

Ces matériaux de référence ont également pu être valorisés lors d'un essai d'aptitude organisé par le LCSQA, visant à évaluer les performances de 8 laboratoires, à la mesure de benzène sur cartouches adsorbantes [13]. De plus, une campagne internationale EURAMET, entre plusieurs laboratoires internationaux de métrologie, est en cours de développement, afin d'assurer la traçabilité au Système international d'unités, des matériaux de référence produits par le LNE.

Références

- [1] BOITEAU HL., "Air pollution due to "Do-it-yourself" activities at home", *Aerobiologia*, 7, 1991, 17-22.
- [2] Directive 2000/69/CE du Parlement européen et du Conseil du 16 novembre 2000 concernant les valeurs limites pour le benzène et le monoxyde de carbone dans l'air ambiant.
- [3] Afnor NF EN 14662-1, novembre 2005, "Qualité de l'air ambiant – Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration en benzène – Partie 1 : Prélèvement par pompage suivi d'une désorption thermique et d'une analyse par chromatographie en phase gazeuse".
- [4] Afnor NF EN 14662-2, novembre 2005 "Qualité de l'air ambiant – Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration en benzène – Partie 2 : prélèvement par pompage suivi d'une désorption au solvant et d'une méthode de chromatographie en phase gazeuse".
- [5] Afnor NF EN 14662-3, décembre 2005 "Qualité de l'air ambiant – Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration en benzène – Partie 3 : prélèvement par pompage automatique avec analyse chromatographique en phase gazeuse sur site".
- [6] Afnor NF EN 14662-4, novembre 2005, "Qualité de l'air ambiant – Méthode normalisée pour le mesurage des concentrations en benzène – Partie 4 : échantillonnage par diffusion suivi d'une désorption thermique et d'une chromatographie en phase gazeuse".
- [7] Afnor NF EN 14662-5, novembre 2005, "Qualité de l'air ambiant – Méthode normalisée pour le mesurage de la concentration de benzène – Partie 5 : prélèvement par diffusion suivi d'une désorption au solvant et d'une chromatographie gazeuse".
- [8] LOCOGE N. et al., "Projet de guide de recommandations concernant la mesure du benzène dans l'air ambiant", Rapport LCSQA, 2007.

- [9] LOCOGE N. et al., "Surveillance du benzène par la méthode d'échantillonnage actif : Application de la norme 14662-1", Rapport LCSQA, 2007.
- [10] MARTIN NA., MARLOW DJ., HENDERSON MH., GOODY BA. et QUINCEY PG., "Studies using the sorbent Carbopack X for measuring environmental benzene with Perkin-Elmer-type pumped and diffusive samplers", *Atmospheric Environment*, **37**, 2003, 871-879.
- [11] Afnor NF X43-055, 2007, "Air ambiant – Métrologie appliquée au mesurage des polluants atmosphériques gazeux – Prélèvement d'air ambiant et mise en oeuvre des gaz d'étalonnage".
- [12] Afnor FD X43-070-5, 2008, "Qualité de l'air – Guide pratique pour l'estimation de l'incertitude de mesure des concentrations en polluants dans l'air ambiant – Partie 5 : estimation des incertitudes sur les mesurages de benzène réalisés sur site par pompage suivis d'une désorption thermique et d'une analyse chromatographique en phase gazeuse".
- [13] CAURANT A., SCHBATH MC., STUMPF C., LALERE B., MACE T. et SUTOUR C., "Surveillance du benzène – Développement de cartouches de référence (rapport 1/4)", Rapport LCSQA, novembre 2008.

Article reçu le 15 janvier 2010, version révisée reçue le 19 juillet 2010.