

OPTIMISATION DE LA MESURE *IN SITU* DES FILTRES THE (ISO 16170:2016) : DEVELOPPEMENT ET ÉVALUATION D'UNE CANNE D'INJECTION GARANTISSANT UNE DISPERSION HOMOGÈNE

S. El Gouadi¹, D. Sainte-Marie¹, S. Rasolonjatovo¹, A. Ndour¹, S. Lackner^{*1} et O. Witschger²

¹Tech Systèmes, 10 bd Louise Michel, 91000 Evry Courcouronnes

²OWxygen, 1 rue de la Placette du Plan, 30170 Saint Hippolyte-du-Fort

*Courriel de l'orateur : s.lackner@techsystemes.fr

TITLE

Optimizing *In situ* HEPA Filter Measurement (ISO 16170:2016): Design and Assessment of an Injection Probe for Homogeneous Dispersion

RESUME

Les filtres à Très Haute Efficacité (THE) sont des éléments clés pour la maîtrise des contaminants particuliers, notamment dans le secteur nucléaire. Pour le contrôle de leur performance, la norme NF EN ISO 16170: 2016 impose une condition fondamentale d'homogénéité de l'aérosol traceur injecté lors des essais *in situ* souvent difficile à respecter sur le terrain. En effet, une part importante des réseaux de ventilation ont des géométries qui ne favorisent pas l'homogénéisation des particules injectées dans le flux d'air. Dans ce contexte, l'objectif de notre étude était de concevoir et de valider une canne d'injection multipoints, la canne SIPA, afin d'assurer une dispersion homogène de l'aérosol d'essai en amont des filtres, réduisant significativement l'exigence des longueurs de mélange et des dispositifs de mélange passifs. Les résultats expérimentaux ont montré que la canne SIPA atteint une très bonne uniformité (déviations relatives moyennes $\leq 9\%$ pour toutes les configurations testées) dans des conditions aérodynamiques variées. Ces performances sont nettement supérieures à celles d'une canne droite conventionnelle qui atteint des valeurs jusqu'à 74% dans les mêmes conditions. En conclusion, la canne SIPA représente une avancée significative pour la conformité et la fiabilité des essais THE *in situ*.

ABSTRACT

High-Efficiency Particulate Air (HEPA) filters, are key components for controlling particulate contaminants, particularly in the nuclear sector. For performance testing, the NF EN ISO 16170: 2016 standard imposes a fundamental requirement for the homogeneity of the tracer aerosol during *in situ* tests, which is often challenging to achieve on site. Indeed, a significant proportion of ventilation systems have geometries that do not promote the homogenization of particles injected into the airflow. In this context, the objective of our study was to design and validate a multi-point injection probe, the SIPA probe, to ensure homogeneous dispersion of the test aerosol upstream of the filters, significantly reducing the required mixing lengths and passive mixing devices. Experimental results demonstrated that the SIPA probe achieves excellent uniformity (average relative deviation $\leq 9\%$ for all tested configurations) under varied aerodynamic conditions. These performances are significantly superior to those of a conventional straight probe which achieves values up to 74% under the same conditions. In conclusion, the SIPA probe represents a significant advance for the compliance and reliability of THE *in situ* testing.

MOTS-CLES : Filtre THE, homogénéité aérosol, normalisation

KEYWORDS: HEPA Filters, Aerosol Homogeneity, Standardization

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Les filtres à Très Haute Efficacité (THE, ou HEPA) sont largement déployés dans l'industrie pour la maîtrise des contaminants particuliers et assurent la protection des opérateurs, des procédés, de l'environnement et des populations, notamment dans des secteurs tels que l'agro-alimentaire, l'industrie pharmaceutique, la microélectronique, les établissements de santé ou encore le nucléaire. Plus spécifiquement dans le contexte nucléaire, la contribution des filtres THE au maintien du confinement des radionucléides est cruciale en conditions normales comme en situation incidentelle, puisqu'ils assurent le piégeage des aérosols radioactifs. Les environnements concernés sont les laboratoires, les installations d'entreposage et de stockage des déchets et les situations de démantèlement.

La recherche et développement a été très fournie ces dernières décennies pour étudier la performance des filtres THE, non seulement en laboratoire, mais aussi *in situ* (IRSN, 2021). Les travaux *in situ* sont d'une importance essentielle puisqu'ils reflètent la performance réelle des systèmes une fois intégrés dans leur environnement opérationnel. Cette connaissance approfondie a conduit à l'élaboration de normes décrivant notamment des méthodes d'essais pour le mesurage de la performance des filtres THE, comme les normes NF EN ISO 16170: 2016, NF EN ISO 29463-1: 2022 ou NF EN 1822-1: 2019.

La norme NF EN ISO 16170: 2016 décrit deux méthodes d'essai *in situ* pour les systèmes filtrants THE dans les installations industrielles visant un essai d'intégrité ou un essai de quantification de l'efficacité à visée réglementaire. Dans les deux méthodes, pour que les mesures soient valides, la norme impose une condition fondamentale : la concentration en aérosol traceur injecté doit être homogène au point de prélèvement amont, c'est-à-dire en aval de la sonde d'injection, comme illustré sur la Figure 1.

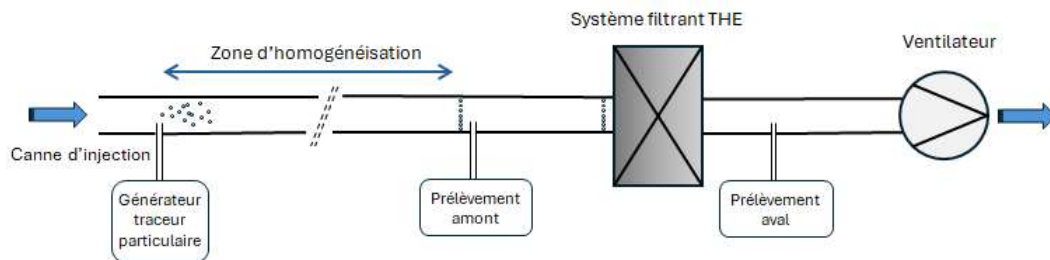


Figure 1: Illustration d'un essai d'évaluation de performances pour un système filtrant THE, d'après la norme NF EN ISO 16170: 2016.

L'homogénéité de l'aérosol d'essai, exigée par la norme pour la validité de la mesure, repose théoriquement sur le respect de longueurs de mélange ou l'implantation de systèmes d'homogénéisation passifs. Cependant, les contraintes d'implantation dans les installations nucléaires et industrielles existantes rendent ces solutions bien souvent irréalistes. Ces configurations non optimales engendrent donc des conditions de flux non conformes à la norme NF EN ISO 16170: 2016. Les audits de terrain menés par Tech Systèmes confirment cette problématique, révélant que plus de 50% des réseaux examinés présentent des configurations de gaines et des conditions aérauliques défavorables.

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est de concevoir et de valider expérimentalement une canne d'injection permettant de garantir une dispersion homogène de l'aérosol d'essai.

2. MOYENS D'ESSAIS ET METHODOLOGIE

Dénommée SIPA, la canne d'injection développée par Tech Systèmes est une canne à injection multipoints dont la configuration a fait l'objet d'un dépôt de brevet (250676419 - 06/2025). Dans cette étude, les performances de dispersion de la canne SIPA sont comparées à la canne d'injection largement déployée dans l'industrie, dite « canne conventionnelle ». Cette dernière est un simple tube droit (diamètre interne 23 mm) positionnée de telle sorte que le plan de sortie de la canne soit au centre de la gaine, à 90° de l'écoulement incident.

Les expérimentations ont été menées dans le banc d'essais BREATHE (Bench for Research and Experimental Analysis of Treatment for Homogenization and Emissions) de Tech Systèmes. Illustré sur la Figure 2, le banc a une longueur totale d'environ 25 m. Il s'agit d'une gaine de section circulaire (diamètre interne 313 mm) dont la configuration comprend plusieurs longueurs droites, un coude à 180° et un caisson de filtration THE. L'air filtré en entrée est véhiculé par un ventilateur centrifuge en extraction. La gamme de vitesse de l'air est comprise entre ~ 1 et ~ 17 m/s.

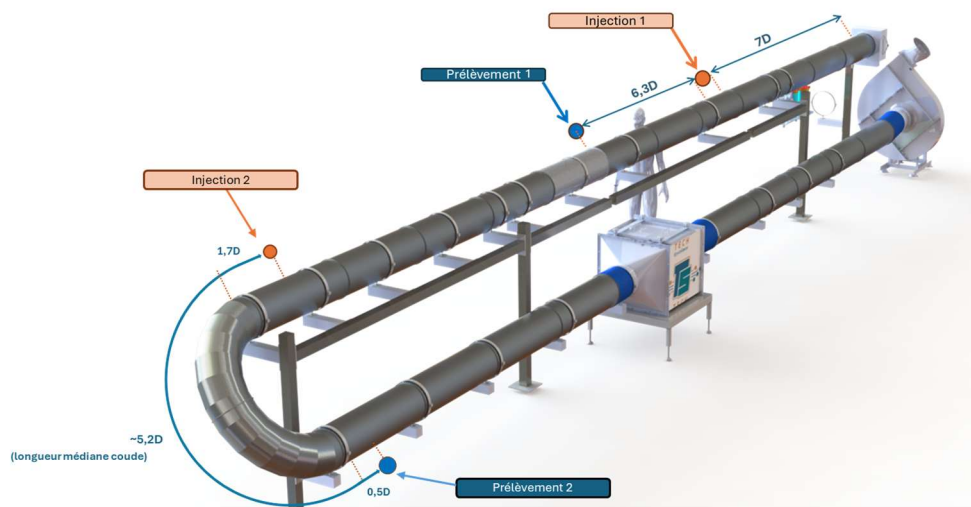


Figure 2 : Banc d'essais aéraulique BREATHE mis en œuvre pour l'étude. Localisation des points d'injections de l'aérosol d'essais et des plans de prélèvement.

Le générateur d'aérosol mis en œuvre est un générateur d'uranine tel que décrit dans l'annexe C de la norme NF EN ISO 16170: 2016. L'aérosol d'essai était caractérisé par un diamètre médian massique de $0.15 \pm 0.03 \mu\text{m}$. Le débit de génération était de $11 \text{ m}^3/\text{h}$, correspondant à une vitesse d'injection pour la canne conventionnelle de 7.4 m/s . Les concentrations en uranine étaient comprises entre ~ 15 et $\sim 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La caractérisation de l'homogénéité de l'aérosol d'essais au plan de prélèvement amont a été réalisée à l'aide d'une sonde droite (diamètre interne 14 mm) opérant à 50 l/min et positionnée à 90° de l'écoulement incident. Afin de caractériser au mieux l'homogénéité spatiale, 36 points de prélèvement répartis de manière homogène sur 4 axes ont été déterminés. La ligne de prélèvement comprenait un porte-filtre inox $\varnothing 47 \text{ mm}$ raccordé directement en sortie de canne (entrées-sorties coniques, filtres Bernard Dumas réf BD-490-NH) et les analyses ont été réalisées sur un fluorimètre JASCO FP-8250.

La grille d'essais est présentée dans le Tableau 1. Pour chaque configuration, au moins trois essais ont été réalisés, chacun d'eux sur une même journée. L'ensemble des essais s'est réparti sur plusieurs semaines, intégrant ainsi différentes conditions environnementales : $21 \pm 5^\circ\text{C}$ pour la température et $46 \pm 9 \%$ pour l'humidité relative.

Tableau 1 : Grille d'essais et nombre de Reynolds pour les différentes configurations.

Canne	Configuration			Re (-)
	Ligne	U (m/s)	Distance L (D)	
Droite	Droite	5	6.3	$1.05 \cdot 10^6$
		10		$2.10 \cdot 10^6$
	Coude	5	7.2	$1.05 \cdot 10^6$
		10		$2.10 \cdot 10^6$
SIPA	Droite	2.5	3.15	$5.25 \cdot 10^5$
		5	6.3	$1.05 \cdot 10^6$
	Coude	10		$2.10 \cdot 10^6$
		5	7.2	$1.05 \cdot 10^6$

Pour chaque point de prélèvement, la déviation relative à la moyenne a été calculée suivant :

$$DR_i = (C_i - \bar{C}) / \bar{C} \times 100 (\%)$$

Où C_i désigne la concentration massique d'uranine (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) obtenue au point i , et \bar{C} désigne la concentration moyenne :

$$\bar{C} = \sum_{i=0}^{n=36} C_i / n$$

Pour chaque configuration, nous avons également calculé :

$$\overline{DR}_i = \sum_{i=0}^{n=36} |DR_i| / n$$

3. RESULTATS EXPERIMENTAUX

La figure 3 présentent les résultats obtenus pour une distance L entre l'injection et le plan de prélèvement égale à $6.3D$ et une vitesse d'air de 5 m/s . Cette figure montre clairement que la canne d'injection SIPA permet d'obtenir une très bonne homogénéité, puisque 99% des $|DR_i|$ sont inférieurs à 7%, la moyenne \overline{DR}_i étant égale à 5%. Pour la canne conventionnelle, on observe une importante hétérogénéité, la moyenne \overline{DR}_i étant égale à 74%.

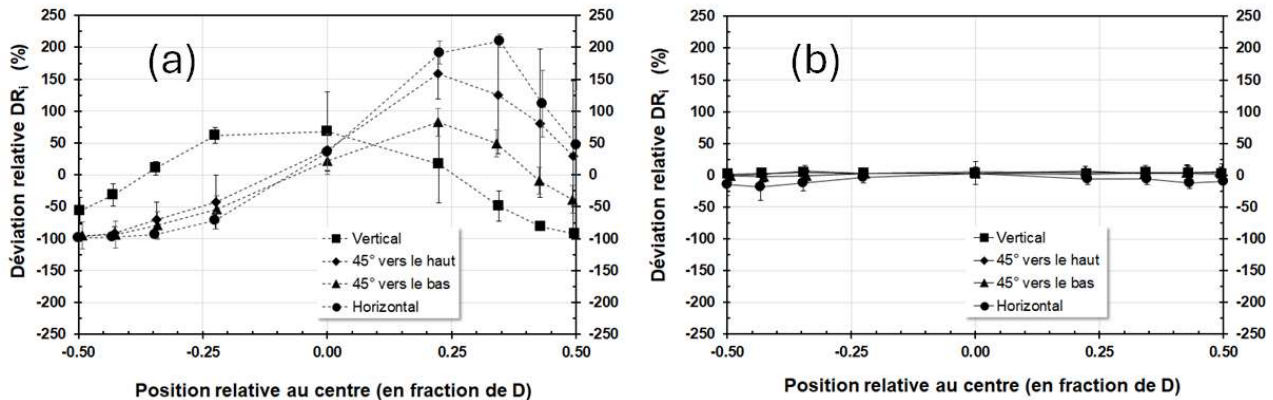


Figure 3 : Comparaison des déviations relatives DR_i (%) en fonction de la position relative au centre de la gaine (en fraction de D). Les données concernent les deux cannes étudiées : (a) canne droite conventionnelle et (b) canne SIPA, avec des prélèvements réalisés suivant quatre axes (horizontal, vertical, 45° vers le haut et 45° vers le bas). Conditions expérimentales : Distance $L=6.3D$ et vitesse d'air $=5$ m/s. Les points représentent la Moyenne \pm Intervalle de Confiance à 95 % ($n \geq 3$ essais).

Le tableau 2 présente l'ensemble des données obtenus pour les différentes configurations testées. Pour l'ensemble des configurations, la canne SIPA présente une moyenne \overline{DR}_i inférieure ou égale à 9 %. La canne droite conventionnelle montre quant à elle des valeurs bien au-delà, comprise entre 21 et 74%.

Tableau 2 : Compilation des données expérimentales pour les deux sondes d'injection et les différentes configurations (type de ligne, distance L et vitesse d'air U).

Canne	Configuration			DR_i (%)		
	Ligne	U (m/s)	Distance L (D)	\overline{DR}_i	IC (95%)	Max (abs)
Droite	Droite	5	6.3	74	16	210
		10		53	13	149
	Coude	5	7.2	21	11	46
SIPA	Droite	2.5	3.15	8	2	24
		5	6.3	5	2	18
		10		9	3	23
	Coude	5	7.2	6	2	21

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude présente une nouvelle canne d'injection d'aérosol visant à garantir la conformité des essais THE *in situ* avec la norme NF EN ISO 16170: 2016. Cette canne dénommée SIPA montre des résultats d'homogénéité très largement améliorés en comparaison de la canne droite traditionnellement mise en œuvre dans ce type d'essais. Les spécifications visées par la canne SIPA incluent l'adaptabilité (compatibilité avec différents diamètres de réseaux), la neutralité aéraulique (absence d'impact sur les pertes de charge), et la facilité d'utilisation pour une mise en œuvre simple sur site.

5. REFERENCES

- IRSN (2021) – Filtration des aérosols, assurer la performance. Repère n°50. p11-16
 NF EN ISO 16170: 2016 - Méthodes d'essai *in situ* pour les systèmes filtrants à haute efficacité dans les installations industrielles. 48p.
 NF EN 1822-1: 2019 - Filtres à air à haute efficacité (EPA, HEPA et ULPA) - Partie 1 : classification, essais de performance et marquage. 22p.
 NF EN ISO 29463-5: 2022 - Filtres à haut rendement et filtres pour l'élimination des particules dans l'air - Partie 5 : méthode d'essai des éléments filtrants. 38p.