

Étude de cas

DÉBIT D'AIR EXTRAIT SUR LES CHANTIERS DE DÉSAMIANTAGE : COMMENT LE MESURER ?

SULLIVAN
LECHÊNE,
JENNIFER
KLINGLER,
NICOLAS
VEITH
INRS,
département
Ingénierie des
procédés

→ **LA PROBLÉMATIQUE :** Afin d'assurer la protection des salariés et de l'environnement, les chantiers de désamiantage nécessitent la mise en œuvre d'un confinement dynamique, couplé à des mesures de réduction des émissions de fibres (captage à la source, pulvérisation, imprégnation par exemple). Le confinement dynamique permet d'éviter toute fuite de fibres d'amiante hors de la zone de travail en assurant, par l'intermédiaire d'un système de ventilation, une mise en dépression et un renouvellement suffisant en air neuf de la zone contaminée. Avant la mise en service de l'installation, les débits de ventilation doivent obligatoirement être contrôlés et conformes au dimensionnement prévu. Du côté de l'extraction d'air, seul le préfiltre en amont du ventilateur est accessible, ce qui ne permet pas d'utiliser les méthodes classiques de mesure de débit en conduit. La méthode en usage aujourd'hui et indiquée dans la réglementation [1] prévoit une mesure par exploration du champ de vitesses au niveau de l'ouverture. La surface de passage de l'air à travers le préfiltre étant difficilement mesurable, la surface totale est alors considérée dans le calcul du débit (produit de la vitesse moyenne mesurée par la surface totale du préfiltre), et un facteur de correction de 0,6 est appliqué. Des questionnements subsistent sur l'origine et la pertinence de cette correction. Une campagne de mesure en laboratoire s'est donc attachée à vérifier la pertinence du coefficient appliqué pour le calcul du débit dans la configuration type d'un chantier de désamiantage et à établir des recommandations sur la méthode de mesure du débit. Une méthode de mesure alternative *via* l'utilisation d'un balomètre a également été testée.

→ **LA RÉPONSE DE L'INRS**
Aéraulique du confinement dynamique d'un chantier de désamiantage
Caractéristiques

Le confinement dynamique d'un chantier de désamiantage est réalisé en suivant la méthode du bilan aéraulique prévisionnel [2]. Cette méthode

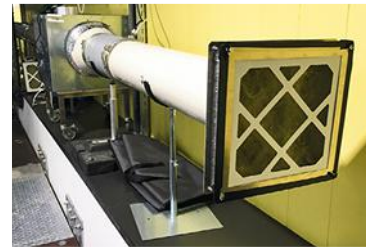
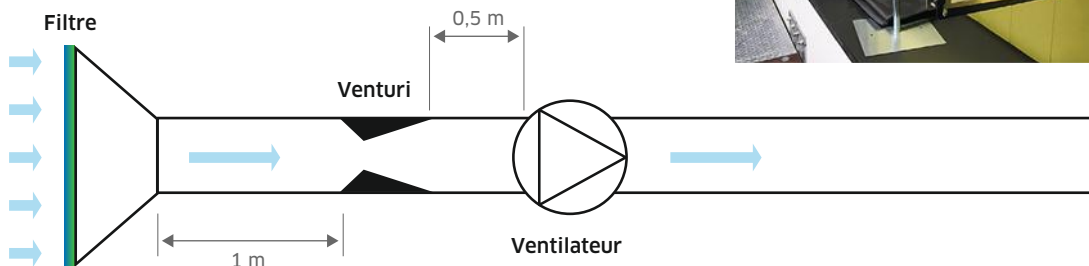
permet aux entreprises d'identifier et de dimensionner tous les éléments nécessaires au bon fonctionnement du confinement et ce tout au long de la durée du chantier. Le bilan aéraulique permet ainsi de concevoir une installation de ventilation assurant un renouvellement suffisant en air neuf dans la zone de travail avec une répartition la plus homogène possible et de garantir le respect de la dépression minimale de 10 Pa par rapport à l'extérieur. Les différents débits d'air neuf et d'extraction mis en jeu sont définis et dimensionnés afin de répondre aux objectifs de l'installation. Après installation sur le chantier, les débits de ventilation sont obligatoirement contrôlés et doivent être conformes au dimensionnement prévu.

Mesures du débit extrait

L'air extrait vers l'extérieur de la zone est filtré pour assurer un rejet épuré de fibres d'amiante. Le système de filtration comporte plusieurs étages, avec *a minima* un préfiltre grossier suivi d'un filtre à très haute efficacité. Généralement, seul le préfiltre est accessible (depuis l'intérieur du confinement) pour la mesure du débit (Cf. Figure 1). La méthode de mesure par exploration du champ de vitesses dans



↑ FIGURE 1 Préfiltre au niveau d'un extracteur [2].



← FIGURE 2
Veine aéraulique
expérimentale
(schéma).



← FIGURE 3
Filtres utilisés
lors de la
campagne
de mesure.

Filtre G4, dimensions
305 mm x 305 mm

Filtre G3, dimensions
305 mm x 305 mm

Filtre G4, dimensions
610 mm x 610 mm

Filtre G3, dimensions
610 mm x 610 mm

l'ouverture, utilisée par les entreprises, consiste à balayer la surface du filtre avec un anémomètre à hélice. Le débit est alors calculé selon l'équation suivante :

$$Q_v = 0,6 \cdot v_m \cdot S_t \cdot 3\,600$$

Avec¹ :

Q_v : le débit volumique extrait [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$];
 v_m : la vitesse moyenne mesurée [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$];
 S_t : la surface totale du filtre [m^2].

Objectifs de la campagne de mesure

L'objectif était d'évaluer le débit d'air extrait au niveau du filtre Q_{filtre} [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$] et de le comparer au débit de référence Q_{ref} [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$] mesuré par un tube Venturi (Badger Meter GmbH, Allemagne), calibré par le Cetiati, afin d'obtenir le facteur de correction α :

$$\alpha = \frac{Q_{\text{ref}}}{Q_{\text{filtre}}} = \frac{Q_{\text{ref}}}{v_m \cdot S_t \cdot 3\,600}$$

Matériels et méthodes

Dispositif expérimental

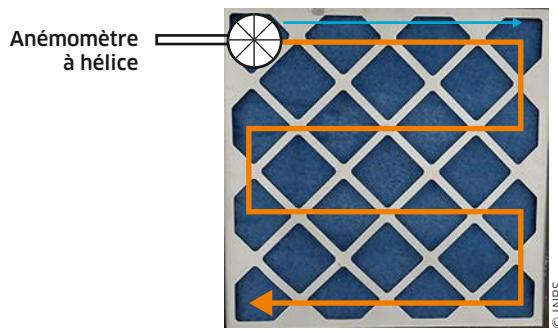
La veine aéraulique schématisée sur la Figure 2 est constituée d'un ventilateur, d'un préfiltre de mêmes type et dimensions que ceux utilisés dans les chantiers de désamiantage, de conduits de

diamètre 200 mm et d'un tube Venturi pour mesurer le débit de référence dans la veine. Le tube Venturi est positionné entre le filtre et le ventilateur avec des longueurs droites volontairement réduites pour s'affranchir au maximum de fuites d'air éventuelles entre la mesure de référence et la mesure au filtre. Cette position ne respecte pas les longueurs droites de conduit préconisées dans la norme NF EN ISO 5167-4 [3] pour l'utilisation d'un tube Venturi. Une campagne de mesure préalable a permis de valider ce positionnement en comparant le débit évalué au tube Venturi à des mesures de débits réalisées avec un diaphragme placé à une distance suffisante de toute singularité dans le réseau. Dans cette position, le tube Venturi permet d'obtenir un débit d'air avec un écart inférieur à 5 % du débit mesuré au diaphragme, ce qui permet de considérer cette mesure comme notre mesure de référence. La non-perturbation de la mesure au tube Venturi malgré des longueurs droites de conduits très courtes est probablement due à la présence du filtre qui homogénéise le flux d'air en amont du tube Venturi.

Le filtre est inséré côté extraction dans un cadre en aluminium pouvant s'adapter au conduit de la veine de mesure. Deux tailles de filtre avec des surfaces de 305 mm x 305 mm et



FIGURE 4 →
Schéma
de balayage
de la surface
du filtre avec
un anémomètre
à hélice.



610 mm x 610 mm ont été testées² (Cf. Figure 3). La présence du cadre en aluminium réduit légèrement ces dimensions respectivement à 300 mm x 300 mm et 600 mm x 600 mm. Ces dernières valeurs sont considérées dans le calcul du débit mesuré au niveau du filtre.

Protocoles de mesure

→ Évaluation du débit d'air au niveau du filtre
via une mesure de vitesse

Le débit d'air au niveau du filtre est évalué comme le produit de la vitesse d'air moyenne par la surface totale du filtre. Les mesures de vitesse sont réalisées avec un anémomètre multifonction Testo 400 muni d'une sonde à hélice de diamètre 100 mm (Testo SARL, UE). Le principe consiste à placer l'hélice contre le filtre et à balayer toute sa surface en enregistrant les signaux de vitesse

à une fréquence fixée à 1 seconde (Cf. Figure 4). La durée de balayage est semblable entre les essais et varie suivant la taille du filtre: entre 15 et 20 secondes pour le filtre de dimensions 305 mm x 305 mm et entre 35 et 40 secondes pour le filtre de dimensions 610 mm x 610 mm. Le résultat d'une mesure correspond à la moyenne des signaux de vitesses mesurés durant la période de balayage.

→ Mesure directe du débit d'air au niveau du filtre

Le balomètre permet une mesure directe du débit d'air. L'appareil est constitué d'un cône ou d'une jupe fixé à un élément de mesure de pression différentielle permettant d'évaluer le débit d'air. Le principe consiste à placer le cône de manière étanche autour du filtre afin que le flux d'air traverse l'élément de mesure (Cf. Figure 5). Les balomètres Testo 420 et FlowFinder MK2 (ACIN instrumenten, UE) ont été utilisés avec des jupes de dimensions 610 mm x 610 mm (Cf. Figure 6). Le dernier balomètre cité présente la particularité de compenser la perte de charge créée par le positionnement de l'appareil. Le résultat d'une mesure correspond à la moyenne des signaux de débits durant une période de 20 secondes (fréquence d'acquisition fixée à 1 seconde). Chaque mesure est répétée trois fois pour évaluer la répétabilité du protocole. Le résultat final correspond à la moyenne de ces trois répétitions.

FIGURE 5 →
Schéma
de principe
pour la mesure
au balomètre.

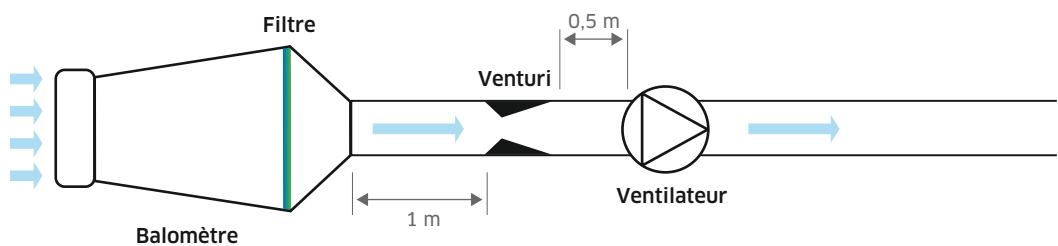
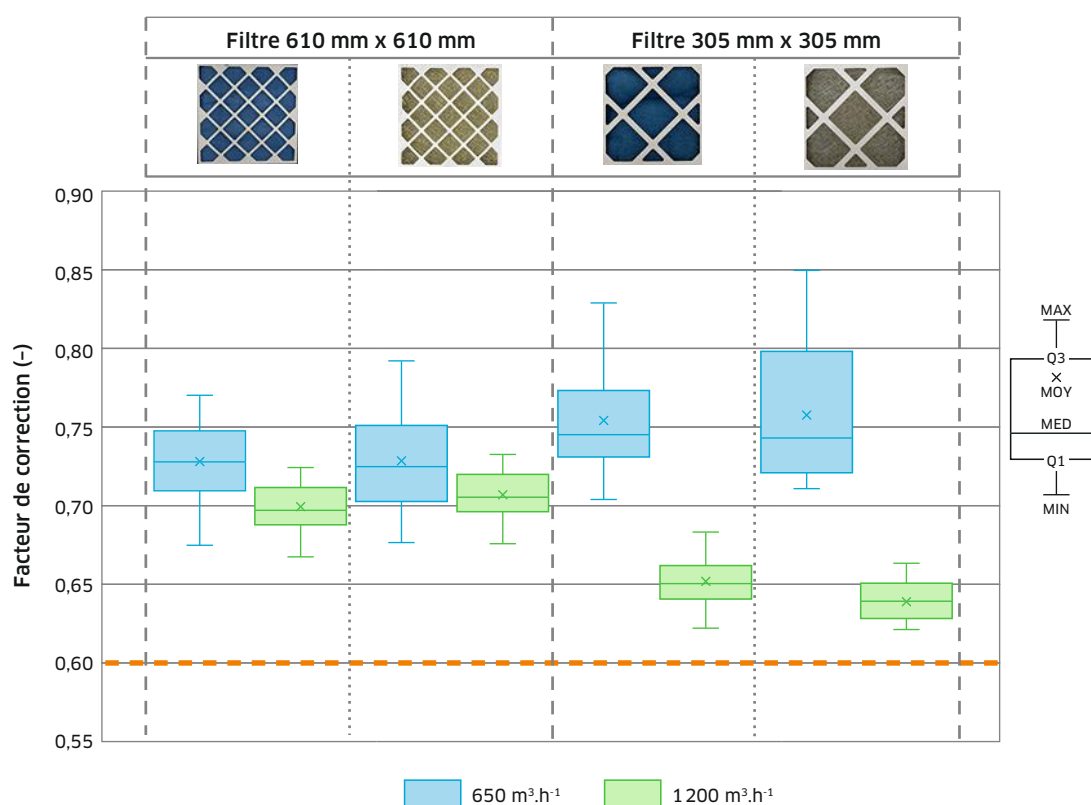


FIGURE 6 →
Balomètres
utilisés pour la
mesure du débit.





← FIGURE 7
Facteur de correction mesuré en fonction du débit d'air et du type de préfiltre, présenté sous forme de « boîtes à moustaches » (Q1 : 25 % des données ont une valeur inférieure ; MED : médiane ; MOY : moyenne ; Q3 : 25 % des données ont une valeur supérieure).

Étude paramétrique

En complément des tests précédents, une étude paramétrique a été menée pour évaluer la robustesse de la méthode de mesure. Les différents paramètres considérés sont les suivants :

- la qualité du filtre (Cf. Figure 3) : corps filtrant en fibres de verre (filtre G3), corps filtrant synthétique (filtre G4) ;
- les dimensions du filtre : 305 mm x 305 mm, 610 mm x 610 mm (référence du constructeur) ;
- trois opérateurs différents ;
- le débit de ventilation : environ 650 m³.h⁻¹, environ 1200 m³.h⁻¹ ;
- la distance de la mesure : anémomètre contre le préfiltre, anémomètre placé à 5 cm du préfiltre ;
- la durée de la mesure : 6 secondes, 20 secondes, 40 secondes ;
- l'appareil de mesure : anémomètre à hélice, balomètre.

Résultats

Calcul du facteur de correction

Dans le cas particulier des chantiers de désamiantage, l'objectif est d'éviter toute fuite de fibres vers l'extérieur. De ce fait, les débits d'air mis en jeu doivent obligatoirement atteindre au minimum les valeurs de dimensionnement définies lors du bilan aéraulique prévisionnel. De façon à ce que le débit réel ne puisse pas être inférieur au débit d'air mesuré au niveau du préfiltre, le facteur de correction à retenir doit correspondre à

la valeur minimale obtenue lors des mesures. De cette manière, le débit d'air mesuré au niveau du préfiltre est légèrement sous-évalué par rapport au débit réel.

Les mesures au niveau du filtre ont été réalisées à deux débits différents pour deux types de pré-filtres. La Figure 7 fournit les valeurs de facteur de correction obtenues. Au total, pour chaque débit et chaque type de filtres, entre 20 et 30 mesures ont été réalisées par deux ou trois opérateurs. Bien que de larges différences puissent être constatées, le facteur de correction est toujours supérieur à 0,6 pour toutes les mesures réalisées, un minimum de 0,62 étant atteint pour les préfiltres de dimensions 305 mm x 305 mm à un débit de 1200 m³.h⁻¹. La méthode de calcul du débit d'air consistant à appliquer un coefficient de 0,6 à la mesure de débit réalisée au niveau du filtre est donc adaptée pour ce type d'applications³.

Par ailleurs, mesurer au niveau du filtre une valeur de débit supérieure au débit de référence n'est pas surprenant. En effet, comme le montre la Figure 3, la surface de passage de l'air est inférieure à la surface totale du filtre (environ 35 % plus faible), d'où la nécessité d'introduire l'utilisation du facteur de correction. Pour davantage de praticité, la surface totale du filtre est considérée dans le calcul du débit, amenant par conséquent un débit surestimé par rapport à la référence. Une analyse plus approfondie des résultats permet de constater des différences suivant le débit d'air





© Fabrice Dimier pour l'INRS / 2023

Dépose de sacs de déchets amiantés sur un chantier de désamiantage.

Une analyse plus approfondie des résultats permet de constater des différences suivant le débit d'air et la taille du préfiltre, alors que le type de préfiltre a un impact limité (Cf. Figure 7). En effet, pour les préfiltres de dimensions 610 mm x 610 mm, une plus grande disparité des valeurs de facteurs de correction est constatée pour le plus faible débit, même si la valeur moyenne de ces facteurs reste semblable. Pour les préfiltres de plus petite taille, les résultats obtenus sont différents, avec une influence du débit d'air plus marquée, notamment pour le débit élevé où les valeurs de facteur de correction les plus faibles sont atteintes. La

disparité des valeurs peut paraître élevée mais il est important de rappeler que le positionnement de la mesure est contraint et non optimal. Il ne s'agit pas ici d'obtenir une valeur de débit la plus proche possible de la référence mais de s'assurer que le débit mesuré n'est pas inférieur au débit de référence, tout en évitant un dimensionnement excessif de la ventilation.

Robustesse de la méthode

Une étude paramétrique a été réalisée afin d'évaluer l'impact de certains paramètres clés sur les valeurs mesurées.

TABEAU 1 →
Coefficient correcteur en fonction du positionnement de la mesure.

	BALAYAGE CONTRE LE FILTRE	BALAYAGE À 5 CM DU FILTRE
Débit mesuré (m ³ .h ⁻¹)	878	423
Coefficient de variation (%)	2	8
Coefficient correcteur	0,7	1,5

TABEAU 2 →
Influence de l'opérateur sur la mesure.

COEFFICIENT CORRECTEUR	OPÉRATEUR 1	OPÉRATEUR 2	OPÉRATEUR 3	ÉCART (%)
Filtre G4 (grand modèle)	0,71	0,74	0,74	5
Filtre G3 (grand modèle)	0,73	0,76	0,70	8
Filtre G4 (petit modèle)	0,79	0,73	0,75	8
Filtre G3 (petit modèle)	0,81	0,72	0,76	11

	RAPIDE (7 SECONDES)	MOYEN (20 SECONDES)	LENT (40 SECONDES)
Débit mesuré (m ³ .h ⁻¹)	947	947	952
Coefficient de variation (%)	4	4	2
Coefficient correcteur	0,67	0,67	0,67

← TABLEAU 3
Influence de la
durée du balayage.

	BALOMÈTRE TESTO		BALOMÈTRE MK2	
Débit mesuré (m ³ .h ⁻¹)	567	1017	592	933
Débit de référence (m ³ .h ⁻¹)	578	1084	591	927
Coefficient de variation (%)	0,4	0,4	1,2	0,9
Écart avec débit de référence (%)	1,9	6,2	0,2	0,6

← TABLEAU 4
Résultats
de mesures en
utilisant
un balomètre.

→ Positionnement de l'anémomètre à hélice

L'impact de la distance entre le filtre (type G3, dimensions 305 mm x 305 mm) et l'anémomètre a été évalué par deux séries de 10 mesures : la première série a été réalisée en positionnant l'appareil de mesure contre le filtre, la deuxième en plaçant ce même appareil à 5 cm du filtre. Le balayage était identique à celui présenté sur la Figure 4 et le débit d'air fixé à 635 m³.h⁻¹ environ. Les résultats présentés dans le Tableau 1 correspondent à la moyenne des 10 mesures réalisées pour chaque méthode.

L'éloignement de l'anémomètre à hélice implique logiquement une diminution de la vitesse mesurée et donc implicitement du débit, d'un facteur 2 environ. L'écart avec le débit de référence est ainsi augmenté (facteur de 1,5) et l'utilisation d'un coefficient correcteur de 0,6 n'est plus envisageable, sous peine d'une large sous-estimation du débit ce qui entraînerait un dimensionnement excessif de la ventilation. Par ailleurs, le coefficient de variation (ou écart-type relatif), faible lorsque le balayage est réalisé contre le filtre, devient quatre fois plus important pour une position de mesure plus éloignée du filtre, indiquant une plus grande disparité des résultats. Cette position de mesure « dans le vide » apparaît donc incertaine et ne doit pas être utilisée. Les mesures doivent donc être réalisées en positionnant l'anémomètre contre le filtre. Par ailleurs, il est impératif de démarrer la mesure après stabilisation de la vitesse lue sur l'anémomètre à hélice afin d'éviter une sous-estimation de la valeur moyenne de vitesse.

→ Répétabilité de la méthode de mesure

La répétabilité de la méthode de mesure (appareil de mesure contre le filtre) a été évaluée via le coefficient de variation, qui est calculé pour chacune des séries de 10 mesures réalisées par un même opérateur. Toutes les configurations de mesure ont été analysées : type de filtre,

dimensions du filtre, débit d'air, ce qui représente au total 10 séries de mesures. Le coefficient de variation est toujours inférieur à 3 %, montrant ainsi la dispersion limitée des valeurs et la répétabilité du protocole de mesure.

→ Effet de l'opérateur

Trois opérateurs ont réalisé des séries de 10 mesures sur les quatre types de filtres à un débit d'air d'environ 650 m³.h⁻¹. Les différents coefficients correcteurs moyens obtenus pour chaque configuration sont présentés dans le Tableau 2. L'écart maximal entre les opérateurs atteint 11 %, avec toutes les valeurs de coefficient correcteur supérieures à 0,6 (Cf. Figure 7). On remarque une légère influence de la taille du filtre avec des écarts entre opérateurs supérieurs pour les filtres de plus faibles dimensions.

→ Effet de la durée du balayage

Trois séries de 10 mesures ont été réalisées avec des durées différentes de balayage de l'anémomètre à hélice contre le filtre (type G3, dimensions 305 mm x 305 mm). Le débit de référence était fixé à 635 m³/h. Les résultats du Tableau 3 indiquent que le paramètre de la durée du balayage a un impact limité sur les résultats. On peut toutefois constater qu'un balayage long tend à réduire la dispersion des résultats.

Utilisation du balomètre

Le balomètre mesure directement la valeur du débit d'air, ce qui présente l'avantage de ne pas avoir de coefficient correcteur à appliquer, contrairement à la méthode précédente. Les mesures ont été réalisées sur le filtre de type G4, de dimensions 610 mm x 610 mm à deux débits différents. Les résultats sont fournis dans le Tableau 4. L'utilisation d'un balomètre permet d'avoir une estimation du débit avec un écart inférieur à 6 % pour les deux appareils considérés.





© Fabrice Dimier pour l'INRS / 2023

Sas de transfert des matériels et déchets sur un chantier de désamiantage.

Par ailleurs, le coefficient de variation plus faible que la méthode précédente indique une dispersion très limitée des valeurs et donc une meilleure répétabilité. Le balomètre à compensation (référence MK2) présente logiquement des écarts plus réduits avec le débit de référence.

Conclusion

Sur un chantier de désamiantage, le contrôle des débits extraits est indispensable pour s'assurer de la conformité au dimensionnement prévu. La mesure ne peut être réalisée qu'au niveau du filtre d'extraction. Dans cette configuration particulière, deux méthodes de mesure ont été testées. La première (méthode actuellement utilisée) consiste à balayer la surface du filtre avec un anémomètre à hélice pour mesurer une vitesse moyenne. Le débit est ensuite calculé en considérant cette vitesse moyenne et la surface totale du filtre, le tout assorti d'un coefficient correcteur de 0,6. Les mesures réalisées ont permis de consolider la valeur de ce coefficient correcteur qui permet une estimation sécuritaire du débit. La mise en œuvre de cette méthode s'accompagne de quelques recommandations, notamment celles de veiller à acquérir les mesures après stabilisation de la valeur lue sur l'anémomètre, de bien positionner l'appareil de mesure contre le filtre et de réaliser la moyenne des valeurs sur toute la durée du balayage. La deuxième méthode de mesure consiste à utiliser un balomètre. Cet appareil permet une mesure directe du débit d'air, sans avoir de coefficient cor-

recteur à appliquer. Cette méthode de mesure est particulièrement fiable et répétable, mais l'appareil est plus encombrant et nécessite l'utilisation d'une jupe avec des dimensions adaptées au filtre. Il faut également veiller à acquérir la mesure après stabilisation de la valeur lue sur l'appareil et être rigoureux sur le positionnement de la jupe contre le filtre pour assurer une bonne étanchéité. Ces deux méthodes de mesure sont donc utilisables sur site pour évaluer le débit d'air au niveau d'un préfiltre dans la configuration d'un chantier de désamiantage. Si l'encombrement devant le filtre le permet, l'utilisation d'un balomètre est recommandée pour réduire les incertitudes liées à la mesure du débit. Bien que la réglementation ne mentionne pas cette méthode de mesure, son usage reste envisageable, étant donné que les appareils de mesures répertoriés dans l'arrêté du 20 décembre 2021 constituent une liste indicative. ●

1. Cette méthode de mesure est indiquée dans l'arrêté du 20 décembre 2021 [1]:

« À défaut de possibilité de mesure dans les conduits, les mesures sont réalisées par exploration du champ de vitesse dans les ouvertures. Le débit est alors déterminé en appliquant la formule suivante : $Q = k \cdot V \cdot S$. V : vitesse moyenne mesurée dans l'ouverture ; S : surface de la section totale de l'ouverture ; k : coefficient de correction caractéristique de l'ouverture ; de la méthode de mesure de la vitesse de l'air ; le cas échéant, des singularités situées à proximité de l'ouverture. On prendra 0,6 comme valeur maximale du coefficient k en l'absence d'information précise. »

2. Les dimensions 305 mm x 305 mm et 610 mm x 610 mm correspondent aux informations données par le constructeur. Les dimensions considérées dans le calcul correspondent à la zone balayée par l'anémomètre à hélice (intérieur du cadre).

3. Des questionnements sur la pertinence et l'origine de ce coefficient avaient été émis par des acteurs de la profession. En l'absence de document retraçant l'origine de ce coefficient, aucune réponse n'avait pu leur être apportée ; cette étude vise notamment à répondre à ces questionnements.

BIBLIOGRAPHIE

[1] ARRÊTÉ DU 20 DÉCEMBRE 2021 relatif aux conditions d'accréditation d'organismes et aux contrôles et mesures permettant de vérifier la conformité de l'aération et de l'assainissement des locaux de travail prescrits par l'agent de contrôle de l'inspection du travail. Accessible sur : <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000044546689/2022-09-07/>

[2] DUBERNET F., GUICHARD R., ROMERO-HARIOT A. – Amiante. Aéraulique des chantiers sous confinement. INRS, brochure ED 6307, 2018. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ED%206307>

[3] NF EN ISO 5167-4 – Mesurage de débit des fluides au moyen d'appareils déprimogènes insérés dans des conduites en charge de section circulaire – Partie 4 : Tubes de Venturi. Afnor, 2022.