

- Aspirateur
- Filtration
- Efficacité
- Aérosol
- Poussière
- Banc d'essai
- Mesure

► Roland RÉGNIER, Denis BÉMER,
Isabelle SUBRA,
INRS, département Ingénierie des procédés

FILTRATION EFFICIENCY OF INDUSTRIAL VACUUM CLEANERS - TESTING METHOD

Industrial vacuum cleaners are mainly used in enclosed spaces. They must therefore be fitted with efficient filtration systems and be sufficiently robust not to reintroduce pollutants, which they are supposed to evacuate, into the working area. This study concerns mainly class H (the most stringent according to Standard NF EN 60335-2-69) vacuum cleaners likely to be used with dust hazardous to health (silicon, lead, asbestos, etc.). It allowed us to determine the feasibility of a fluorescein-based method for measuring a so-called confinement efficiency, which takes into account both imperviousness to extracted dust particles and filter system efficiency. Fluorescein can easily be detected at low concentration, so it enables us to test a priori high-performance appliances, whilst avoiding constraints associated with other evaluation methods.

Use of fluorescein allowed us to conduct tests based on an approximately 1 hour sampling period, which could be optimised, at a much higher sensitivity than that offered by a gravimetric measurement method. However, handling of such a sensitive product calls for rigorous precautions throughout the various operations leading to final measurement.

One of the major points of this study is the steady generation of a very fine aerosol including 75% of particles smaller than 1 µm with a mean aerodynamic diameter of 0.64 µm. The method was validated using five commercially marketed vacuum cleaners selected from appliances designed for maintenance work in the presence of asbestos (zone 3), based on a list drawn up by CRAM Ile-de-France [regional health insurance fund] and INRS.

The optical particle counting method, commonly applied for filtration tests, is compared with the fluorimetry method.

- Vacuum cleaner
- Filtration
- Efficiency
- Aerosol
- Dust
- Test setup
- Measurement

EFFICACITÉ DE FILTRATION DES ASPIRATEURS INDUSTRIELS - MÉTHODE D'ESSAI

Les aspirateurs industriels sont principalement utilisés dans des espaces fermés. Ils doivent donc être équipés de dispositifs de filtration efficaces et disposer d'une certaine robustesse afin de ne pas réintroduire dans l'espace de travail les polluants qu'ils sont censés évacuer. L'étude effectuée concerne essentiellement les aspirateurs de classe H (la plus contraignante selon la norme NF EN 60335-2-69) susceptibles d'être utilisés avec des poussières dangereuses pour la santé (silice, plomb, amiante...). Elle a permis de déterminer la faisabilité d'une technique mettant en œuvre un aérosol de fluorescéine pour la mesure d'une efficacité dite de confinement, prenant en compte l'étanchéité vis-à-vis des poussières aspirées et l'efficacité du dispositif de filtration. Ce produit, facilement détectable à faible concentration, permet de tester des appareils *a priori* hautement performants tout en évitant des contraintes associées à d'autres techniques d'évaluation.

L'utilisation de fluorescéine a permis de réaliser les tests avec une durée de prélèvement d'environ une demi-heure, qui pourrait être optimisée, avec une sensibilité très supérieure à celle d'une technique de mesure par gravimétrie. Cependant, la manipulation d'un produit aussi sensible requiert des précautions rigoureuses tout au long des différentes opérations conduisant à la mesure finale.

Un des points majeurs de l'étude réside en la génération stable d'un aérosol très fin constitué à 75 % de particules inférieures à 1 µm et dont le diamètre aérodynamique moyen est de 0,64 µm. La méthode a été validée à l'aide de cinq aspirateurs du marché, sélectionnés parmi les appareils destinés au travail de maintenance en présence d'amiante (zone 3), à partir d'une liste établie par la CRAM Ile-de-France et l'INRS.

La technique par comptage optique, couramment utilisée pour les tests de filtration, a été comparée à la méthode par fluorimétrie.

Les aspirateurs industriels sont présents dans pratiquement tous les secteurs d'activité. Ils servent classiquement pour le nettoyage de surfaces polluées mais peuvent aussi être associés à des outils portatifs individuellement ou de manière centralisée. Ces épurateurs mobiles sont principalement utilisés dans des espaces fermés avec pour conséquence une réintroduction partielle de particules plus ou moins nocives dans un environnement où du personnel évolue.

Leur capacité à limiter le rejet de particules dépend de multiples facteurs mais surtout de la qualité de l'étanchéité et du niveau de perméance du dispositif de filtration. Il convient, en effet, de disposer d'un appareil bien étanche, capable de supporter les multiples contraintes d'un usage industriel et équipé de filtres adaptés au type de poussière à collecter.

Les nombreux aspirateurs proposés sur le marché sont soumis à la norme européenne NF EN 60335-2-69 [1] prin-

cipalement basée sur des tests réalisés en Allemagne [2]. La norme permet de classer les appareils suivant trois catégories L, M, H, de la perméance la plus élevée à la plus faible. En présence de poussière dangereuse pour la santé et notamment de produits cancérigènes (silice, plomb, amiante...) l'utilisation d'un aspirateur équipé de filtre H est impérative.

Pour la catégorie H, les méthodes de test actuellement disponibles font appel à des techniques mettant en œuvre divers aérosols et divers moyens d'analyse. Ceux de la norme européenne sont axés sur la génération d'une poussière calcaire associée à une mesure gravimétrique et sur la génération d'un aérosol d'huile de paraffine associée à un compteur optique. Une méthode anglaise s'appuie sur la mesure d'un aérosol de bleu de méthylène ou celle de chlorure de potassium quantifié à l'aide d'un photomètre de flamme [3]. D'autres méthodes développées aux USA, en particulier pour l'essai d'aspirateurs ménagers, se fondent sur la génération de chlorure de potassium et la mesure par un spectromètre optique [4, 5]. Des tests d'aspirateurs ménagers ont également été effectués en France, dans le cadre d'un programme de quantification d'allergènes, avec une méthode utilisant le chlorure de potassium et le comptage optique [6].

L'étude, objet de cet article, a pour objectif principal de montrer la faisabilité d'une méthode d'évaluation de l'efficacité de filtration des aspirateurs industriels dotés de filtres de type H à l'aide d'une technique mettant en œuvre un aérosol de fluorescéine. Ce produit utilisé en solution dans l'eau présente l'intérêt d'être facilement détectable en faible quantité tout en évitant un certain nombre de contraintes associées à d'autres techniques. Il peut donc faciliter les tests d'appareils performants.

La méthode mise au point a été validée à l'aide d'un échantillon de cinq aspirateurs industriels de type H, de caractéristiques différentes. Des essais d'encrassement ont permis d'évaluer la capacité de colmatage des différents appareils.

Durant cette étude, une des techniques alternatives de test, le comptage optique, a été comparée à la méthode utilisant la fluorescéine.

MÉTHODOLOGIE

PRINCIPE DE LA MÉTHODE

L'évaluation de la perméance globale de filtration des aspirateurs (étanchéité à la poussière et filtration) est effectuée par des mesures de concentrations de fluorescéine à l'amont et à l'aval de l'appareil.

Un aérosol liquide, constitué d'eau et de fluorescéine à 2,5 %, est généré au moyen d'un atomiseur de type Laskin (Intertek TDA-4B) à l'entrée d'un circuit d'aspiration relié à l'aspirateur. Les gouttelettes, entraînées dans le flux d'air, sèchent au long du parcours dans le conduit d'aspiration. Les particules solides ainsi obtenues sont de faible diamètre (en majorité < 1 µm). Un échantillon est ensuite prélevé en deux points situés, l'un à l'amont de l'aspirateur, au centre du conduit d'aspiration et l'autre à l'aval, au centre du conduit de rejet. Les particules sont alors collectées sur une membrane filtrante en fibres de verre (Whatmann GFC diamètre 47 mm) via un dispositif de prélèvement. Après analyse au moyen d'un fluorimètre (Jenway IC6280) et détermination des concentrations amont/aval, la perméance totale est calculée par application de la formule suivante :

$$P_t = \frac{C_{aval} \times Q_{aval}}{C_{amont} \times Q_{amont}} \times 100$$

où

P_t : perméance totale (%)

C_{aval} : concentration aval (mg.m⁻³)

C_{amont} : concentration amont (mg.m⁻³)

Q_{aval} : débit de rejet aval (m³.h⁻¹)

Q_{amont} : débit d'aspiration amont (m³.h⁻¹)

BANC D'ESSAI

Le banc d'essai utilisé pour cette étude est inspiré, dans son principe de fonctionnement, des installations décrites dans la norme EN 60335-2-69 Annexe AA [1]. Après quelques aménagements, il a permis de travailler avec les aspirateurs dotés d'une sortie non canalisée (l'air est rejeté d'une manière diffuse à hauteur du capot supérieur de l'appareil) ou canalisée (l'air sort par un conduit de faible diamètre).

L'installation est constituée de deux tronçons aérauliques reliés à une cham-

bre cylindrique de volume 1,24 m³ (hauteur : 1,3 m ; diamètre : 1,1 m) dans laquelle l'aspirateur en essai est placé (cf. Figures 1, 2, 3). La partie amont est constituée d'un convergent (section : 0,55 m² ; longueur : 1,6 m) prolongé par un conduit cylindrique droit (longueur : 4,5 m ; diamètre : 100 mm) sur lequel est inséré un dispositif de mesure de débit par venturi. La partie aval est également constituée d'un conduit droit (longueur : 3,4 m ; diamètre : 100 mm) comprenant un venturi. Ce tronçon est raccordé d'un côté à la face supérieure de la chambre cylindrique (rejet des aspirateurs) et de l'autre à une installation de ventilation chargée d'équilibrer les débits mis en œuvre par les aspirateurs et de fournir un petit débit additionnel afin de maintenir la chambre en légère pression négative.

Les points de mesure de concentration sont disposés à l'amont à 5,1 m de l'entrée du convergent et à l'aval à 2,2 m de la chambre cylindrique. Soit un temps de séjour des gouttelettes variant de 0,5 s à 1 s suivant le débit mis en œuvre. Ces valeurs sont sous-estimées en raison de la forme pyramidale du convergent.

Dans la seconde configuration (cf. Figure 2), l'aspirateur est relié directement à la partie amont, la chambre cylindrique n'étant plus utilisée. La mesure de concentration est effectuée dans les mêmes conditions que précédemment à l'amont, tandis qu'à l'aval la canne de prélèvement est disposée dans le flux de rejet en sortie de conduit.

DISPOSITIF DE PRÉLÈVEMENT

Les dispositifs de mesure amont et aval (cf. Figure 4) comprennent une sonde de prélèvement en acier inox coudée à 90° prolongée d'un côté par un embout amovible et de l'autre par un porte filtre en acier inox. Cet ensemble est relié par un conduit souple à une tuyère sonique délivrant un débit constant (± 31 l.min⁻¹) mis en œuvre par une pompe à membrane (KNF 0,3 kW). Les débits sont vérifiés avant et après chaque essai et, le cas échéant, une correction est apportée.

CARACTÉRISATION DE L'AÉROSOL D'ESSAI

La répartition granulométrique de l'aérosol d'essai a été déterminée par des mesures effectuées de manière simul-

FIGURE 1

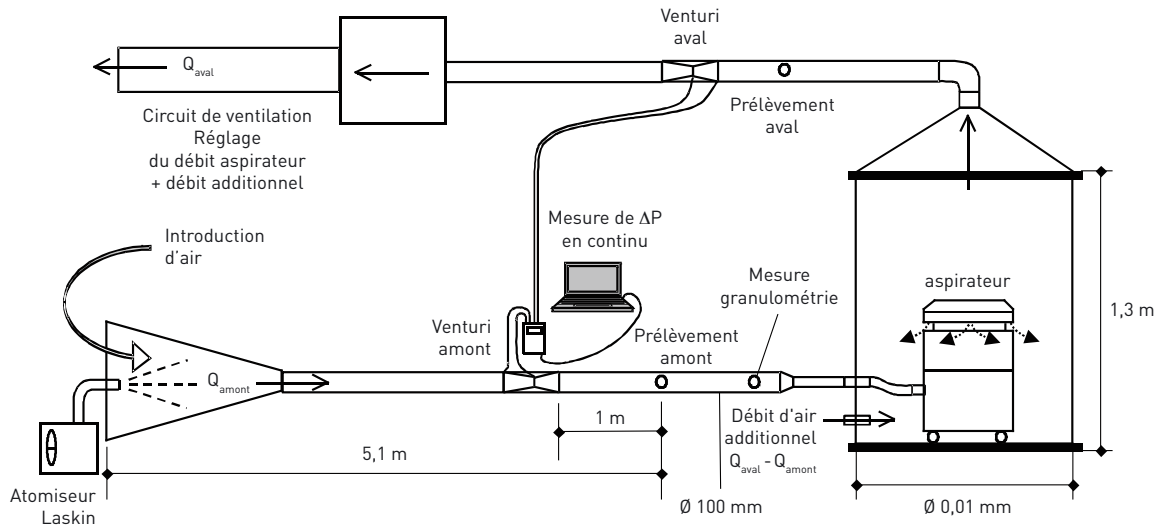
Banc d'essai (aspirateur à rejet diffus)
Test setup (diffuse emission vacuum cleaner)


FIGURE 2

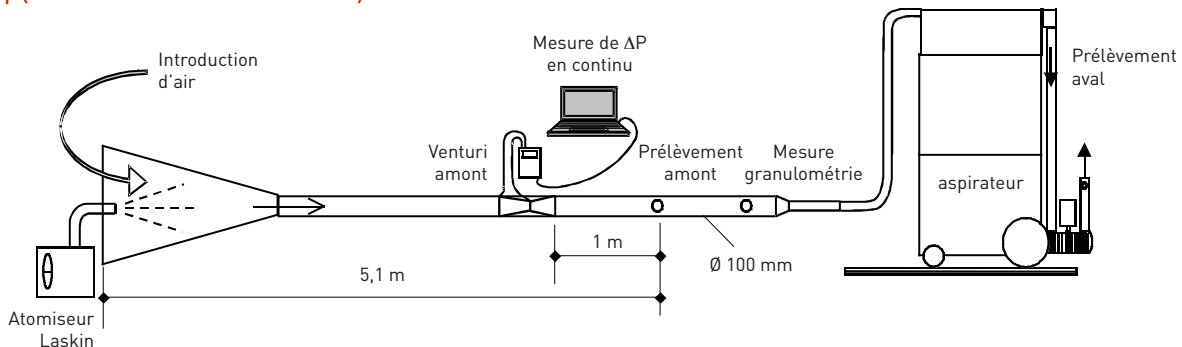
Banc d'essai (aspirateur à rejet canalisé)
Test setup (directed emission vacuum cleaner)


FIGURE 3

Banc d'essai des aspirateurs
Vacuum cleaner test setup


tanée durant les séquences de prélèvement amont/aval. L'appareil utilisé est un impacteur en cascade 8 étages (Marple 298) permettant de collecter des particules dont le diamètre aérodynamique (da_e) se situe entre 0,5 à 21 μm . Chacun des huit étages est équipé d'une membrane en mylar® de diamètre 34 mm et l'étage terminal d'une membrane PVC de porosité 0,5 μm .

La collecte est effectuée au moyen d'une pompe individuelle (Gilian HFS513) réglée à 2 $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$.

La distance séparant le générateur d'aérosol du point de prélèvement ainsi que les conditions de température et d'hygrométrie (en moyenne 22°C et 35 % HR) sont suffisantes pour obtenir un séchage total des gouttelettes. Compte tenu des débits d'aspiration mis en œuvre, le temps de séjour des gouttelettes varie de 0,5 s à 1 s. Cette durée est très nettement supérieure à un temps de séchage théo-

FIGURE 4

Circuit de prélèvement
Sampling line

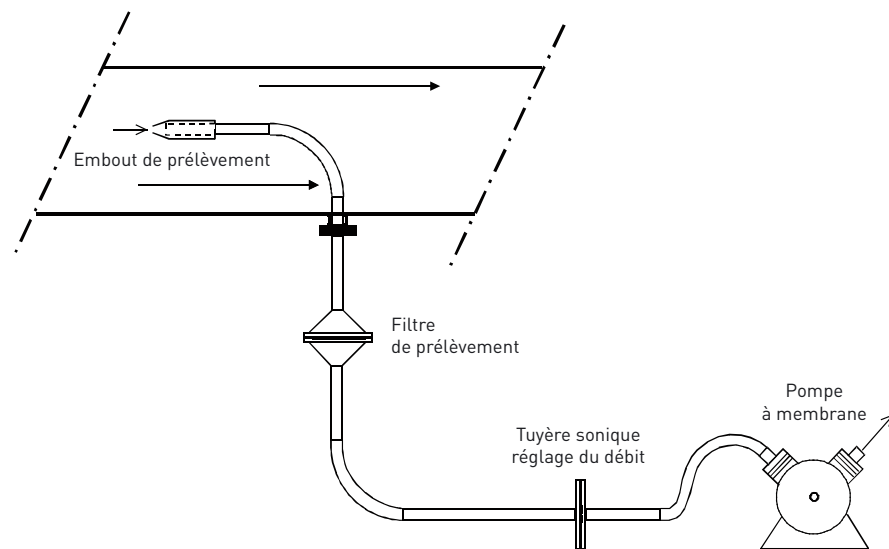


FIGURE 5

Diamètre des particules (d_{ae})
Particle diameter (d_{ae})

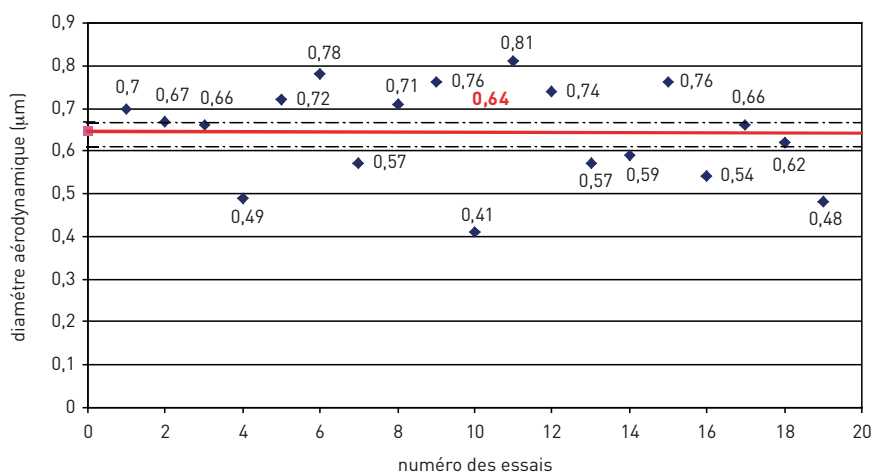
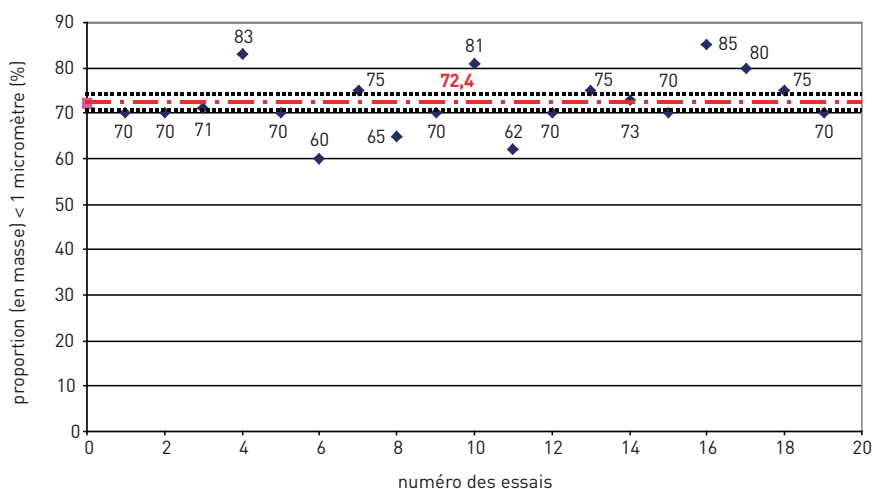


FIGURE 6

Proportion de particules inférieures à $1 \mu\text{m}$
Proportion of particles smaller than $1 \mu\text{m}$



rique maximal (inférieur à 0,1 s) calculé sur la base de données disponibles concernant le séchage en air calme [7]. Le fait de générer l'aérosol liquide dans le conduit d'aspiration, donc en présence d'air en mouvement, tend à accélérer ce temps de séchage théorique.

La granulométrie de l'aérosol a été déterminée à la suite des 18 essais d'évaluation des cinq aspirateurs testés. Pour chaque essai, un profil granulométrique des particules collectées est établi à l'aide d'un logiciel d'exploitation développé à l'INRS. Cette opération permet d'obtenir le diamètre aérodynamique médian (d_{50}) et de déterminer la proportion en masse de l'aérosol inférieure à $1 \mu\text{m}$ (cf. Figures 5 et 6).

En moyenne, le diamètre aérodynamique médian en masse est de $0,64 \mu\text{m} \pm 0,03$ et la proportion en masse inférieure à $1 \mu\text{m}$ est de $72,5 \% \pm 1,3$.

PROCÉDURE D'ESSAI

Chaque essai est conduit selon la séquence suivante :

- l'aspirateur sous test est mis en service et, le cas échéant (appareil à rejet diffus ou canalisé), la ventilation complémentaire est activée afin de régler le débit aval de manière à obtenir une valeur supérieure à celle de l'amont d'environ 15 % (débit additionnel) ;
- mise en service de la génération d'aérosol (atomiseur Laskin 6 buses de génération alimentées à 1,4 bar) et stabilisation durant 1 min ;
- lancement de l'acquisition des paramètres de mesure en continu des débits amont/aval ;
- $T_0 = 0$ mise en service des opérations de prélèvements amont/aval et, le cas échéant, de la mesure de granulométrie ;
- $T_1 = 15$ min arrêt du prélèvement de granulométrie ;
- $T_2 = 30$ min arrêt du prélèvement amont/aval ;
- démontage des filtres de prélèvement et analyse par fluorimétrie.

Chaque aspirateur est testé avec des filtres neufs remplacés après chaque essai. Le test portait sur l'ensemble de l'appareil équipé de tout son dispositif de filtration (préfiltre, filtre principal, filtre terminal le cas échéant).

MÉTHODE D'ANALYSE PAR FLUORIMÉTRIE

Chaque filtre de prélèvement est placé dans un flacon dans lequel on verse un volume de liquide de désorption (50 ml pour le filtre amont et 10 ml pour le filtre aval), d'eau additionnée de tétraborate de sodium (borax) à 9,56 %. Le mélange eau / borax permet d'obtenir une solution basique (pH 9) pour laquelle la mesure par fluorimétrie est optimale. Le même processus est appliqué aux membranes utilisées pour la mesure de granulométrie. Les solutions sont ensuite analysées au moyen du fluorimètre (excitation 488 nm/émission 514 nm) après un délai de désorption d'environ trois heures et, si besoin, d'une dilution de la concentration initiale (les facteurs les plus courants vont de 1000 et plus à l'amont et de 1 à 4 à l'aval).

CRITÈRE D'ÉVALUATION

Les aspirateurs sont évalués par calcul de la moyenne et de l'intervalle de confiance unilatéral des perméances obtenues à la suite de trois à quatre essais effectués dans la même configuration. Le calcul est effectué suivant la norme NF ISO 2602 [8] conformément aux préconisations de la norme d'essai NF EN 60335-2-69.

$$P < \bar{x} + \frac{t_{0,95}}{\sqrt{n}} s$$

P : perméance,

\bar{X} : moyenne des n mesures,

$t_{0,95}$: variable de Student au niveau de confiance 95 %,

s : écart type,

n : nombre d'essais.

ASPIRATEURS TESTÉS

Le choix des aspirateurs a été opéré à partir d'une liste indicative établie par la CRAM Ile de France et des recommandations de l'INRS sur l'usage d'appareils spécifiquement destinés aux travaux de maintenance en présence d'amiante (zone III). De plus l'échantillon devait, autant que possible, représenter des aspirateurs de caractéristiques différentes (puissance, taille, fabricant...).

Parmi les cinq appareils retenus, tous conformes à la norme européenne, trois modèles sont homologués H suivant la norme NF EN 60335-2-69 (B à D) et un

TABLEAU I

Caractéristiques des aspirateurs (données constructeur/données mesurées)
Vacuum cleaner characteristics (manufacturer data/measured data)

Type aspirateur	Débit à dépression nulle ($m^3 \cdot h^{-1}$)	Dépression à débit nul (kPa)	Puissance électrique consommée (W)	Poids (kg)	Type de filtre	Surface filtrante (cm^2)
A	313 / 219	25 / 23	2200 / 2400	30	H13	Non communiqué
B	204 / 189	23 / 17,9	1000 / 1100	14,5	H	10500
C	270 / 172	21,5 / 20	1000 / 1040	26	L H14	Préfiltre : 8000 Filtre : 12000
D	288 / 306	22,5 / 21,8	2400 / 2380	57	H13 U15	Préfiltre : 6600 Filtres : 6600 Filtres : 9200
E	470	28	5000	170	H13 H14	Filtre : 84000 Filtre : 25000

FIGURE 7

Caractérisation débit/pression
Flow/Pressure characterisation

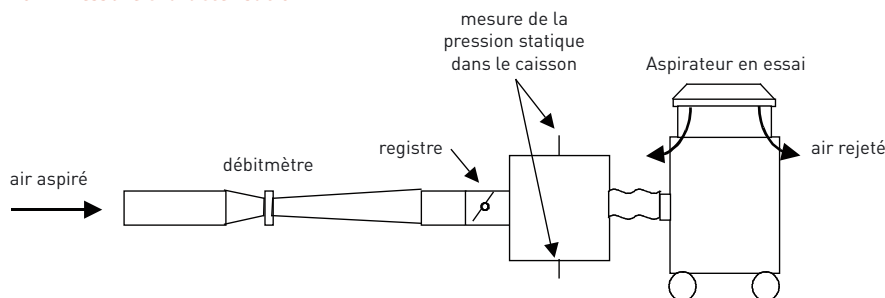
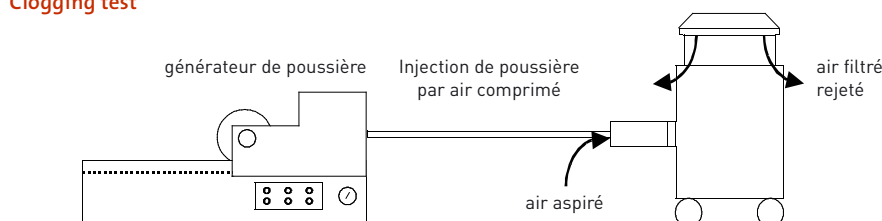


FIGURE 8

Test de colmatage
Clogging test



quatrième également homologué H suivant une norme anglaise BS 5415 (A). Ce sont des aspirateurs mobiles facilement transportables. Le cinquième (E) est un appareil plus spécialement destiné à l'aspiration centralisée (nettoyage, utilisation d'outils portatifs). Le *Tableau 1* regroupe les données fournies par les constructeurs et, pour quelques paramètres, le résultat des mesures réalisées dans le cadre des essais de colmatage.

CARACTÉRISTIQUES AÉRAULIQUES - TEST D'ENCRASSEMENT

Quatre des aspirateurs de l'échantillon, essentiellement les modèles mobiles (A à D), ont été évalués sur leur capacité de colmatage suivant la méthode mise en œuvre au CETIAT (cf. *Figures 7 et 8*). Le colmatage est réalisé par la génération d'une poussière test (ISO 12103-1, A1 Ultrafine Test Dust) composée de particules dont la granulométrie (distribution en masse) s'étend de 0 à 10 μm avec un $D_{50} = 4,5 \mu m$. Durant la phase de génération de poussière la concentration est maintenue constante à 1 $g \cdot m^{-3}$. Le test est réalisé en plusieurs

échelons d'encrassement (5 à 20 selon l'appareil) entre lesquels des mesures de débits sont effectuées. L'essai est arrêté lorsque le débit a été divisé par un facteur supérieur à 2. Si le débit obtenu après le dernier échelon d'encrassement est différent de cette limite, la masse de poussière collectée est calculée par interpolation linéaire entre les deux derniers points. Pour exprimer cette donnée du colmatage sous une forme plus explicite, on peut déterminer un temps moyen d'utilisation pour la poussière-type mise en œuvre, connaissant le débit de poussière générée, la masse collectée et le débit d'aspiration moyen (moyenne des débits mesurés avant et après colmatage) (cf. *Tableau II*).

La durée d'utilisation, estimée dans les conditions du test, est déterminée au moyen de la relation suivante :

$$t = \frac{m}{C \times \bar{Q}}$$

m : masse de poussière collectée (g),
 C : concentration générée (g.m^{-3}),
 \bar{Q} : débit moyen ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$).

Les paramètres mesurés durant le test avant et après colmatage sont :

- la dépression à débit nul, mesurée à l'amont de l'aspirateur (caisson de mesure) ;
 - le débit aspiré à dépression nulle ;
 - la puissance électrique absorbée ;
- ainsi que les paramètres de correction, pression atmosphérique et hygrométrie.

PERMÉANCE MESURÉE PAR COMPTAGE OPTIQUE

Le principe consiste à mesurer les concentrations de l'aérosol à l'amont et à l'aval du dispositif de filtration par comptage optique. Pour cela, un aérosol de chlorure de potassium (KCl) est généré par pulvérisation d'une solution à 1 % en masse au moyen d'un générateur de type Laskin. La concentration en particules est ensuite déterminée au moyen d'un compteur optique (PMS Lasair 1001) à huit canaux (0,1 à 2 μm). Un étage de dilution par 10 (Palas VKL10) est nécessaire pour la détermination de la concentration amont (essai du modèle A). Deux sondes à embout profilé permettent l'échantillonnage dans des conditions isocinétiques de l'aérosol amont/aval. L'aérosol est acheminé vers le compteur via deux tubes carbonés antistatiques (TSI) de même longueur et d'un diamètre interne de 8 mm. Un

TABLEAU II

Caractéristiques de colmatage des quatre aspirateurs mobiles Concentration measurement by optical particle counting (vacuum cleaner E)

	Débit moyen* à dépression nulle [$\text{m}^3.\text{h}^{-1}$]	Masse de poussière générée [g]	Durée moyenne de fonction- nement [min]
A	178	89	30
B	150	518	207
C	128	1200	563
D	223	1386	373

* moyenne des débits avant et après colmatage

échantillonnage automatique de l'aérosol est assuré grâce à deux électrovannes pilotées par un automate. Quatre cycles d'échantillonnage amont/aval sont réalisés, avec une durée de deux minutes pour l'amont et de trois minutes pour l'aval.

L'essai a été effectué avec deux aspirateurs :

a/ le modèle E (centrale d'aspiration) équipé d'un préfiltre (H13) et d'un filtre terminal à très haute efficacité (H14). Le débit d'aspiration est de 385 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$. Un « blanc » est effectué au début des cycles afin de déterminer la concentration relevée par le compteur lorsque celui-ci est connecté à un filtre à très haute efficacité ;

b/ le modèle A (appareil mobile). Cet aspirateur est un exemple d'appareil dont le moteur est susceptible de générer des particules de carbone perturbatrices de la mesure de concentration aval. L'essai est effectué avec l'appareil équipé de son préfiltre et de son filtre terminal H13. Le débit d'aspiration est de 179 $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Un choix délibéré de générer un débit d'aérosol constant à l'amont a été effectué compte tenu d'un faible pouvoir colmatant des particules de petits diamètres, des quantités minimales mises en œuvre, des surfaces filtrantes en jeu et de la durée d'essai réduite. La validité de cette condition a été vérifiée par la mesure en continu des débits amont/aval. Aucune configuration n'a donné lieu à une baisse de débit due à un éventuel colmatage.

Le débit masse d'aérosol solide généré à l'amont de l'aspirateur était fixé par le réglage des paramètres de l'atomiseur Laskin (pression, niveau de liquide, nombre de buses). Il était, par conséquent, maintenu constant pour toutes les conditions de débit d'aspiration. En moyenne, la valeur calculée sur l'ensemble des essais était de 8,7 $\text{mg.min}^{-1} \pm 0,3$. Du fait de la variabilité des débits, les concentrations à l'amont pouvaient varier entre 1,5 et 4,5 mg.m^{-3} . Compte tenu de l'efficacité des différents dispositifs de filtration, des valeurs aussi basses que 1,3.10⁻⁴ à 8,3.10⁻⁶ mg.m^{-3} ont pu être mesurées à l'aval grâce à la très grande sensibilité de la technique de mesure par fluorimétrie. Suivant un étalonnage approprié (cf. *Annexe 1*), il a été possible de détecter dans les solutions aqueuses des concentrations de fluorescéine inférieures à 1 $\mu\text{g.l}^{-1}$ (0,7 à 1,2 pour les plus basses). Les perméances calculées à l'issue des essais des cinq aspirateurs sont présentées sur la *Figure 9*. Chaque appareil est évalué par rapport à la moyenne de trois ou quatre essais. Pour un appareil (C), la perméance mesurée est très différente de celle des autres appareils. Afin de tenter de lever le doute, un test de recherche de valeurs aberrantes a été appliqué (test de Dixon). La valeur minimale en cause a été conservée pour le calcul de la moyenne car le test n'a pas prouvé qu'elle était statistiquement différente des autres. Au niveau de risque de 5 % d'erreur, la valeur calculée est de 0,761 alors que la valeur critique est de 0,765. L'écart que l'on observe entre cette dernière et les autres valeurs mesurées avec le même aspirateur résulte des conditions expérimentales sans qu'il soit possible d'attribuer une cause identifiée à cette différence.

Les conditions de mise en œuvre de la présente méthode sont en plusieurs points différentes de celles qui sont décrites dans la norme NF EN

60335-2-69. Cependant, si l'on se réfère au principe de mesure différentielle amont/aval, il paraît intéressant de comparer les perméances déterminées par fluorimétrie à la perméance limite fixée par la norme pour un appareil complet assemblé ($P < 5.10^{-3} \%$) (cf. Figure 10).

Après détermination de l'intervalle de confiance tel que défini dans la norme ISO 2602 [8], il ressort de cette comparaison que, sur les cinq aspirateurs testés, deux se situent sous la valeur limite de $5.10^{-3} \%$; appareils D : $2,73.10^{-3} \%$ et E : $1,26.10^{-3} \%$ tandis que les trois autres montrent des perméances supérieures à ce seuil; appareils A : $9,1.10^{-3} \%$; B : $1,37.10^{-2} \%$; C : $2,44.10^{-2} \%$.

TEST D'ENCRASSEMENT

Sur le plan de la résistance à l'encrassement, les quatre aspirateurs ont des résultats assez divers. Cette aptitude est fortement dépendante de la surface filtrante en jeu, donnée qui n'a pas été fournie pour tous les appareils testés et potentiellement très différente d'un modèle à l'autre.

Dans l'éventail des aspirateurs choisis, les dépressions à débit nul se situent dans la fourchette de 18 kPa à 23 kPa et la gamme de débit s'étend de $172 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ à $306 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$. Dans ces conditions, la capacité d'aspiration peut fortement varier. Pour atteindre la moitié du débit d'aspiration initial, la masse de poussière collectée varie de 89 g (A) à 1 386 g (D), soit une masse 16 fois plus élevée entre l'appareil le plus performant et l'appareil le moins performant.

Considérant le temps estimé de colmatage, on peut noter que les quatre aspirateurs de l'échantillon présentent, en moyenne, des performances très variées en présence d'un type de poussière donnée (30 min à 9 h 20) (cf. Tableau II).

Une autre technique basée sur le comptage optique, couramment utilisée pour la mesure d'efficacité de filtration, ne permet pas d'atteindre la même sensibilité que celle mettant en œuvre la fluorescéine. Cette autre technique a été appliquée avec le même banc d'essai dans une configuration mettant en œuvre deux appareils, le plus performant (E) et le moins performant (A) de l'échantillon d'aspirateurs testés.

FIGURE 9

Perméances des cinq aspirateurs (A à E).
Pour chaque appareil sont regroupées les perméances relatives à chaque essai
Permeabilities of five vacuum cleaners (A to E).
Permeabilities for each test and their mean for n tests are consolidated for each appliance.

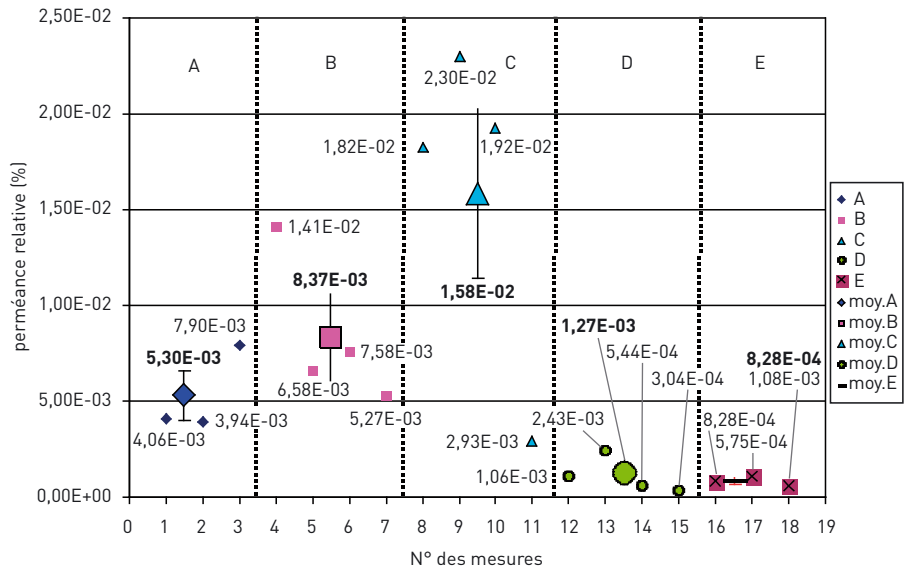
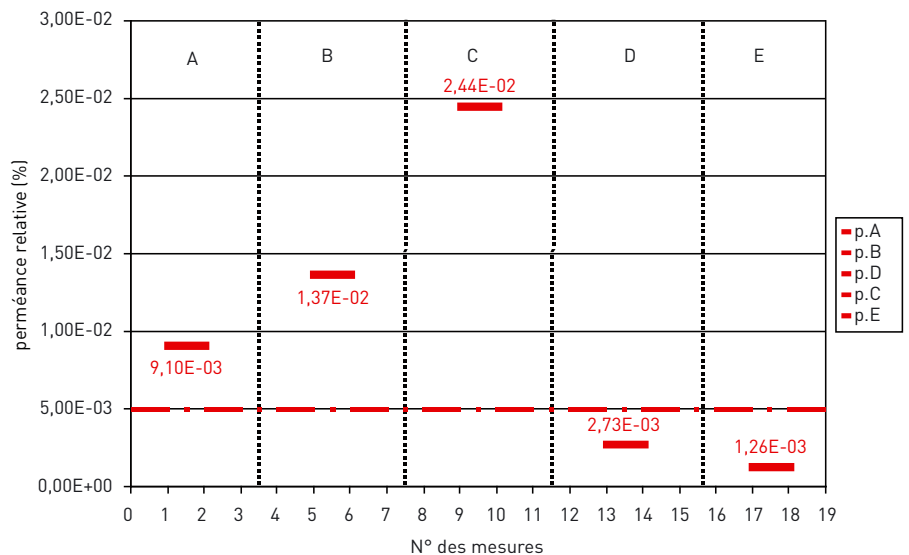


FIGURE 10

Perméances déterminées par fluorimétrie comparées à la limite (trait mixte) fixée par la norme avec les cinq aspirateurs (A à E)
Permeabilities determined by fluorimetry compared with the limit (combined line) established by the standard for the five vacuum cleaners (A to E)



MESURE DE L'EFFICACITÉ PAR COMPTAGE OPTIQUE

Un exemple des concentrations mesurées par comptage avec l'aspirateur (E) est présenté sur la Figure 11. Les concentrations aval mesurées (séquences a à d) sont voisines de la concentration minimum donnée par le dispositif de mesure, suite à l'opération dite de détermination du « blanc » (air filtré à l'entrée du compteur optique de particules). La

perméance ainsi mesurée est inférieure à 5.10^{-3} sur l'ensemble du domaine granulométrique analysé. Cette valeur correspond à la perméance minimale pouvant être déterminée au moyen de la méthode par comptage optique (soit une efficacité maximale égale à 99,95 %). Elle est, par conséquent, nettement supérieure à la perméance pouvant être déterminée par fluorimétrie avec ce même type d'aspirateur (cf. Figure 9), soit : $8,3.10^{-4}$.

La concentration aval en particules peut être très faible dans le cas des systèmes munis de filtration de type HEPA, de telle sorte que la moindre contamination particulaire peut dégrader l'efficacité mesurée par comptage. Or, certains aspirateurs sont dotés d'un ventilateur susceptible de générer des particules de carbone provenant des brosses en carbone qui, par abrasion, sont à l'origine de ces particules [9]. Ces particules de carbone, comptées au même titre que les particules test de KCl, sont à l'origine d'une augmentation artificielle de la perméance mesurée. Une procédure de correction a été mise au point à l'INRS dans le cadre d'une étude sur les cabines pressurisées à air filtré des engins agricoles (CPAF) [10]. Elle consiste à mesurer les concentrations amont/aval en deux étapes : à concentration amont élevée (conditions normales) et à concentration amont plus faible. Un calcul permet d'éliminer, à partir de ces deux séries de mesures, la proportion en particules « parasites », venant perturber la mesure de la concentration aval. Un exemple est donné sur la *Figure 12*, montrant la perméance (aspirateur A) déterminée à partir des concentrations mesurées suivant la première étape et la perméance corrigée. La correction permet d'établir une perméance ($P = 4.10^{-1}$, $dp = 0,4 \mu\text{m}$) plus proche de celle déterminée par fluorimétrie dans les mêmes conditions d'essai ($P = 2,7.10^{-3}$, $dp = 0,4 \mu\text{m}$), mais néanmoins encore nettement supérieure.

Cet essai montre les limites de la méthode par comptage optique pour la mesure de l'efficacité des dispositifs à filtres THE munis d'un ventilateur générant des particules de carbone, à l'origine d'un artefact ne pouvant être éliminé complètement au moyen de la procédure corrective. Le recours à un aérosol traceur de type fluorescéine est, dans ce cas, une solution permettant de s'affranchir du problème posé par ces particules générées par le processus. Néanmoins, les méthodes optiques permettant de déterminer rapidement un défaut d'étanchéité et l'efficacité du dispositif de filtration, peuvent présenter un réel intérêt, par exemple pour des évaluations de contrôle au moment de la fabrication des appareils.

FIGURE 11

Mesure de concentration par comptage optique (aspirateur E)
Clotting characteristics of four mobile vacuum cleaners

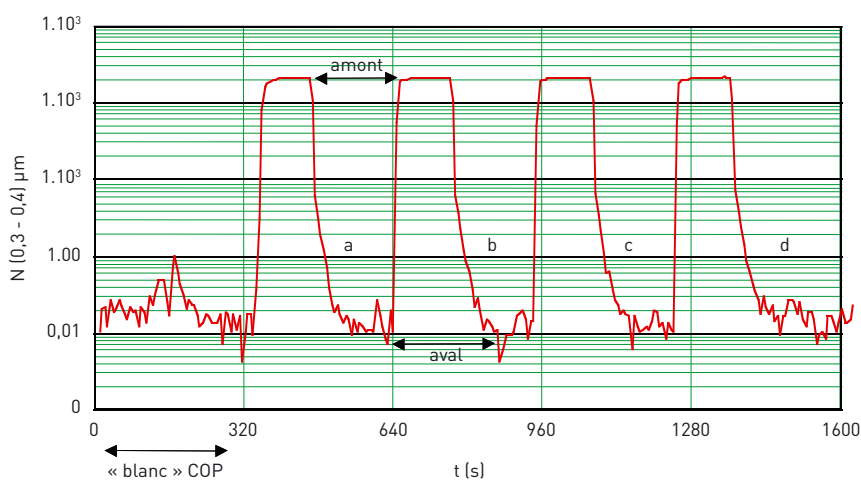
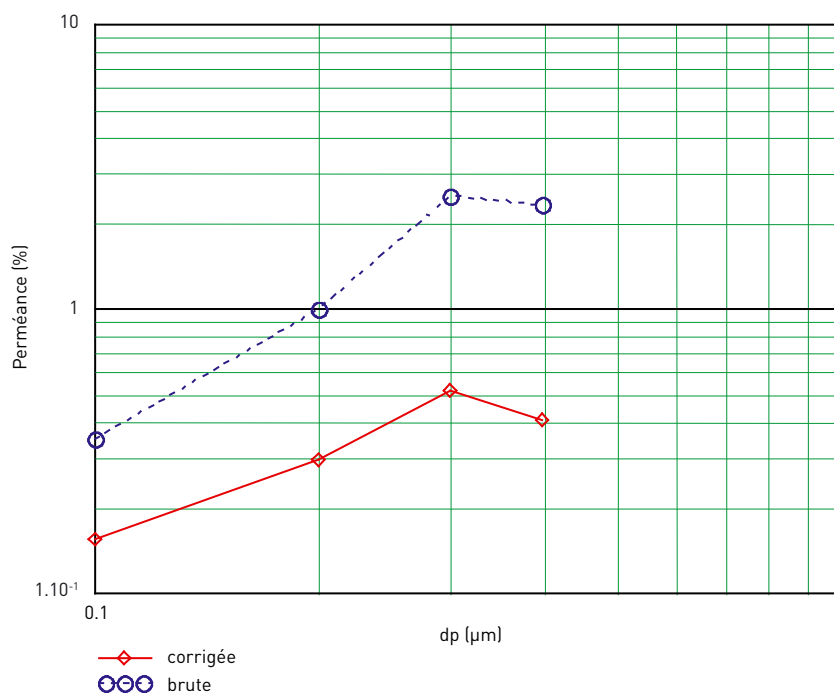


FIGURE 12

Perméance toutes particules mesurées (brute) et perméance corrigée des particules de carbone (aspirateur A)
Gross permeability to all measured particles and corrected permeability to carbon particles (vacuum cleaner A)



CONCLUSION

La méthode présentée dans cet article montre l'intérêt de la fluorimétrie pour déterminer l'efficacité de dispositifs de filtration d'aspirateurs hautement performants. L'application de cette méthode nécessite des moyens d'essai

ainsi qu'un appareillage simple à mettre en œuvre (conduits de ventilation de faible diamètre, chambre d'essai adaptée à la taille des aspirateurs, générateur d'aérosol fonctionnant par air comprimé, dispositif de prélèvement sur filtre...). Cependant, l'utilisation de la fluorescéine demande une certaine rigueur tout au long de la chaîne de mani-

pulation du produit en poudre et des solutions liquides. L'extrême sensibilité de la technique la rend vulnérable à la moindre pollution d'un des éléments de la chaîne de mesure (gouttelette projetée sur une cuve de solution, nettoyage imparfait...). Néanmoins, son intérêt est particulièrement renforcé lorsqu'il s'agit de s'affranchir de difficultés de mesures

relatives à la génération de particules diverses (moteurs d'aspirateurs, fuites éventuelles dans le circuit de mesure ou remise en suspension de poussière). Au registre des avantages, on peut également noter qu'il est possible de caractériser les aspirateurs à l'issue d'une faible durée d'essai (30 minutes). Sur un plan fonctionnel, les mesures d'encras-

sement réalisées à l'aide d'une poussière test permettent d'évaluer la capacité de collection de quelques appareils mobiles courants présents sur le marché.

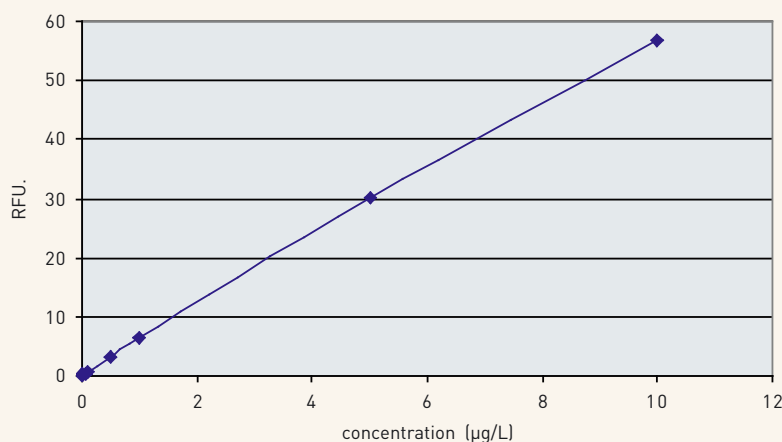
Reçu le : 04/02/2008

Accepté le : 18/02/2008

ANNEXE 1

ETALONNAGE DU FLUORIMÈTRE

Solution étalon	Réponse fluorimètre
$\mu\text{g/L}$	RFU
0	0,103
0,005	0,173
0,01	0,199
0,01	0,476
0,05	0,476
0,1	0,751
0,5	3,218
1	6,396
5	30,28
10	56,84



BIBLIOGRAPHIE

[1] NF EN 60335-2-69 - Appareils électrodomestiques et analogues. Annexe AA : Exigences particulières pour les aspirateurs, les balayeuses à aspiration et les extracteurs de poussière destinées au ramassage des poussières dangereuses pour la santé. AFNOR (octobre 2005)

[2] HEIMANN M., JURKUS R. – Ein neues Verfahren zur Prüfung von staubseitigen Maschinen. Sonderdruck aus „Die BG“, Heft 8, 2002, 4 p.

[3] BSI 5415 : Safety of electrical motor-operated industrial and commercial cleaning appliances. Part 2. Particular requirements. Section 2.2. Specification for vacuum cleaners, wet and/or dry. (BSI 1986)

[4] WILLEKE K., TRAKUMAS S., GRINSHPUN S.A., REPONEN T., TRUNOV M., FRIEDMAN W. – Test methods for evaluating the filtration and

particulate emission characteristics of vacuum cleaners. American Industrial Hygiene Association Journal 62: 313-321 (2001)

[5] TRAKUMAS S., WILLEKE K., GRINSHPUN S.A., REPONEN T., MAINELIS G., FRIEDMAN W. – Particle emission characteristics of filter-equipped vacuum cleaners. American Industrial Hygiene Association Journal 62 : 482-493 (2001)

[6] CSTB RECHERCHE – Qualité de l'air - Évaluer les performances des aspirateurs ménagers - Lettre d'information n°62, Mai 2003, 2 p.

[7] FERRON G.A., SODERHOLM S.C. – Estimation of the time for evaporation of pure water droplets and for stabilization of salt solution particules. Journal of Aerosol Science. Vol. 21. n°3, pp.415-429, (1990)

[8] ISO 2602 – Interprétation statistique de résultats d'essais - Estimation de la moyenne - Intervalle de confiance. AFNOR (Janvier 1980)

[9] HEITBRINK W. A., COLLINGWOOD S – Aerosol generation by blower motors as a bias in assessing aerosol penetration into cabin filtration systems. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2, 45-53 (2005)

[10] BEMER D., LECLER M.T., SUBRA I., LARRAT J.P., SCHAEFFNER D. – Performance of agricultural vehicle cabs pressurised against pesticides - Aerosol testing method. Biosystems Engineering, 91(3), 313-320 (2005)