

→ J.P. Muller, D. Bémer,
J.M. Dessagne, Département
Ingénierie des procédés, Centre de
l'INRS-Lorraine, Nancy

Dysfonctionnement des dépoussiéreurs de l'industrie du bois

Etude de deux principes d'appareils de détection

MALFUNCTION OF DUST CONTROL UNITS IN THE WOODWORKING SECTOR

STUDY OF TWO PRINCIPLES OF
DETECTION DEVICES

Recirculation of purified air in
woodworking workshops requires
efficient and continuous monitoring.
Systems for the detection of dust
control unit malfunctions must be
installed to prevent the accidental
reintroduction of dust.

The aim of this test bench study was to
investigate two measurement principles
specifically adapted to this type of
monitoring. The method developed for
the tests allowed simulation of two
types of incidents and verification of
the influence of certain parameters on
the response of the detection devices.
The study showed that all
the triboelectric effect devices tested
are capable, with varying degrees of
sensitivity, of detecting both types of
incidents simulated on the test bench.
As regards the photometers, the ortho-
gonal diffusion devices, which are very
sensitive to variations in aerosol
particle size, are unsuitable for this
type of application. However, the results
obtained for photometers operating with
low front diffusion angles and
sometimes employing computerised
corrections allow their use to be
envisaged to detect malfunctions.

● woodworking ● dust control unit
● malfunction ● detection device
● test bench ● triboelectric probe
● photometer

Le recyclage de l'air épuré dans les ateliers de l'industrie du bois nécessite une surveillance efficace et continue. Des systèmes de contrôle, permettant de détecter les dysfonctionnements de l'installation, doivent être installés afin d'éviter une réintroduction accidentelle de poussière.

L'étude a pour objectif de tester, sur banc d'essai, deux principes de mesurage plus spécifiquement adaptés à ce contrôle. La méthode de mesure mise au point pour les essais a permis de simuler deux types d'incidents et de vérifier l'influence de certains paramètres sur la réponse des appareils.

L'étude a montré que l'ensemble des appareils à effet triboélectrique testés sont capables, avec des sensibilités variées, de déceler les deux types d'incidents simulés sur banc d'essai. En ce qui concerne les photomètres, les appareils à diffusion orthogonale, très sensibles aux variations granulométriques de l'aérosol, ne peuvent convenir pour ce type d'application. Cependant, les résultats obtenus, pour des photomètres fonctionnant avec des angles de diffusion avant faibles et mettant en œuvre des corrections informatiques, permettent d'envisager leur utilisation pour la détection des dysfonctionnements.

● bois ● menuiserie ● atelier ● poussière ● dysfonctionnement ● appareil
● détection ● banc d'essai ● test ● sonde à effet triboélectrique ● photomètre

Les poussières émises lors de l'usage du bois peuvent induire des pathologies de type allergique ou des cancers des voies respiratoires supérieures (cancer etmoïdonasal). Depuis 1997 en France, la valeur limite indicative pour les moyennes d'exposition est de 1 mg.m⁻³ (au sens de la fraction inhalable) pour tous les types d'installations [1, 12]. Une Directive européenne du 29 avril 1999 [2] reconnaît que le caractère cancérigène des poussières de hêtre et de chêne a été confirmé par des études épidémiologiques et qu'il est hautement probable pour d'autres types de poussières de bois.

Cette directive fixe également, pour les seuls bois durs, une valeur limite d'exposition professionnelle de 5 mg.m⁻³, mais il s'agit là d'une prescription minimale applicable à tous les membres de l'Union européenne. Le recyclage de l'air utilisé pour capter et évacuer les déchets produits par les machines, n'est autorisé par la réglementation française, relative à l'aération et

l'assainissement des locaux de travail, que si certaines mesures compensatoires sont remplies. Il est notamment stipulé, outre le respect des exigences en termes d'exposition, que l'air doit être efficacement épuré avant réintroduction dans les locaux et que « les installations de recyclage doivent comporter un système de surveillance permettant de déceler les défauts des dispositifs d'épuration » [1]. Cette surveillance continue ne se substitue pas au contrôle périodique des concentrations en poussière (semestriel puisqu'il y a recyclage) en aval des dépoussiéreurs.

Le projet de norme européenne EN 12779 [3], traitant des installations d'extraction de poussières de bois, prévoit également le contrôle permanent des concentrations en poussière, en aval des dépoussiéreurs. On distingue plusieurs familles d'appareils pouvant convenir pour cette application : les sondes à effet triboélectrique, les sondes optiques (photomètres, opacimètres) et les compteurs de parti-

cules. De tels appareils de surveillance équipent depuis un certain temps les cheminées de rejets industriels, toutefois leur coût était prohibitif pour les ateliers de deuxième transformation du bois. Des modèles simplifiés d'un coût plus acceptable ⁽¹⁾ sont actuellement commercialisés en Europe. En France, il s'agit essentiellement de sondes à effet triboélectrique qui équipent les dépoussiéreurs de quelques dizaines d'ateliers.

Afin d'évaluer la pertinence des appareils, plus spécifiquement adaptés au secteur du bois, et de déterminer l'influence de divers facteurs sur leur réponse, l'INRS a entrepris de tester sur banc d'essai les sondes à effet triboélectrique et les photomètres. Les opacimètres, plutôt dédiés aux mesures d'environnement, et les compteurs de particules, plutôt utilisés en laboratoire, n'ont pas été retenus pour cette étude.

1. Appareils testés

1.1. Appareil à effet triboélectrique

Le principe utilisé par cet appareil est basé sur la mesure du courant électrique généré lors de l'impact des particules sur une tige métallique placée dans un flux d'air chargé de poussière (effet triboélectrique) [4]. La figure 1 montre l'implantation de la sonde de détection dans le conduit de recyclage d'une installation.

L'objectif visé est de corrélérer le signal électrique fourni à la concentration massique de poussière. La charge de contact dépend également de nombreux paramètres, tels que la nature des particules, leur vitesse, leur taille...

Une technologie nouvelle est basée sur le principe que le courant mesuré n'est pas seulement attribuable à l'impact des particules mais aussi à leur état de charge électrique initial [5].

Le calcul du nombre de Stokes de la particule indique que seules les particules de gros diamètres (> 10 µm) sont susceptibles d'impacter sur l'obstacle. Or, certains systèmes fournissent néanmoins une réponse en présence de particules très fines n'ayant qu'une très faible probabilité d'impaction. Ce phénomène peut être

attribué à la charge image induite sur le barreau conducteur par les particules passant dans son voisinage, mais sans contact.

Le courant mesuré se caractérise alors par deux composantes distinctes : un signal continu (DC) produit par l'impact direct des particules (effet triboélectrique) et une composante alternative (AC) générée par les particules chargées, passant à proximité de la sonde [6].

Certains appareils à effet triboélectrique prendraient en compte l'intégralité du signal électrique alors que d'autres supprimeraient le signal continu généré par l'impact des particules pour ne mesurer que la composante alternative, dans le but de limiter les effets liés aux variations de la vitesse des particules dans le conduit de recyclage [7]. Cependant, la recherche bibliographique entreprise sur ce point précis n'a donné que très peu d'éléments permettant de vérifier ce principe énoncé par certains constructeurs.

1.2. Photomètre (fig. 2)

Le principe de mesure de cet appareil est basé sur la détection de la lumière diffusée par les particules sous un angle de diffusion donné par rapport au faisceau incident. Suivant les modèles, cet angle peut se situer entre 15° à 120°.

Travaillant généralement en cellule ouverte, le photomètre exploite la lumière diffusée par un volume fini, contenant un ensemble de particules. Les appareils se différencient :

- par le type et la longueur d'onde de la source de lumière,
- par les angles de collection Ω et de diffusion θ .

Les différentes combinaisons de ces paramètres donnent des appareils plus ou moins sensibles à la taille des particules. Certains seront capables de détecter une granulométrie de poussière qui ne sera pas vue par d'autres appareils ayant des réglages optiques différents [8, 9].

Fig. 1. Implantation de la sonde à effet triboélectrique - Installation of the triboelectric effect probe

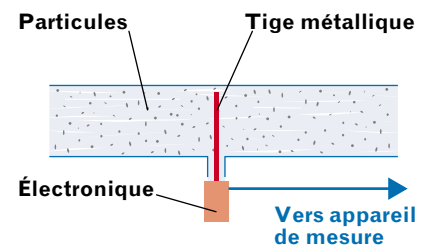
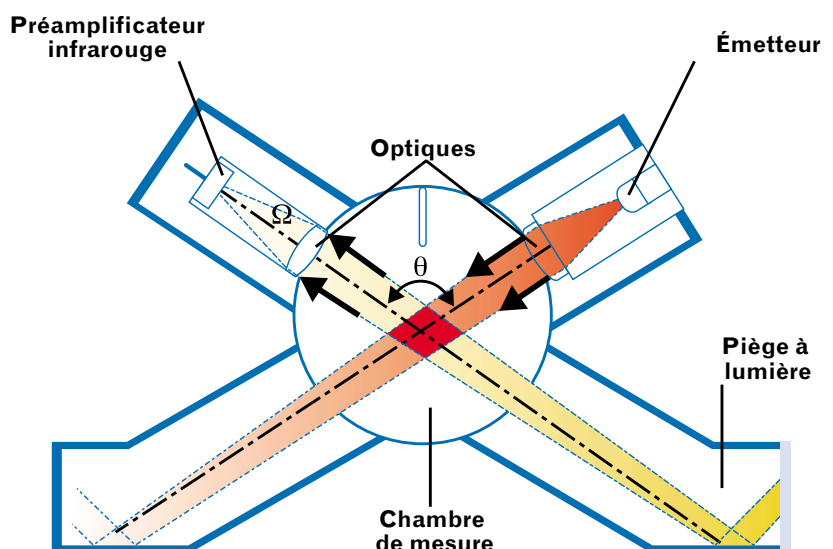


Fig. 2. Description d'un photomètre - Description of a photometer



⁽¹⁾ Prix compris entre 10 000 et 15 000 F HT (1 524,49 et 2 286,73 Euro), installation comprise.

Cette méthode permet de mesurer des concentrations de poussière assez élevées, mais en général, un changement de distribution granulométrique de l'aérosol à tester pourra modifier, parfois de façon importante, la réponse (appareils à diffusion orthogonale).

Certains appareils, associés à un traitement informatique et dont le principe se rapproche de celui du compteur de particules, permettent de corriger les effets des variations granulométriques sur la réponse.

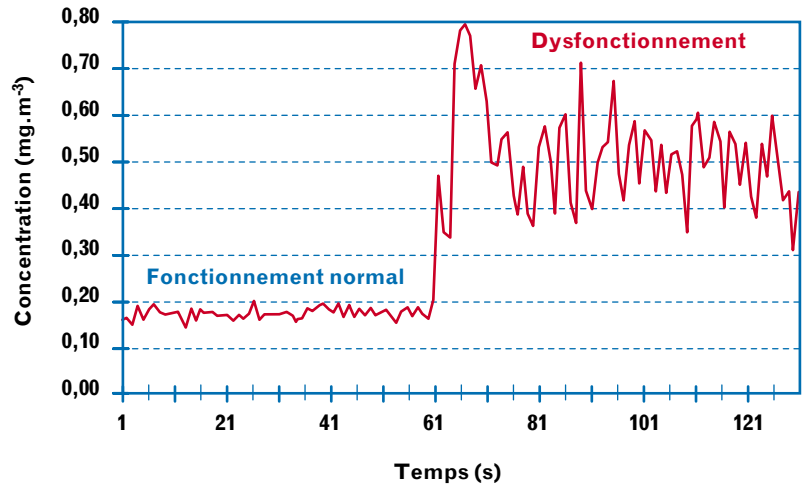
Ils fonctionnent généralement sous des angles de diffusion avant faibles de l'ordre de 15°.

Les appareils sont placés dans le conduit d'essai, de façon à ce que le flux d'air chargé de particules traverse leurs chambres de mesure. Ils sont préalablement étalonnés en concentration par rapport aux mesures de l'appareil de référence.

2. Incidents de filtration rencontrés sur un dépoussiéreur

A partir des mesures effectuées sur le terrain et des données communiquées par les constructeurs de dépoussiéreurs, deux types d'incidents représentatifs de la réalité ont été adoptés conventionnellement. Les essais ont permis de déterminer l'aptitude des deux principes de mesure à détecter ces incidents.

Fig. 3. Evolution de la concentration mesurée par l'appareil de référence pour un dysfonctionnement de type 1 - Change in concentration measured by reference device for a type 1 malfunction



2.1. Incident de type 1

Cet incident correspond à un dysfonctionnement franc, représentatif d'un décrochage ou d'une large déchirure d'une manche de filtration.

Il est caractérisé par un accroissement brutal de la concentration de poussière de plusieurs mg.m⁻³, avec un déplacement sensible de la granulométrie vers les plus grands diamètres.

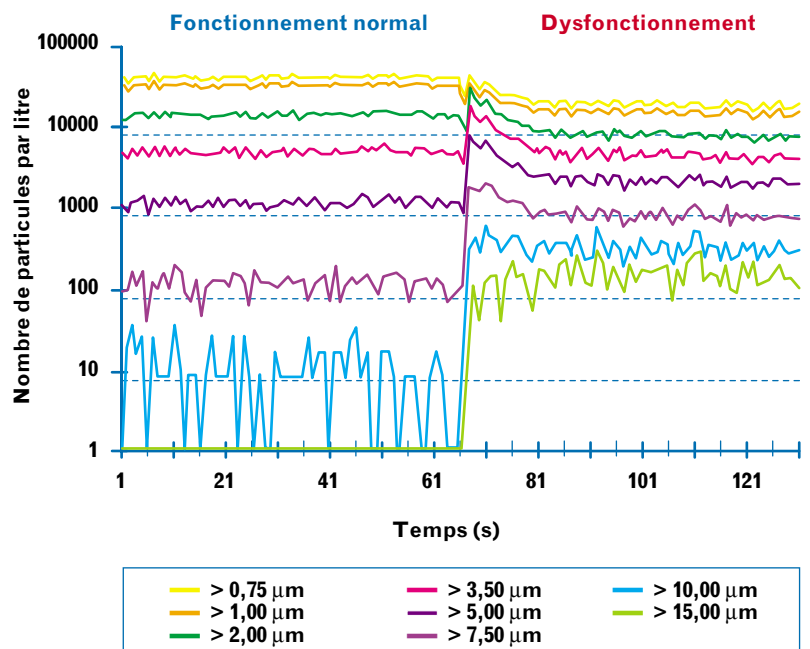
Les variations de concentrations de poussière et de granulométrie reproduites sur banc d'essai, sont présentées sur les courbes des figures 3 et 4 pour ce type d'incident (2).

On observe, dans cette configuration, une augmentation importante du nombre de particules supérieures à 15 µm.

La faible diminution du nombre total de particules, observée figure 4, peut provenir du générateur de poussières qui met en œuvre deux circuits d'aspiration différents pour simuler les deux phases de fonctionnement. Les débits d'air respectifs de ces deux circuits peuvent aussi varier très légèrement.

(2) Concentrations et nombre de particules déterminés à l'aide de l'appareil de référence (cf. § 4.3).

Fig. 4. Evolution du nombre de particules mesuré par l'appareil de référence pour un dysfonctionnement de type 1 - Change in number of particles measured by reference device for a type 1 malfunction



2.2. Incident de type 2

Cet incident correspond à un mauvais état de la manche filtrante, dû à l'usure ou au vieillissement, et qui entraîne l'apparition de très faibles déchirures ou détériorations. Il est caractérisé par un accroissement sensible de la concentration sans réel changement de granulométrie de la poussière.

Les figures 5 et 6 présentent un exemple de dysfonctionnement de type 2 reproduit en laboratoire. On remarque, dans ce cas, qu'il n'y a plus de particules supérieures à 15 µm.

3. Description des essais

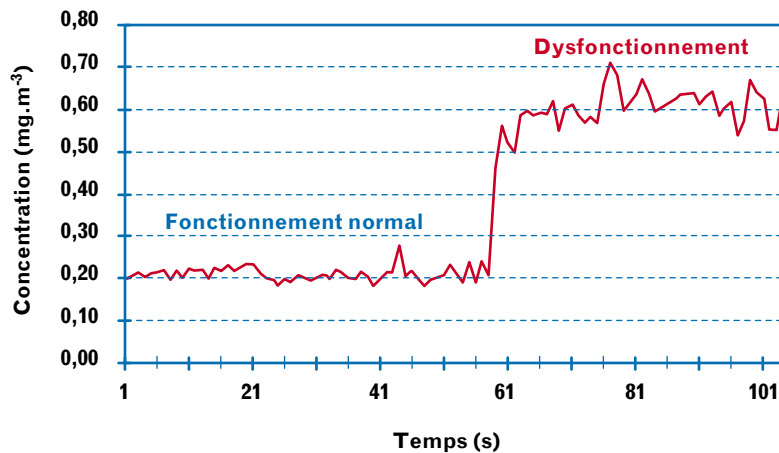
3.1. Principe et méthode

Il convient de reproduire en laboratoire, d'une façon représentative, les deux situations de dysfonctionnement d'un dépoussiéreur décrites aux paragraphes précédents.

Les appareils à tester sont placés dans une veine d'essai dont le débit d'air est mesuré. Ils sont soumis, dans un premier temps, à un niveau de concentration et de granulométrie de poussière de bois caractérisant le fonctionnement normal du dépoussiéreur. La phase de dysfonctionnement est ensuite simulée par un changement rapide de concentration, avec ou sans modification de la granulométrie. Plusieurs échelons de concentration peuvent être testés dans ce cycle. Chaque configuration fait l'objet d'au moins trois essais.

Pour chacune des phases, les valeurs délivrées par les appareils sont comparées aux valeurs d'un appareil de référence (compteur de particules, cf. § 4.3), préalablement étalonné avec ce type de poussière. On calcule ensuite un indice de réponse qui caractérise l'aptitude des appareils à déceler un dysfonctionnement (cf. § 3.3).

Fig. 5. Evolution de la concentration mesurée par l'appareil de référence pour un dysfonctionnement de type 2 - Change in concentration measured by reference device for a type 2 malfunction



3.2. Paramètres d'essais

En fonction des principes de détection, plusieurs paramètres d'essais sont testés afin de déterminer leur effet sur la réponse des appareils.

Le tableau 1 regroupe ces paramètres et les valeurs retenues pour les essais.

3.3. Critères d'évaluation

La figure 7 présente un exemple de signaux délivrés par l'appareil de référence (cf. § 4.3) et un appareil en test pour les deux phases de la mesure et les valeurs qui serviront pour le calcul de l'indice de

réponse I_m . Cet indice sera calculé pour chaque type de dysfonctionnement et permettra d'évaluer l'aptitude des divers appareils à les détecter.

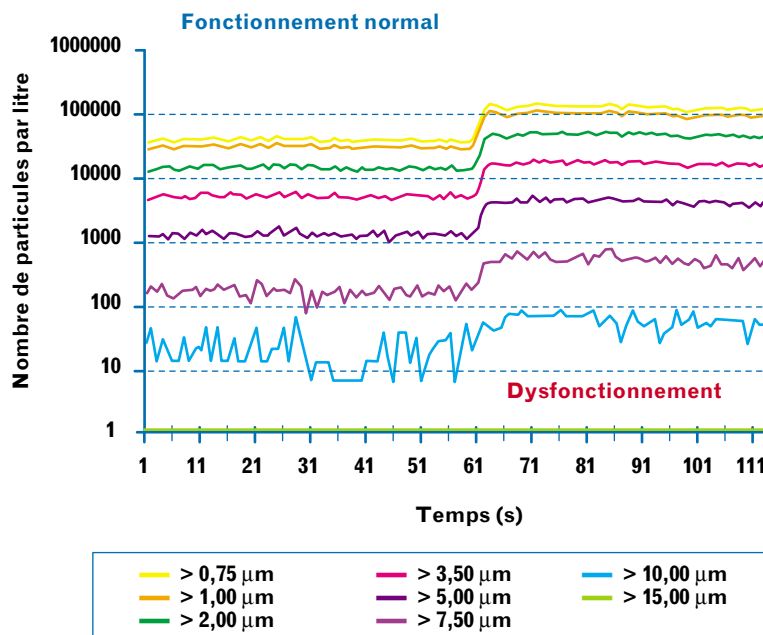
A partir des différentes concentrations mesurées pendant l'essai, comme le montre l'exemple de la figure 7, on peut calculer l'indice de réponse I_m de l'appareil en test :

$$I_m = \frac{\bar{C}_{2m}}{\bar{C}_{1m}}$$

Cet indice I_m sera comparé à l'indice de réponse I_r de l'appareil de référence :

$$I_r = \frac{\bar{C}_{2r}}{\bar{C}_{1r}}$$

Fig. 6. Evolution du nombre de particules mesuré par l'appareil de référence pour un dysfonctionnement de type 2 - Change in number of particles measured by reference device for a type 2 malfunction



et plus précisément aux bornes de cet indice définies en tenant compte du calcul de l'incertitude de mesure de cet appareil :

$$I_{r\min} = \frac{\bar{C}_{2r\min}}{C_{1r\max}} \quad I_{r\max} = \frac{\bar{C}_{2r\max}}{C_{1r\min}}$$

Le calcul d'incertitude de mesure effectué sur ces valeurs de concentration C_r donne :

- ± 19 % pour la poussière de 3/5 µm ;
- ± 23 % pour la poussière de 12/15 µm.

On peut alors calculer $I_{r\min}$ et $I_{r\max}$.

Si l'indice I_m est supérieur à $I_{r\min}$, l'appareil en test est capable de détecter un dysfonctionnement.

Si, de plus, la valeur de cet indice I_m est comprise entre les valeurs $I_{r\min}$ et $I_{r\max}$, l'appareil pourra délivrer, à condition qu'il ait été préalablement étalonné, des valeurs de concentration comparables à celles délivrées par l'appareil de référence.

A titre d'exemple, on relève sur les courbes de la figure 7 qui représentent un dysfonctionnement de type 1 :

$$\bar{C}_{1r} = 0,21 \text{ mg.m}^{-3} \quad \bar{C}_{1m} = 0,25 \text{ mg.m}^{-3}$$

$$\bar{C}_{2r} = 0,40 \text{ mg.m}^{-3} \quad \bar{C}_{2m} = 0,53 \text{ mg.m}^{-3}$$

d'où $I_m = 2,12$

$I_{rm} = 1,23$ et $I_{rmax} = 3,82$

Dans ces conditions :

$I_m > I_{r\min}$ et $I_{r\min} \leq I_m \leq I_{r\max}$,

l'appareil est acceptable pour les fonctions de détection et de mesure.

Dans certains cas, un appareil en test peut être très sensible et donner :

$I_m \geq I_{r\max}$

Il pourra accomplir sa fonction de détection mais les valeurs de concentration indiquées ne seront pas correctes, essentiellement en raison du changement de granulométrie.

Si un appareil donne :

$I_m < I_{r\min}$

il ne peut convenir pour aucune des deux fonctions.

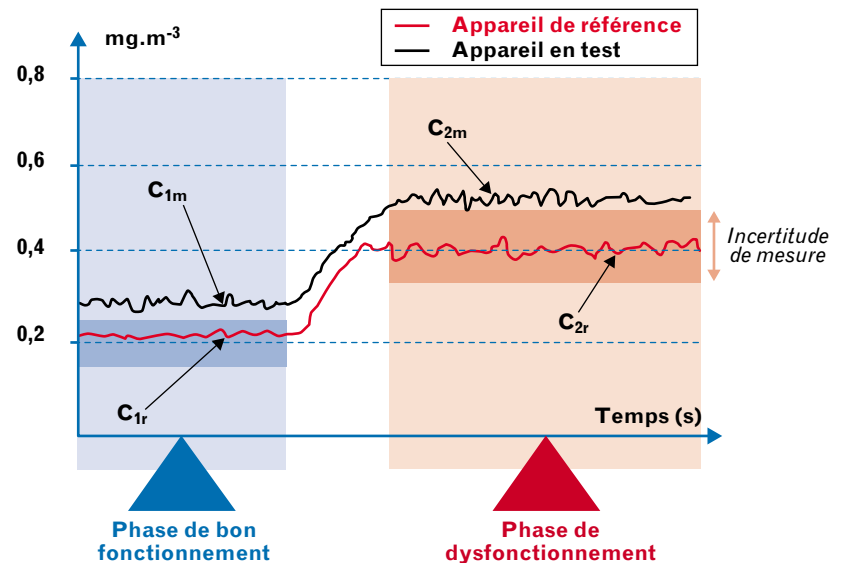
Fig. 7. Exemple de signaux caractérisant un dysfonctionnement - Example of the signals characterising a malfunction

TABLEAU I

CONFIGURATIONS TESTÉES - CONFIGURATIONS TESTED

Paramètres d'essais	Valeurs des paramètres
Concentration de poussière en fonctionnement normal	0,2 mg.m ⁻³
Granulométrie de la poussière en fonctionnement normal	3 < dmm < 5 µm (*)
Concentration en situation de dysfonctionnement de types 1 et 2	0,4 - 0,6 - 0,8 mg.m ⁻³
Granulométrie de la poussière en situation de dysfonctionnement	Type 1 12 < dmm < 15 µm Type 2 3 < dmm < 5 µm
Vitesse d'air dans le conduit	8 et 14 m.s ⁻¹
Etat de charge des particules	Charge initiale et neutralisation
Humidité relative de l'air	30 % < HR < 60 % en fonction des conditions climatiques
Nature de la poussière	Bois durs (mélange de chêne et de hêtre)

(*) dmm : diamètre médian en masse.



C_{1r} : concentration de référence en fonctionnement normal (mg.m³)
 C_{2r} : concentration de référence en phase de dysfonctionnement (mg.m³)
 C_{1m} : concentration mesurée par l'appareil en test en fonctionnement normal (mg.m³)
 C_{2m} : concentration mesurée par l'appareil en test en phase de dysfonctionnement (mg.m³)

4. Présentation du banc d'essai

Le banc d'essai (cf. schéma en annexe) est constitué d'un circuit de ventilation relié à un ventilateur et d'un générateur de poussière. Le débit d'air réglé à l'aide d'un registre est mesuré à partir d'un diaphragme monté sur un caisson réduit. Pour réduire l'empoussièrement résiduel, un filtre très haute efficacité (type HEPA®) est placé dans le circuit de ventilation à l'amont du générateur de poussière.

4.1. Générateur de poussière

Cet appareil du type générateur à sole tournante peut réaliser des échelons de concentrations avec des granulométries différentes, grâce à l'utilisation d'un circuit de cyclonage et d'un réservoir de mélange. La figure 8 détaille les principaux éléments constitutifs.

La poussière de bois stockée dans la trémie ① se dépose régulièrement dans la gorge de la sole tournante ②.

Elle est ensuite aspirée par l'une ou l'autre des buses ③ alimentées en air comprimé pour être dirigée vers l'injection ④ implantée dans le conduit d'essai via le cyclone ⑤ (cas de fonctionnement normal) ou via un volume de mélange ⑥ (cas de dysfonctionnement). Le réglage de la vitesse de rotation de la sole permet d'ajuster le débit de génération de poussière. Un circuit d'air filtré parallèle ⑦ comportant deux électrodes à effet corona (type Elcowa ECO 8R®) est raccordé en sortie de générateur, afin de charger ou de neutraliser les particules suivant la configuration à tester.

4.2. Caisson réduit

Le débit d'air est mesuré par la méthode du caisson réduit conformément au mode opératoire INRS élaboré à partir de la norme NF ISO 5801 [11].

Le diaphragme placé à l'amont de l'installation est associé à un micromanomètre pour le réglage et le contrôle du débit d'air tout au long des essais. Les valeurs de pression à mettre en œuvre pour l'obtention d'un débit déterminé sont calculées en fonction de la pression atmosphérique et de la température du hall d'essai.

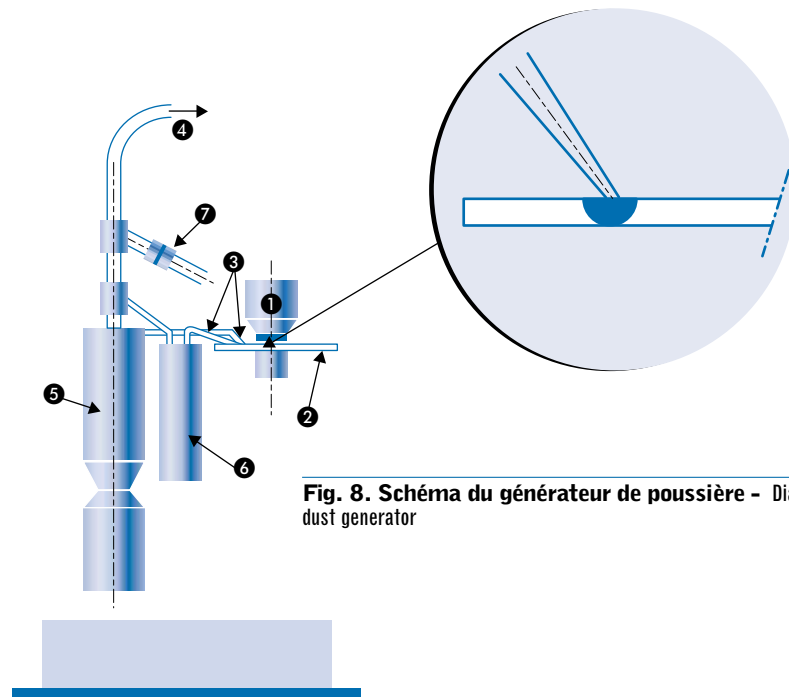


Fig. 8. Schéma du générateur de poussière - Diagram of the dust generator

4.3. Appareil de référence

Les concentrations de poussière et les granulométries doivent être contrôlées pendant la durée des essais afin d'éviter des dérives éventuelles.

Pour cela, on utilise un compteur optique de particules Grimm 1105®, associé à une sonde de prélèvement isocinétique implantée dans la zone de mesure du conduit d'essai. Cet appareil possède huit canaux de mesure permettant de compter le nombre de particules par litre d'air pour des diamètres allant de 0,5 µm à 15 µm et plus.

Il permet aussi, après un étalonnage préalable avec la poussière de bois utilisée pour les tests, de donner les valeurs absolues de la concentration massique dans le conduit d'essai.

4.4. Prélèvements sur filtre

Afin de s'assurer de la stabilité du générateur de poussière et pour pallier d'éventuelles variations d'étalonnage du compteur, des prélèvements sur filtre sont effectués régulièrement dans la zone de mesure du conduit d'essai.

Ces prélèvements sont réalisés en respectant les conditions d'isocinétisme avec une deuxième sonde associée à un porte filtre, une tuyère sonique et une pompe.

4.5. Section de mesure

Le conduit d'essai comporte une zone de mesure dans laquelle les appareils en test et les appareils de contrôle sont implantés. Cette zone est aménagée sur le circuit d'essai à une longueur suffisante du point de génération pour obtenir, dans la section de mesure, une répartition homogène de la poussière tout en limitant sa sédimentation. Cette homogénéité a été vérifiée à l'aide de la technique de traçage hélium et les mesures ont permis de calculer un coefficient de variation de 1 % sur la section de 300 mm.

4.6. Caractéristiques de la poussière de bois

On utilise, pour les essais, de la poussière fine d'essences de bois dur (mélange de chêne et de hêtre). Tous les échantillons de poussière utilisés pour les essais proviennent de mêmes lots, produits uniquement à partir d'opérations de ponçage effectuées dans une menuiserie industrielle.

L'ensemble des résultats présentés dans ce document ne concerne que les tests réalisés avec la poussière de bois dur. Cependant, des essais préliminaires ont été réalisés avec une poussière de bois tendre (mélange de sapin et d'épicéa) provenant d'une entreprise qui fabrique,

pour des applications industrielles, de la « farine » de bois de différentes granulométries. Cette poussière s'est avérée très difficile à générer de par son pouvoir « collant », dû vraisemblablement au taux ou à la nature des résines.

Les courbes des *figures 9 et 10* présentent respectivement les répartitions granulométriques des poussières (mélange de chêne et de hêtre) qui sont générées pour simuler le fonctionnement normal et le dysfonctionnement de type 1.

Cette analyse a été effectuée à partir d'un appareil Coultronics Multisizer T00145® sur un échantillon massif, qui détermine la répartition granulométrique de la poussière sur 32 canaux de mesure allant de 1,8 à 63 μm . Ces résultats ont été confirmés par des mesures réalisées en microscopie électronique.

Le diamètre ainsi déterminé est un diamètre équivalent en volume ; la distribution permet de calculer le diamètre volumique en masse dmv (égal au diamètre médian en masse).

Les échantillons de poussière, utilisés pour la génération au cours des essais, sont prélevés à parts égales dans les différents récipients de stockage et mélangés avant d'être introduits dans le générateur.

5. Résultats

5.1. Appareil à effet triboélectrique

5.1.1. Réponse à un dysfonctionnement de type 1

Les courbes des *figures 11 et 12* présentent respectivement le signal enregistré par l'appareil de référence et la réponse d'un appareil à effet triboélectrique.

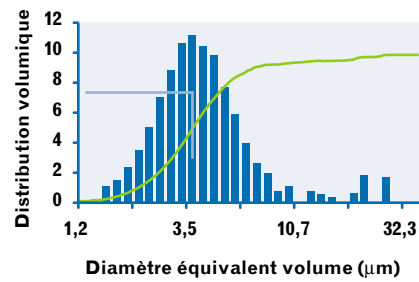


Fig. 9. Répartition granulométrique de la poussière en fonctionnement normal ($dmv = 3,5 \mu\text{m}$) - Dust particle size distribution during normal operation ($dmv = 3,5 \mu\text{m}$)

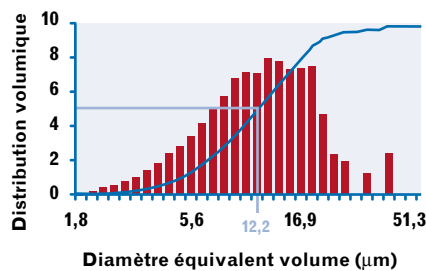


Fig. 10. Répartition granulométrique de la poussière en dysfonctionnement de type 1 ($dmv = 12,2 \mu\text{m}$) - Dust particle size distribution for a type 1 malfunction ($dmv = 12,2 \mu\text{m}$)

Fig. 11. Signal de l'appareil de référence pour un dysfonctionnement de type 1 - Signal of reference device for a type 1 malfunction

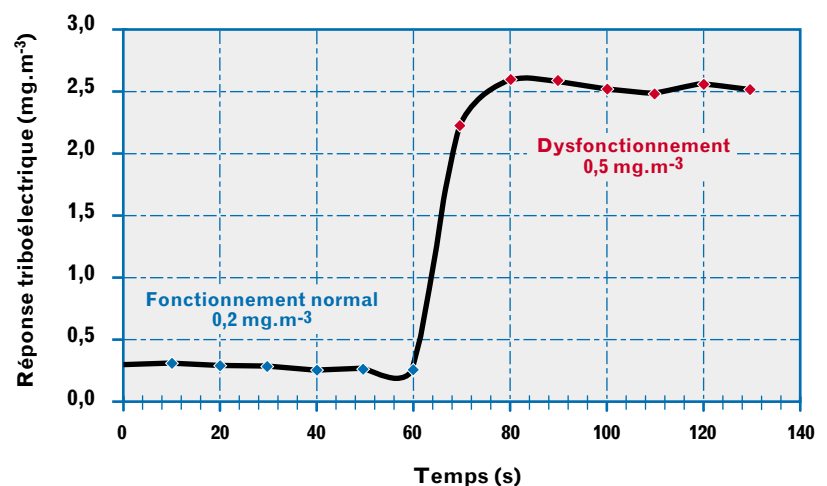
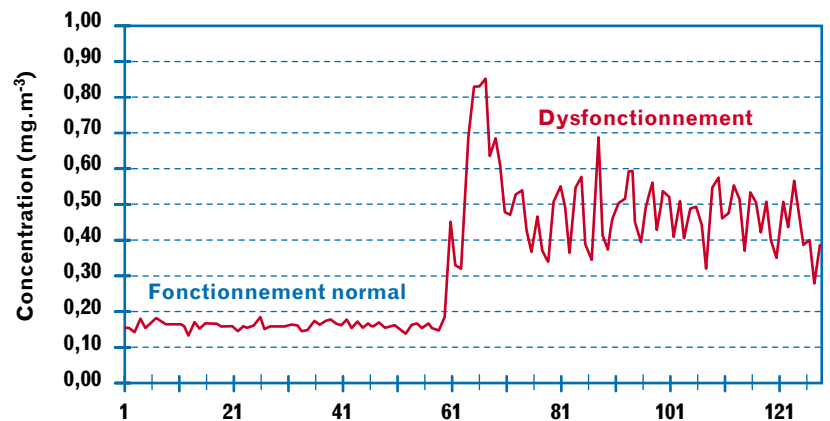


Fig. 12. Réponse d'un appareil à effet triboélectrique à un dysfonctionnement de type 1 - Response of a triboelectric effect device to a type 1 malfunction

5.1.2. Réponse à un dysfonctionnement de type 2

Les courbes des figures 13 et 14 présentent le signal délivré par l'appareil de référence pour ce dysfonctionnement et la réponse d'un appareil à effet triboélectrique.

5.1.3. Réponse d'un appareil à effet triboélectrique en fonction de la granulométrie de la poussière utilisée pour son étalonnage

Les courbes de la figure 15 présentent les différentes réponses d'un appareil à effet triboélectrique, ayant été successivement étalonné en concentration avec deux types de granulométries de poussière.

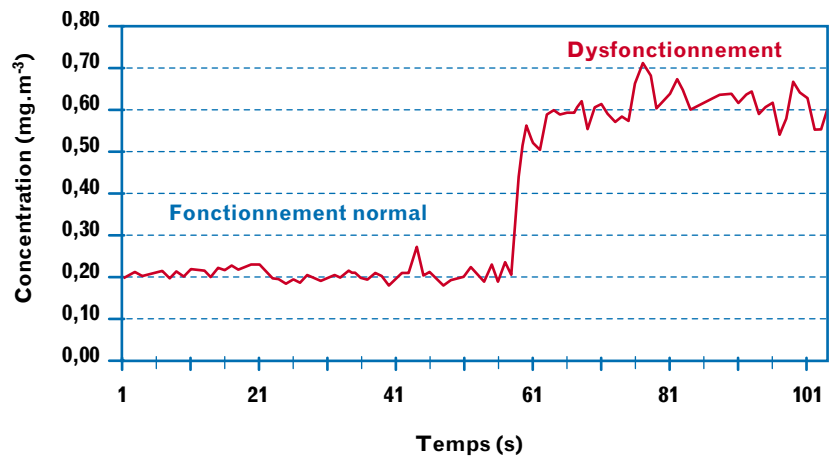


Fig. 13. Signal de l'appareil de référence pour un dysfonctionnement de type 2 - Signal of reference device for a type 2 malfunction

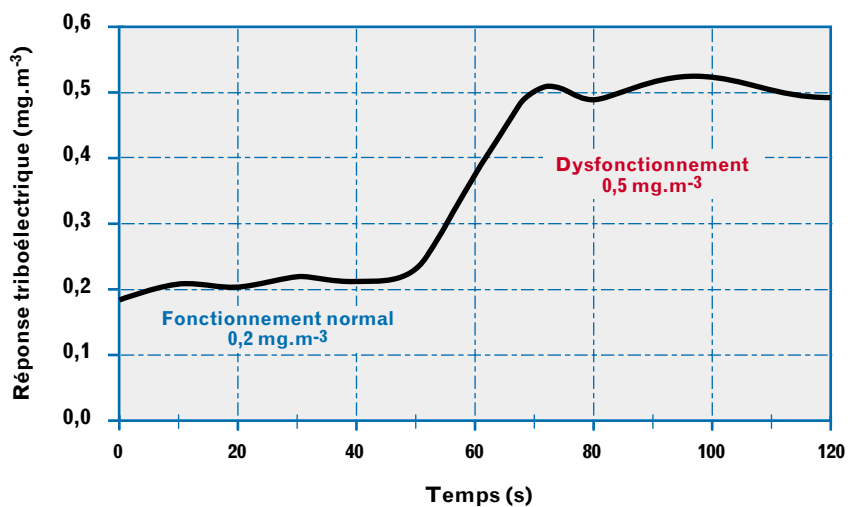


Fig. 14. Réponse d'un appareil à effet triboélectrique à un dysfonctionnement de type 2 - Response of a triboelectric effect device to a type 2 malfunction

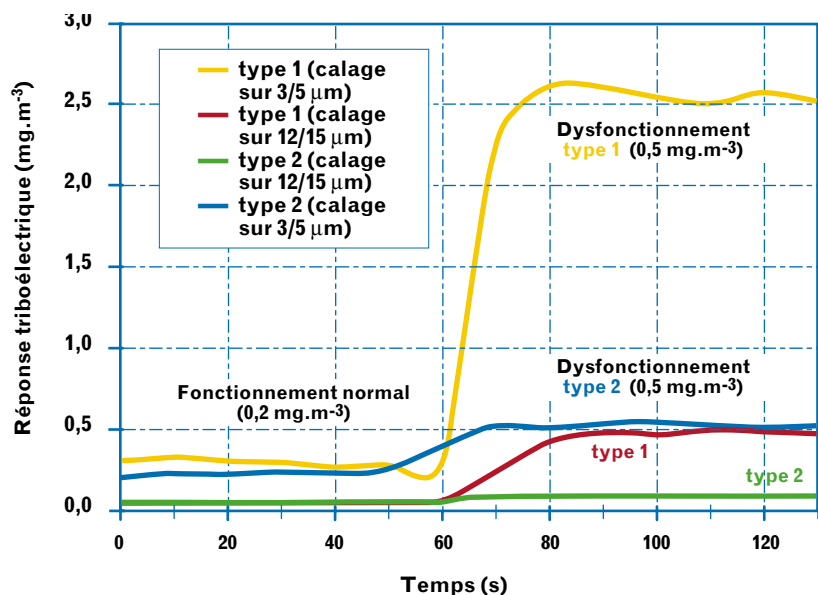


Fig. 15. Influence de la granulométrie de la poussière utilisée pour l'étalonnage sur la réponse de l'appareil - Influence of the particle size of the dust used to calibrate the response of the device

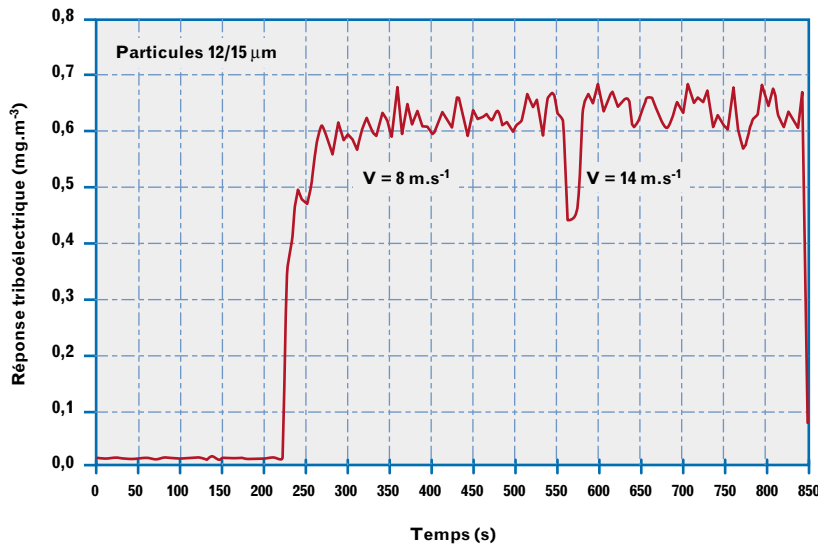


Fig. 16. Influence de la variation de la vitesse d'air sur la réponse de l'appareil - Influence of variation in air velocity on the response of the device

5.1.4. Réponse aux variations de vitesse d'air dans le conduit

La *figure 16* montre un exemple d'évolution de la réponse d'un appareil à effet triboélectrique (type AC), lorsque la vitesse d'air dans le conduit change et que la concentration reste constante.

Une série de dix essais visant à déterminer l'influence des variations de la vitesse d'air a été réalisée à concentration constante pour les deux classes de granulométrie.

Le *tableau II* regroupe les résultats obtenus pour ces configurations. Le rapport R_{14}/R_8 correspond au rapport de la réponse de l'appareil pour une vitesse d'air de 14 m.s⁻¹ à la réponse pour une vitesse d'air de 8 m.s⁻¹.

Les essais effectués avec les deux types d'appareils à effet triboélectrique donnent des résultats sensiblement identiques pour cette plage de vitesse.

TABLEAU II

Réponse d'un appareil à effet triboélectrique aux variations de vitesse d'air - Response of a triboelectric effect device to variations in air velocity

Poussière 3/5 µm		Poussière 12/15 µm	
Moyenne de R_{14}/R_8	σ	Moyenne de R_{14}/R_8	σ
1,03	0,09	1,05	0,07

5.1.5. Réponse aux variations de charge électrique des particules

Les essais entrepris sur ce paramètre montrent une certaine influence de la charge électrique des particules sur la mesure. La *figure 17* présente la réponse d'un appareil à effet triboélectrique lorsque la charge moyenne initiale des particules (mesurée avec un électromètre de type TSI 3068®) est réduite par neutralisation d'environ 40 % à concentration et vitesse constantes.

Cependant, ces essais ont mis en évidence que la prise en compte de ce paramètre, étroitement lié au degré d'humidité de l'air, nécessite la mise en œuvre de techniques de mesure délicates et complexes [9, 10]. Le laboratoire n'a pas actuellement les moyens de développer cette technique et les résultats de l'influence de la charge électrique des particules sur les appareils à effet triboélectrique sont donnés ici à titre qualitatif.

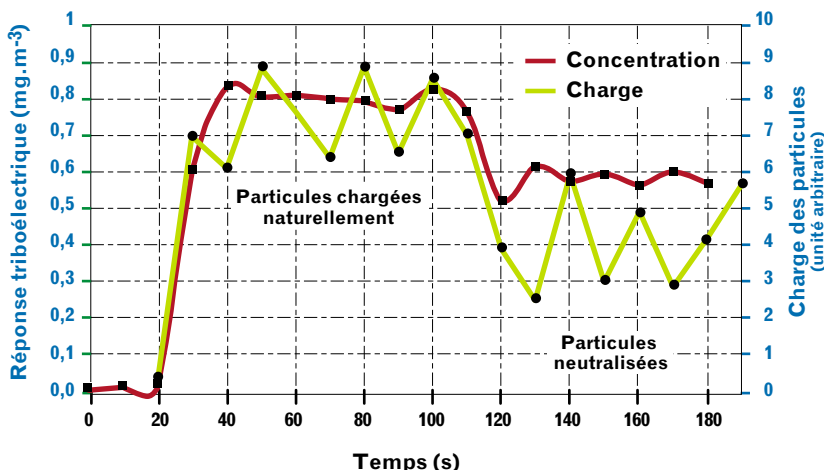


Fig. 17. Réponse d'un appareil à effet triboélectrique à une variation de charge des particules à concentration et granulométrie constantes - Response of a triboelectric effect device to a variation in particle charge at constant concentration and particle size

5.1.6. Indice de réponse I_m pour les appareils à effet triboélectrique testés

Les courbes de la *figure 18* donnent les écarts des indices de réponse I_m calculés suivant la méthode décrite au § 3.3 pour les appareils à effet triboélectrique, en fonction de la concentration pour deux granulométries de poussière.

5.1.7. Discussion

Les valeurs des indices de réponse I_m , que l'on relève sur les courbes de la *figure 18*, montrent que ce type d'appareil réagit correctement aux différents changements de concentration avec une sensibilité qui s'accroît fortement lorsqu'on se trouve en présence d'un dysfonctionnement de type 1, pour lequel la granulométrie passe de $3/5 \mu\text{m}$ à $12/15 \mu\text{m}$ ($I_m > I_{\text{max}}$). Cette augmentation de sensibilité, en présence de ce type d'incident, va dans le sens de la sécurité des personnes travaillant dans les ateliers où l'air est recyclé après dépoussiérage, mais la valeur de concentration indiquée sera nettement surévaluée.

Dans le cas d'un dysfonctionnement de type 2, l'appareil détecte sans difficulté l'incident, même si sa sensibilité se trouve réduite par la présence de particules plus fines ($I_{\text{min}} \leq I_m \leq I_{\text{max}}$).

Les essais relatifs à l'influence des variations de la vitesse d'air dans le conduit (cf. *fig. 16* et tableau D) montrent que ce paramètre n'a pratiquement pas d'influence dans la gamme testée, quel que soit le type d'appareil à effet triboélectrique, contrairement à ce qui avait été mesuré lors d'essais préliminaires. Cette différence d'observation provenait d'une mauvaise utilisation au laboratoire de la sonde à effet triboélectrique.

Les essais entrepris sur l'influence de l'état de charge des particules sur la réponse des appareils (cf. *fig. 17*) montrent une certaine sensibilité aux variations de ce paramètre. Cependant, comme la plage de fluctuation de l'état de charge naturelle des particules sur site n'est ni connue ni maîtrisable, il n'est pas possible de quantifier l'influence de ce paramètre sur les appareils à effet triboélectrique dans l'état actuel de nos moyens.

Cette influence peut parfois ne pas être négligeable.

Il faut prendre en considération que les variations combinées de différents paramètres pourraient, dans certains cas, entraîner des dépassements de seuil

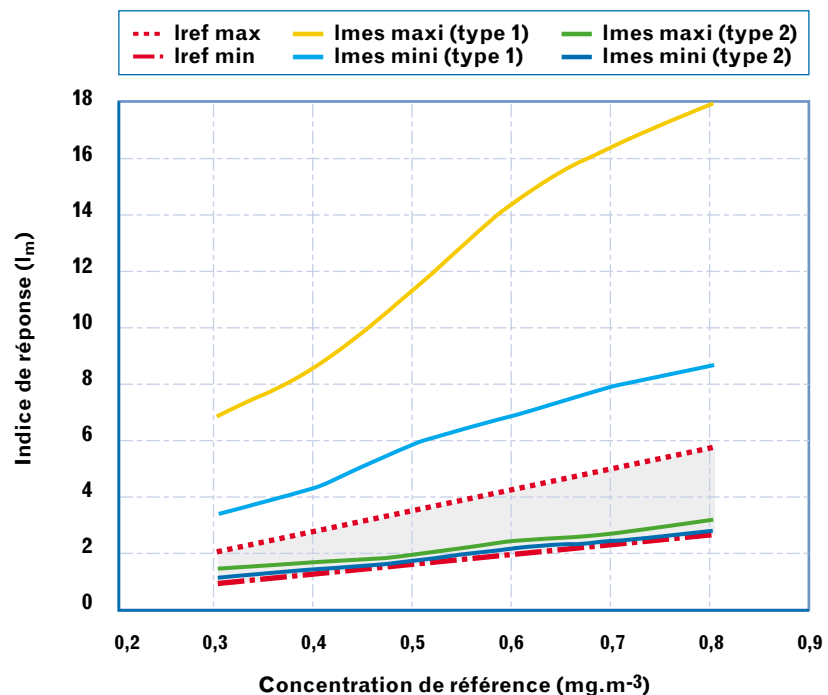


Fig. 18. Evolution des indices de réponse I_m pour l'ensemble des appareils à effet triboélectrique - Change in the response indexes I_m for all the triboelectric effect devices

d'alerte sans qu'il y ait un dysfonctionnement réel, si celui-ci est fixé trop bas.

Si cet appareil a été préalablement étalonné en concentration sur banc d'essai, il l'a été pour des conditions de granulométrie de poussière, de vitesse et de charge des particules données.

Placé en situation de détection sur une installation industrielle, l'appareil pourra indiquer un incident alors que le fonctionnement est normal simplement parce que les conditions de granulométrie, vitesse et charge sur site seront différentes des conditions d'étalonnage. Les résultats présentés à la *figure 15* montrent que, si un appareil est étalonné sur des poussières de granulométrie plus élevée, celui-ci sera incapable de détecter un dysfonctionnement de type 2.

La solution la plus performante consiste à l'étalonner par rapport à une mesure pondérale réalisée sur le site d'implantation, à l'aide d'une sonde de prélèvement isocinétique. Cette méthode permet de prendre en compte les caractéristiques de la poussière et de fonctionnement de l'installation, mais elle est de mise en œuvre lourde et onéreuse.

Une autre technique consiste à étalonner l'appareil sur un pilote en usine sur lequel on pourra se rapprocher des conditions de terrain, notamment en ce qui concerne la nature et la granulométrie de la poussière et la vitesse dans le conduit de recyclage. Il faut rappeler que la fonction première de cet appareil n'est pas de donner une indication continue et précise de la concentration, mais de détecter rapidement un dysfonctionnement du dépoussiéreur.

5.2. Photomètres

5.2.1. Réponses à un dysfonctionnement de type 1

Les courbes des *figures 19, 20 et 21* présentent respectivement le signal délivré par l'appareil de référence et les réponses des deux types de photomètres pour ce dysfonctionnement.

Fig. 19. Signal de l'appareil de référence pour un dysfonctionnement de type 1 -
Signal of the reference device for a type 1 malfunction

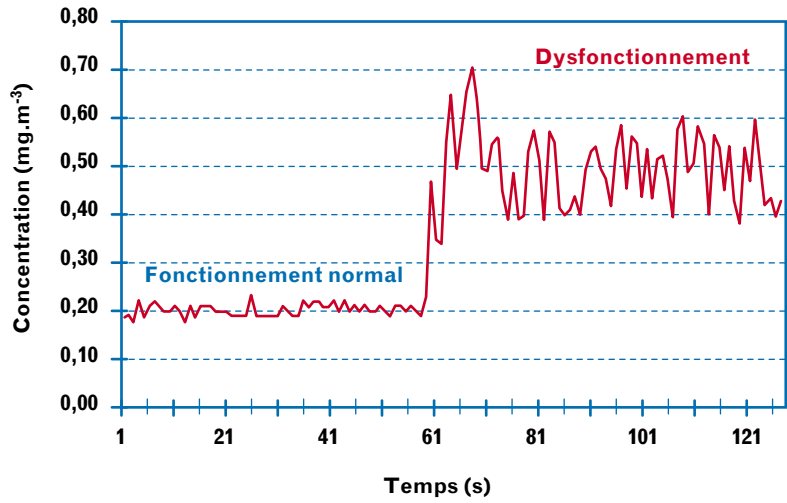


Fig. 20. Réponse d'un photomètre à angle de diffusion orthogonale pour un dysfonctionnement de type 1 -
Response of an orthogonal diffusion angle photometer to a type 1 malfunction

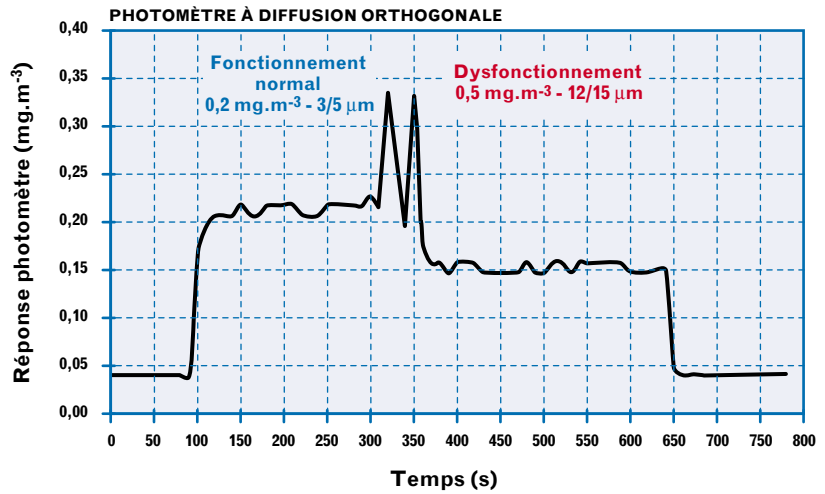
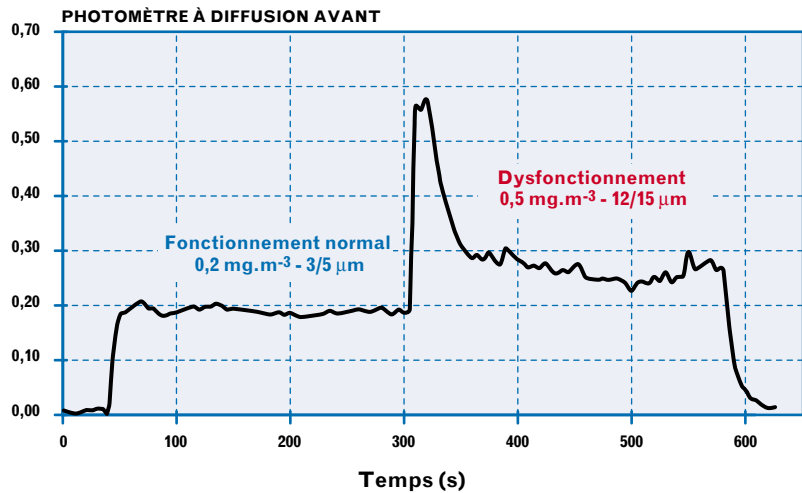


Fig. 21. Réponse d'un photomètre à angle de diffusion avant avec traitement informatique pour un dysfonctionnement de type 1 -
Response of a front diffusion angle photometer with computer processing to a type 1 malfunction



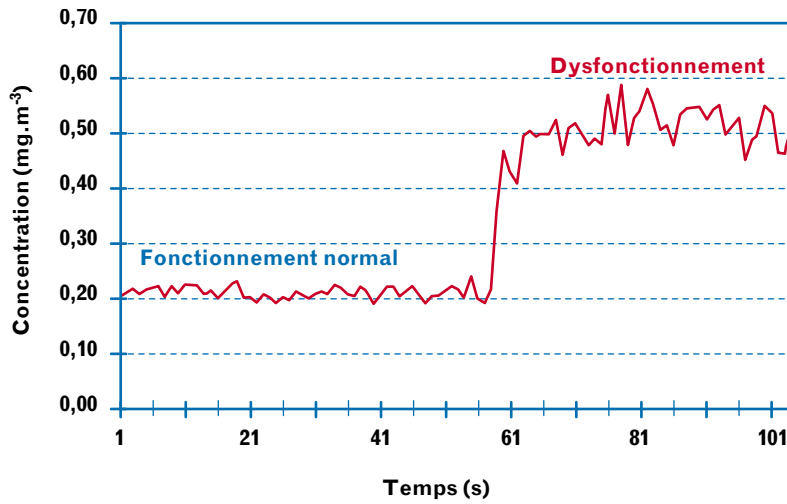


Fig. 22. Signal de l'appareil de référence pour un dysfonctionnement de type 2 - Reference signal for a type 2 malfunction

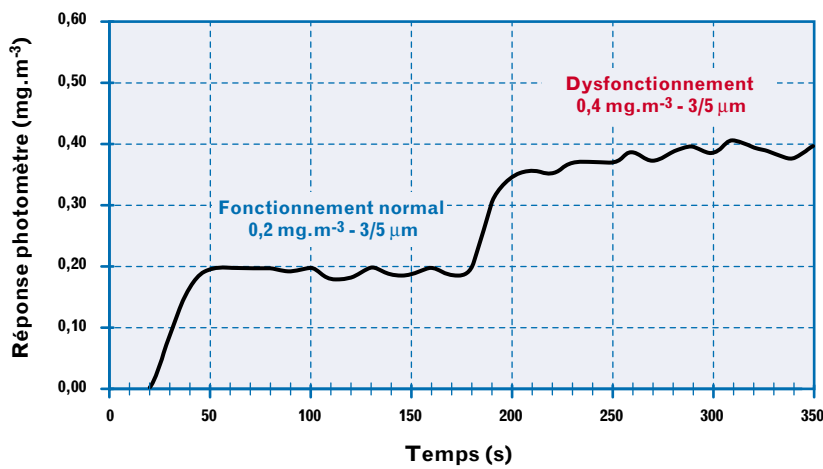


Fig. 23. Réponse commune des photomètres testés à un dysfonctionnement de type 2 - Response of the photometers tested to a type 2 malfunction

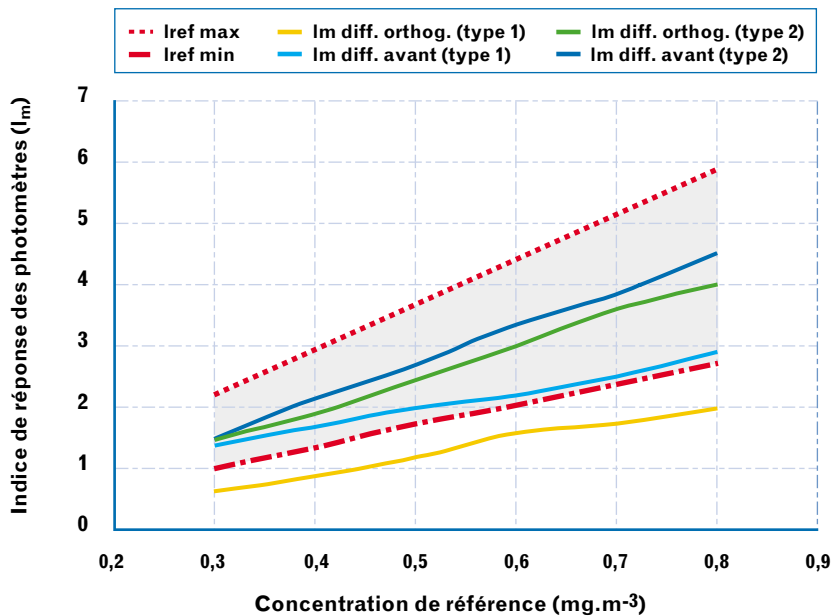


Fig. 24. Indices de réponse I_m pour les deux types de photomètres - Response indexes I_m for both types of photometers

5.2.2. Réponse à un dysfonctionnement de type 2

Les courbes des *figures 22 et 23* présentent le signal délivré par l'appareil de référence et le type de réponse commune des photomètres testés pour ce type de dysfonctionnement.

5.2.3. Valeur des indices de réponse I_m pour les photomètres

Les courbes de la *figure 24* donnent les écarts des indices de réponse I_m calculés pour les deux types de photomètres en fonction de la concentration et les deux types de dysfonctionnements (cf. § 3.3).

5.2.4. Discussion

Les valeurs des indices de réponse relevées à la figure 24 montrent que cet appareil détecte sans difficulté un dysfonctionnement de type 2 (I_m diff. orthog. type 2). Par contre, dans le cas d'un dysfonctionnement de type 1 (changement simultané de concentration et de granulométrie), les réponses obtenues varient suivant la conception des appareils.

Pour un photomètre classique fonctionnant avec un angle de diffusion d'environ 90°, l'appareil fortement influencé par la variation granulométrique donne une réponse erronée (fig. 20) et ne détecte pas ce type de dysfonctionnement. Dans ce cas, l'indice I_m diff. orthog. type 1, est nettement inférieur à l'indice I_{\min} .

Les photomètres à angle de diffusion avant faible, dont le principe se rapproche de celui des compteurs de particules avec traitement informatique associé, sont beaucoup moins affectés par les variations granulométriques des particules. Ils peuvent détecter les dysfonctionnements de type 1 (I_m diff. avant type 1) avec cependant des sensibilités plus faibles que celles des appareils à effet triboélectrique. Certains de ces photomètres encore au stade de prototype devraient être commercialisés prochainement et présenter des sensibilités plus élevées.

D'une manière générale, les photomètres ne sont pas sensibles aux variations de vitesse et de charge des particules. Cependant, leur sensibilité pourrait évoluer sous l'influence d'autres facteurs tels que la nature, la forme et l'indice de réfraction des particules. L'influence de ces facteurs n'a pas été étudiée dans le cadre de cette étude.

Dans le cas de la mise en place sur site d'un photomètre capable de prendre en compte les changements granulométriques, les procédures d'étalonnage décrites au § 5.1.7 pourront aussi s'appliquer.

CONCLUSION

L'étude entreprise par l'INRS sur les dispositifs de détection du dysfonctionnement des dépoussiéreurs, montre qu'il existe des appareils capables d'assurer une surveillance efficace de l'air recyclé dans les locaux de travail en détectant des incidents de types différents.

Avec des sensibilités variées, les appareils à effet triboélectrique sont capables de déceler les deux types d'incidents simulés sur banc d'essai, quelle que soit la technologie utilisée.

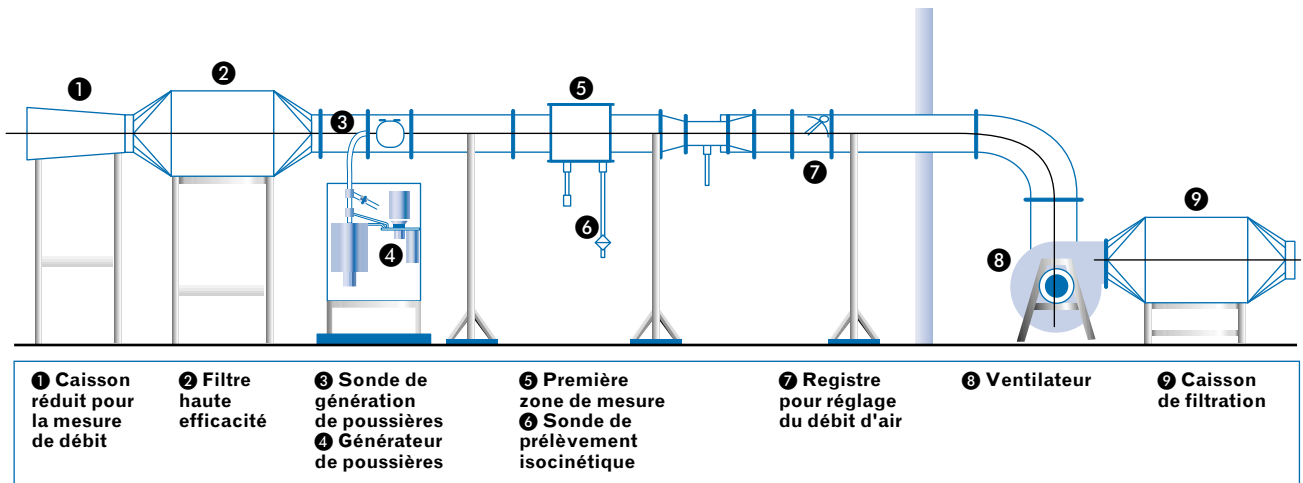
En ce qui concerne les photomètres, les appareils à diffusion orthogonale très sensibles aux variations granulométriques de l'aérosol ne peuvent convenir pour ce type d'application. Par contre, les résultats obtenus avec des appareils prototypes à angle de diffusion avant, associés à un traitement informatique, permettent d'envisager leur utilisation pour la détection des dysfonctionnements.

Tous ces dispositifs de détection présentent quelques difficultés pratiques d'étalonnage et de réglage du seuil d'alerte. Des campagnes de suivi sur site sont prévues. Elles permettront de mieux appréhender le comportement en service de ces sondes, notamment leur encrassement et la dérive de l'électronique associée. Les campagnes permettront également de mieux caractériser les divers types de dysfonctionnement des dépoussiéreurs.

BIBLIOGRAPHIE

1. Aération et assainissement des ambiances de travail. Réglementation générale. Textes et commentaires. INRS, ED 720, 1996 (2^e éd.), 48 p.
2. Directive 1999/38/CE du Conseil du 29 avril 1999. Protection des travailleurs contre les risques liés à l'exposition à des agents cancérigènes au travail et l'étendant aux agents mutagènes. *Journal Officiel des Communautés Européennes* 1^{er} juin 1999, pp. L 138/66-69.
3. pr EN 12779 - Machines pour le travail de bois - Installations fixes d'extraction de copeaux et de poussières - Performances relatives à la sécurité et prescriptions de sécurité. *Bruxelles, CEN, 1999.*
4. WALTER J. - Particle surface interaction : charge transfer, energy loss, resuspension, and deagglomeration. *Aerosol Science and Technology, 1995, 23, pp. 2-24.*
5. WALTER J., REISCHL G., DEVOR W. - Charge transfer to metal surfaces from bouncing aerosol particles. *Aerosol Science and Technology, 1980, 2, pp. 115-138.*
6. VERCOULEN P.H.W., ROOS R.A. - An instrument for measuring electric charge on individual aerosol particles. *Journal of Aerosol Science, 1991, 22, pp. 335-338.*
7. RAMSEY K. - The emergence of triboelectric technology. *Pollution Engineering, 1998, pp. 54-56.*
8. GÖRNER P., FABRIES J.F. - Technique de mesure automatique des aérosols atmosphériques. *Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail, 1990, 140, ND 1794, pp. 595-626.*
9. BEMER D. - Exploitation des propriétés physiques d'un aérosol pour la mesure de la taille des particules et leur concentration. *Nancy, INRS, 1991, coll. Notes scientifiques et techniques NS n° 83 (épuisée).*
10. POLAT H., POLAT M., CHANDER S., HOGG R. - The electrostatic charge on particles and its relation to agglomeration in air. *Applied Occupational and Environmental Hygiene, 1996, 11, 7.*
11. NF ISO 5801 (idem X 10-200) - Ventilateurs industriels. Essais aérauliques sur circuits normalisés. *Paris-La Défense, AFNOR, déc. 1999, 250 p.*
12. Valeurs limites d'exposition professionnelle aux agents chimiques en France, *Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail, 1999, 174, ND 2098, pp. 59-77.*

ANNEXE

SCHÉMA DU BANC D'ESSAI -
APPENDIX: DIAGRAM OF THE TEST BENCH

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SÉCURITÉ - 30, rue Olivier-Noyer, 75680 Paris cedex 14

Tiré à part des Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail, 3^e trimestre 2000, n° 180 - ND 2131 - 1 200 ex.
N° CPPAP 804 AD/PC/DC du 14-03-85. Directeur de la publication : J.-L. MARIÉ. ISSN 0007-9952 - ISBN 2-7389-0864-0