

Notes techniques

RÉDUIRE L'EMPOUSSIÈREMENT GÉNÉRÉ PAR LES MACHINES MOBILES : DES SOLUTIONS APPORTÉES SUR RABOTEUSES DE ROUTES

Dans le cadre de la prévention des risques associés aux poussières émises par les raboteuses de route, l'INRS a conduit en 2020 une étude pour évaluer les performances d'un système de réduction des émissions. Les mesures ont été réalisées sur une raboteuse équipée de dispositifs de captage de l'air au niveau du tambour de fraisage et de filtration des poussières par séparation électrostatique. Les interventions ont été menées en hall d'essai (sans rabotage de route) et au cours de quatre chantiers mobiles (avec opération de rabotage). Les résultats issus de ces campagnes sont présentés dans cet article.

DENIS BEMER, FRANCIS BONTHOUX, SULLIVAN LECHÈNE
INRS, département Ingénierie des procédés

DAVY ROUSSET
INRS, département Métrologie des polluants

Contexte

Le rabotage des routes consiste à supprimer les couches supérieures d'un revêtement détérioré en vue de son remplacement. Cette opération est réalisée par une machine appelée raboteuse, équipée d'un tambour de coupe rotatif permettant d'enlever une épaisseur de l'ordre d'une dizaine de centimètres. Ces travaux génèrent des poussières, susceptibles de contenir notamment de la silice cristalline qui est présente dans la majorité des granulats constituant les revêtements routiers. L'exposition à ces poussières est dangereuse pour la santé, elle provoque notamment des silicoses et des cancers pulmonaires [1]. Le conducteur de la machine et les personnes travaillant autour, voire les riverains lors d'opérations de rabotage en milieu urbain, peuvent être particulièrement exposés. Il est donc essentiel de mettre en place des mesures de prévention efficaces pour limiter l'exposition, notamment en recourant à des systèmes de captage et de filtration des poussières. Des études ont été engagées depuis 2003 aux États-Unis pour améliorer les systèmes de protection lors des opérations de rabotage, notamment par le *National Institute for Occupational Safety and Health* (Niosh) qui a publié en 2015 le bilan des travaux effectués et des recommandations sur les bonnes pratiques de prévention à adopter lors du rabotage des routes [2]. Les systèmes de captage des poussières, ainsi que

des méthodes de test pour évaluer leur efficacité, sont décrits dans ce document. Pour réduire l'exposition aux poussières de silice, le Niosh recommande la mise en œuvre de systèmes de captage d'une efficacité supérieure à 90 % et de systèmes de pulvérisation d'eau (abattage humide). Un article paru dans *Hygiène & sécurité du travail* présente une synthèse de ces travaux [3]. Une seconde étude menée aux États-Unis en 2016 [4] a permis d'évaluer l'efficacité de ces moyens de prévention en conditions réelles de fonctionnement, pour différents revêtements routiers et diverses conditions météorologiques. Les prélèvements réalisés au niveau du conducteur dans la raboteuse et d'un opérateur travaillant au sol ont montré des teneurs en silice cristalline inférieures à 50 µg/m³ (limite d'exposition recommandée par le Niosh).

En France, des études ont également été menées depuis 2011, avec comme objectif d'améliorer la prévention du risque chimique dans les travaux routiers. Sous l'égide du Comité de pilotage national « Travaux routiers – Risques professionnels », ces travaux ont mené à la publication de fiches de prévention, notamment la fiche n° 4 sur les opérations de rabotage des routes, qui recommande l'utilisation de systèmes de captage des poussières¹. Par ailleurs, la future norme NF EN ISO 20500-2 « *Machines mobiles pour la construction de routes – Sécurité – Partie 2 : Prescriptions spécifiques pour fraiseuses*

routières » devrait intégrer un protocole d'évaluation de leur performances².

En complément des solutions de prévention existantes sur les raboteuses (captage et pulvérisation d'eau), le constructeur d'une raboteuse³ a développé un dispositif de filtration électrostatique des poussières produites lors du rabotage, afin de réduire davantage l'empoussièrement autour de la machine. Une étude de l'INRS menée en 2020 s'est attachée à évaluer la performance de ce nouveau dispositif, mais aussi l'efficacité du système de captage des poussières au niveau du tambour de fraisage⁴. Cette étude s'est focalisée sur une raboteuse de route équipée d'un système de captage de poussières auquel a été ajouté en aval un séparateur électrostatique. L'efficacité de captage des poussières a été déterminée par la méthode du traçage gazeux Niosh n° 2015-105 [2]. Cette méthode consiste à caractériser le captage en simulant l'émission de poussières au niveau du tambour de fraisage par une injection de gaz traceur. Les performances du séparateur électrostatique ont été déterminées « en statique » sur une machine stationnée dans un hall et reliée à un générateur de poussières, puis sur la machine en fonctionnement lors de travaux de réfection de routes. Les concentrations en masse des poussières alvéolaires, en silice cristalline alvéolaire ainsi que la distribution granulométrique en masse des particules ont été déterminées lors d'opérations courtes de rabotage, avec ou sans le système de séparation électrostatique en fonctionnement, afin de pouvoir déterminer l'efficacité globale de ce système en conditions réelles.

Description du dispositif de captage/épurateur de l'air

Une raboteuse de route (Cf. Figure 1) est composée d'un tambour de fraisage, ayant pour fonction de creuser le revêtement routier, et de convoyeurs qui

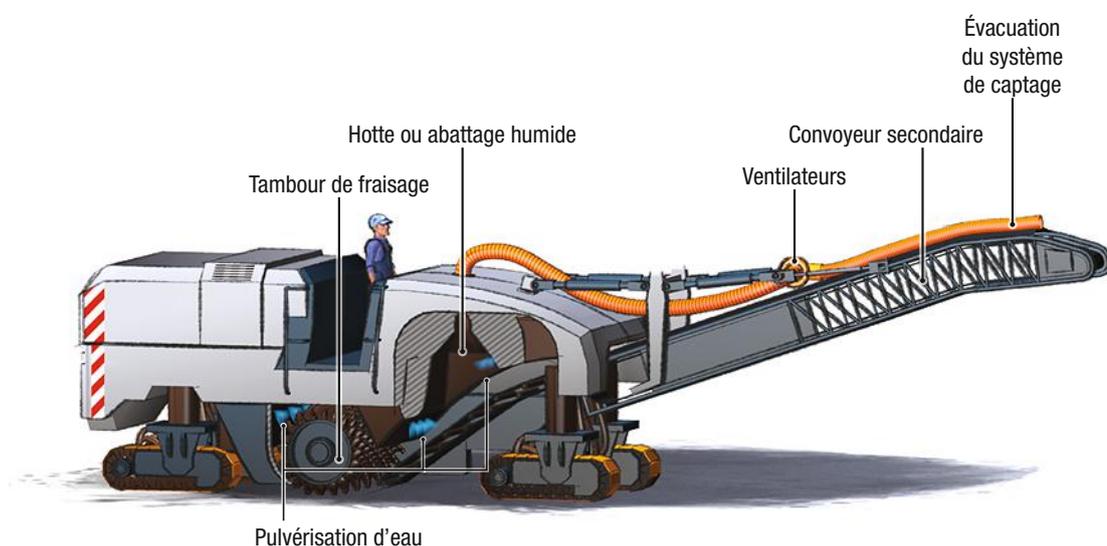
RÉSUMÉ

Des essais ont été réalisés afin d'évaluer les performances d'un système de captage et de filtration des poussières émises par les raboteuses de route. Les mesures ont été réalisées sur une raboteuse équipée d'un dispositif de captage de l'air au niveau du tambour de fraisage, complété par un séparateur électrostatique pour l'élimination des poussières captées. Par ses performances, tant sur le plan du captage des poussières que de l'efficacité de séparation du précipitateur, ce système limite efficacement l'empoussièrement dans l'environnement proche de la machine. Le séparateur est un système développé récemment par le constructeur ; à l'heure actuelle, les raboteuses n'en sont généralement pas équipées.

REDUCING THE AMOUNT OF DUST GENERATED BY MOBILE MACHINES: SOME OF THE SOLUTIONS PROVIDED BY ROAD-MILLING MACHINES

Tests were conducted to assess the performance of a system for collecting and filtering dust emitted by road-milling machine. The measurements were performed on a road paver with an air capture device fitted on the milling drum, together with an electrostatic separator to eliminate the dust collected. Thanks to both the dust collection performance and the separation efficiency of the precipitator, this system effectively limits dust levels in the environment close to the machine. The separator was developed recently by the manufacturer; currently, milling machines generally are not fitted with this device ?

permettent d'évacuer les gravats engendrés par le rabotage. Le poste de pilotage se trouve à l'arrière de la machine afin d'avoir le maximum de visibilité lors de la conduite de l'engin. La partie moteur se trouve également à l'arrière de la machine.

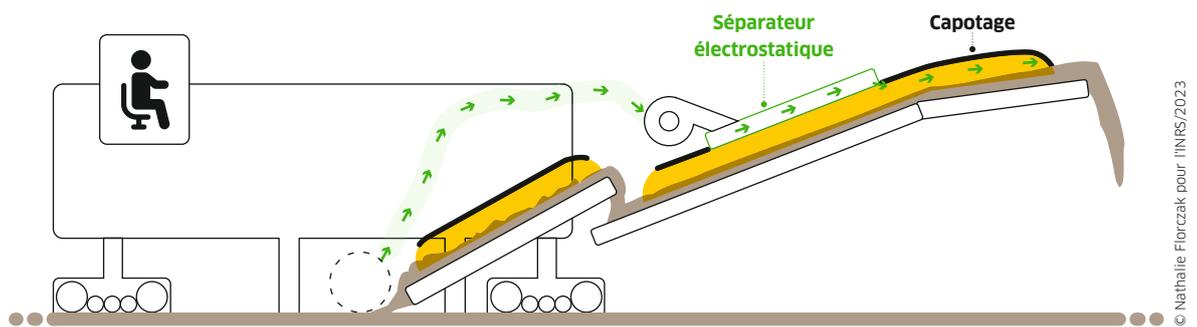


© 3Z/IGS pour l'INRS/2015

← FIGURE 1
Raboteuse de route (source : INRS [3]).



FIGURE 2 →
Système
de captage.



© Nathalie Florczak pour l'INRS/2023

Le tambour de fraisage est entouré d'un carter formé de plaques pouvant être ajustées en hauteur par des vérins, afin de s'adapter à la conformation de la route et à la profondeur de rabotage. La raboteuse se déplace lentement sur la chaussée tout en supprimant une profondeur de chaussée donnée avec le tambour de fraisage. Les gravats sont repris au niveau de la fraise par une première bande transporteuse fixe, puis déversés sur une seconde plus longue et mobile permettant d'ajuster le déversement dans un camion avançant devant la raboteuse. Une aspersion d'eau dans le convoyeur participe à la réduction des émissions par un effet d'abattage humide et d'humidification des matériaux. L'aspersion intrinsèque au procédé est complétée par un système de captage de l'air ($\approx 2000 \text{ m}^3/\text{h}$) qui met en dépression le carter de protection du tambour de fraisage (Cf. Figure 2). Dans le cas particulier de la machine étudiée, l'air capté dans la zone du tambour de fraisage est rejeté dans un séparateur électrostatique dont le but est de réduire la quantité de poussières évacuées dans le capotage de la bande transporteuse. À l'intérieur du séparateur, les particules de poussières chargées positivement sont attirées par le châssis du séparateur qui est relié à la terre, et sont ainsi collectées. Le dépôt accumulé dans le séparateur est évacué par lavage à l'eau lors de la maintenance de la machine. Les particules non retenues par le séparateur sont rejetées dans le capotage qui coiffe la bande transporteuse.

réalisée directement dans la gaine d'extraction, puis la concentration C_3 quand la génération de traceur est réalisée au niveau du tambour. L'efficacité est alors égale à :

$$\eta = \frac{C_3}{C_2}$$

Une valeur d'efficacité de 100 % indique que la totalité du débit de traceur généré a été collectée par le captage. Pour être représentatif de l'émission de poussières, le traceur est injecté sous le tambour en rotation au-dessus du sol.



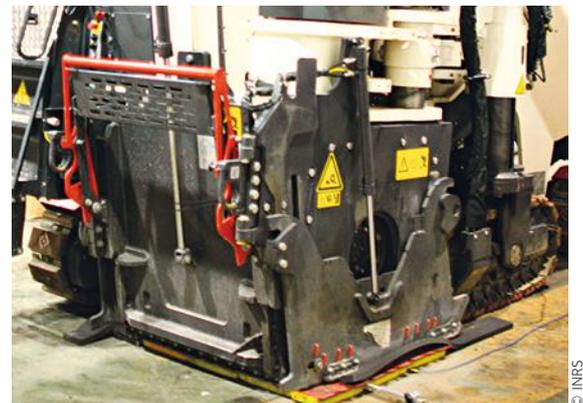
© INRS

↑ FIGURE 3 Séparation intérieur/extérieur pour le test de mesure de l'efficacité de captage.

Détermination de l'efficacité de captage par traçage gazeux

Méthodologie

L'efficacité de captage du dispositif associé au tambour de fraisage est estimée en simulant les poussières par un gaz traceur (l'hexafluorure de soufre, SF_6) ; l'évaluation ne tient donc pas compte des effets d'abattage humide et du séparateur. L'efficacité de captage représente le ratio entre le débit de traceur généré au niveau du tambour et le débit de traceur rejeté par le système d'aspiration. Ce ratio s'obtient en mesurant, au rejet du captage, la concentration C_2 quand la génération de traceur est



© INRS

↑ FIGURE 4 Exemple d'étanchéité réalisée autour du carter de la raboteuse.

TEST	ROTATION TAMBOUR	SÉPARATEUR ÉLECTROSTATIQUE	RÉGIME MOTEUR (tr/min)	EFFICACITÉ (%)	DÉBIT D'AIR (m ³ /h)
1	non	non	2 100	98	2 200
2	oui	non	2 100	90	2 200
3	oui	oui	2 100	91	2 200
4	oui	non	1 900	92	2 000
5	oui	non	1 700	91	1 800

← TABLEAU 1
Résultats des tests de mesure de l'efficacité de captage.

L'aspersion d'eau n'est pas en service pour éviter notamment les problèmes d'humidité pour les appareils de mesure. La lubrification des bandes transporteuses n'étant plus assurée sans aspersion d'eau (non mise en service), les tests s'effectuent donc avec les bandes transporteuses à l'arrêt.

Afin que la mesure ne soit pas faussée par d'éventuelles rafales de vent, le test se déroule en plaçant la machine à l'intérieur d'un hall d'essai, mais en laissant l'extrémité de la bande transporteuse à l'extérieur. Cette disposition vise à éviter que le rejet de l'air enrichisse progressivement le hall en traceur. La séparation est réalisée en plaçant la machine dans l'entrée d'une porte à rideau et en complétant l'étanchéité avec une bâche (Cf. Figure 3).

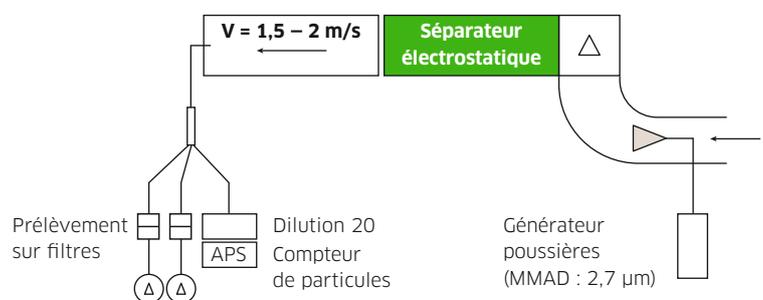
En raison de la hauteur inhabituelle du tambour afin de permettre la rotation sans fraisage, le carter n'est plus en contact avec le sol. En situation réelle de rabotage, les jupes entourant le carter auraient été en contact avec le sol et les gravats auraient comblé les interstices notamment à l'avant du carter. Il a donc été jugé logique d'étanchéifier ces zones pour réaliser le test (Cf. Figure 4).

Pour permettre la rotation du tambour et le fonctionnement du dispositif de captage, le moteur de la raboteuse est en fonctionnement durant le test à un régime équivalent au régime de travail (2 100 tr/min). Le système de mesure est composé d'un analyseur de gaz SF₆ (modèle Infran, étalonné dans la gamme allant de 0 à 8 000 ppb⁵), d'un débitmètre massique étalonné sur l'intervalle [0 - 0,2 NL/min]⁶, et d'un ordinateur portable servant de système d'acquisition.

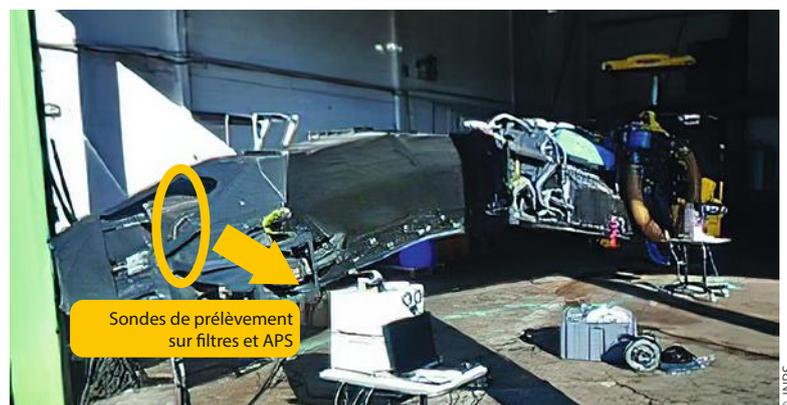
Résultats

Pour s'assurer du bon fonctionnement global de l'installation et visualiser les « fuites » au niveau du carter, une injection de fumée est réalisée sous le tambour. Quelques fuites apparaissent en partie haute du carter après mise en rotation du tambour. Le Tableau 1 recense les tests réalisés et les résultats en termes d'efficacité de captage. Le débit d'air de captage calculé par dilution du gaz traceur est également fourni. Afin d'estimer la sensibilité de la méthode, différentes configurations ont été testées et ont permis d'évaluer l'influence de la mise en rotation du tambour, du fonctionnement

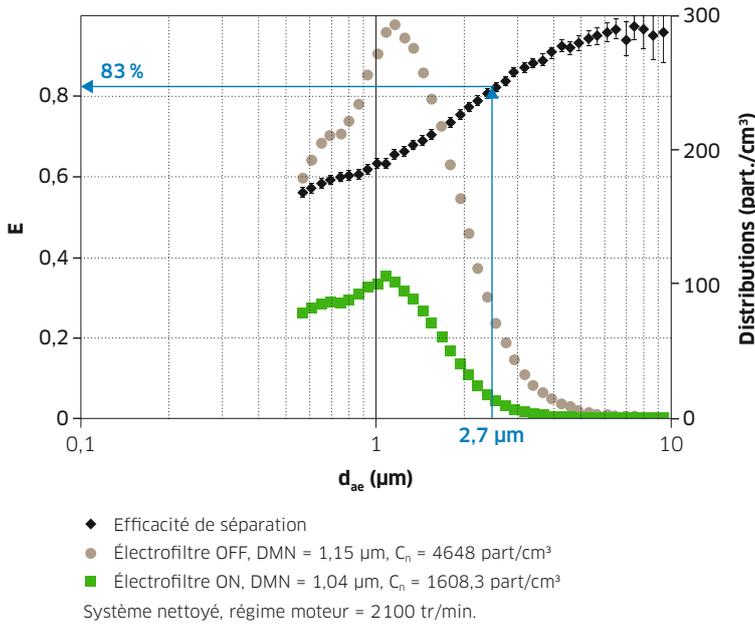
du séparateur électrostatique et du régime moteur. La mise en rotation du tambour (qui crée un écoulement dans le carter, engendrant des surpressions locales) entraîne une baisse de l'efficacité de captage de l'ordre de 7 %, ce qui confirme les observations faites au fumigène. La constance des débits montre que sur cette machine, la mise en rotation du tambour (sans réel travail cependant) ne modifie pas le débit d'air extrait. Par ailleurs, on constate que le changement de régime moteur (qui permet, entre autres, la mise en rotation du tambour et l'alimentation du ventilateur d'extraction ; tests n° 4 et 5) présente un impact sur le débit d'air extrait, mais l'influence sur l'efficacité de captage reste toutefois négligeable. Pour finir, le fonctionnement du séparateur électrostatique (test n° 3) n'a, comme attendu, pas d'impact sur l'efficacité de captage.



↑ FIGURE 5 Schéma du montage expérimental établi pour la détermination de l'efficacité du séparateur électrostatique.



↑ FIGURE 6 Montage expérimental pour la mesure de l'efficacité du dispositif de séparation électrostatique.



↑ FIGURE 7
 Distributions granulométriques en nombre (poussière CaCO₃).

Détermination de l'efficacité de séparation - Machine statique

Méthodologie

La machine a été testée dans le même hall utilisé pour les mesures d'efficacité de captage. La méthode de mesure de l'efficacité de séparation du dispositif électrostatique consiste à générer une poussière à l'amont du système et à mesurer sa concentration en aval dans deux configurations : électrofiltre activé (ON) et désactivé (OFF). Une poussière de carbonate de calcium (CaCO₃) a été injectée dans le conduit souple d'aspiration amont (diamètre de 175 mm) au moyen d'un générateur de poudre (modèle RBG 1000, Palas). La poussière test de CaCO₃ a été retenue en raison de son absence de toxicité et pour sa granulométrie proche de celle des poussières émises par les opérations de rabotage. Les essais ont été conduits en l'absence d'aspersion d'eau au niveau du convoyeur primaire et donc sur des poussières sèches.

Les prélèvements sur l'aérosol ont été effectués en aval, à l'extrémité de la bande transporteuse (Cf. Figures 5 et 6). Le prélèvement est effectué au moyen d'une sonde coudée (buse d'entrée de diamètre Ø = 6 mm), d'un diviseur de débit (Flow splitter, TSI) dirigeant l'aérosol vers deux filtres de prélèvement (Whatman GFC, diamètre 37 mm) et d'un granulomètre (modèle APS 3321, TSI). Les prélèvements sur filtre ont été effectués au débit de 3 L/min, et la masse de particules recueillie a été analysée par pesée.

L'analyseur APS permet la mesure de la distribution granulométrique en nombre en fonction du diamètre aérodynamique des particules dans la gamme de d_{ae} [0,5 - 15 µm]. Une dilution par 20 de l'échantillon est effectuée en amont de l'analyseur, compte tenu des concentrations élevées.

L'efficacité de séparation est déterminée à partir des distributions granulométriques en nombre, établies avec l'analyseur APS selon la relation :

$$E_i = \frac{C_n(\text{OFF})_i - C_n(\text{ON})_i}{C_n(\text{OFF})_i} \quad (1)$$

avec C_n(OFF)_i et C_n(ON)_i : les concentrations en nombre correspondant à chaque classe granulométrique i de l'APS, respectivement avec le séparateur désactivé (OFF) et activé (ON).

L'efficacité globale (en masse) vis-à-vis de l'aérosol d'essai est également déterminée à partir des prélèvements sur filtre :

$$E_T = \frac{C_M(\text{OFF}) - C_M(\text{ON})}{C_M(\text{OFF})} \quad (2)$$

avec C_M(OFF) et C_M(ON) : les concentrations en masse déterminées par prélèvement sur filtre, séparateur électrostatique OFF et ON.

Le débit d'air variant avec le régime moteur, d'environ 2 200 m³/h à 2 100 tr/min et 1 800 m³/h à 1 700 tr/min, la mesure de l'efficacité de séparation

TABLEAU 2 →
 Résultats des prélèvements sur filtre.

CONFIGURATION	ÉLECTROFILTRE OFF C _M (mg/m ³)	ÉLECTROFILTRE ON C _M (mg/m ³)	EFFICACITÉ MASSE E _T (%)
2 100 tr/min Propre	24,09	2,82	86,8
	22,76	3,21	
	21,94	3,02	
	Moy. = 22,93	Moy. = 3,02	
1 700 tr/min Propre	18,24	2,11	90,6
	22,56	1,51	
	20,04	2,06	
	Moy. = 20,3	Moy. = 1,90	
2 100 tr/min Encrassé	25,35	2,89	88,0
	14,35	1,88	
	Moy. = 19,85	Moy. = 2,39	

a été réalisée pour ces deux régimes. Les essais ont été effectués d'abord avec le système de séparation électrostatique récupéré encrassé, au régime moteur de 2 100 tr/min. Le système a ensuite été nettoyé à l'eau, séché puis testé aux régimes de 2 100 tr/min et 1 700 tr/min. Trois configurations ont donc été testées : 2 100 tr/min (système encrassé et nettoyé) et 1 700 tr/min (système nettoyé).

ceux obtenus avec le dispositif nettoyé à 2 100 tr/min. Le *Tableau 2* présente les concentrations massiques, établies à partir des prélèvements sur filtre. Les efficacités en masse ainsi déterminées sont étroitement liées aux caractéristiques granulométriques en masse de l'aérosol test et ne peuvent être généralisées à d'autres poussières ayant une distribution granulométrique différente. On peut constater que



© Davy Roussel / INRS/2020

Résultats

Les distributions granulométriques en nombre, établies avec l'électrofiltre ON et OFF, après lavage du système, au régime moteur de 2 100 tr/min, ainsi que l'efficacité de séparation, sont représentées sur la *Figure 7*. L'efficacité de séparation est déduite de ces mesures.

Une grandeur utile est le diamètre moyen en masse des particules, calculé à partir de la distribution en nombre (électrofiltre OFF, Cf. *Figure 7*), en faisant l'hypothèse d'une densité des particules de CaCO_3 égale à 2,8. Ce diamètre ainsi déterminé est égal à $2,7 \mu\text{m}$ et l'efficacité à ce diamètre est de 83 %. Les résultats correspondant aux deux autres configurations testées n'ont pas été représentés, car ils sont très similaires à

les résultats de mesure par APS et par prélèvement sur filtre sont en bon accord et sont conformes avec les résultats des tests effectués par le laboratoire allemand IGF [5, 6].

Conclusions des mesures et calculs de l'efficacité de séparation

Comme on le voit à la *Figure 7*, le système de séparation électrostatique présente des efficacités de l'ordre de 60 % pour des particules de diamètre aérodynamique d_{ae} de $1 \mu\text{m}$ et de 90 % au d_{ae} de $4 \mu\text{m}$, pour toutes les configurations testées dans le cadre de ces essais. L'encrassement du système ne semble pas avoir d'incidence sur ses performances, du moins aux conditions testées. Par ses performances,



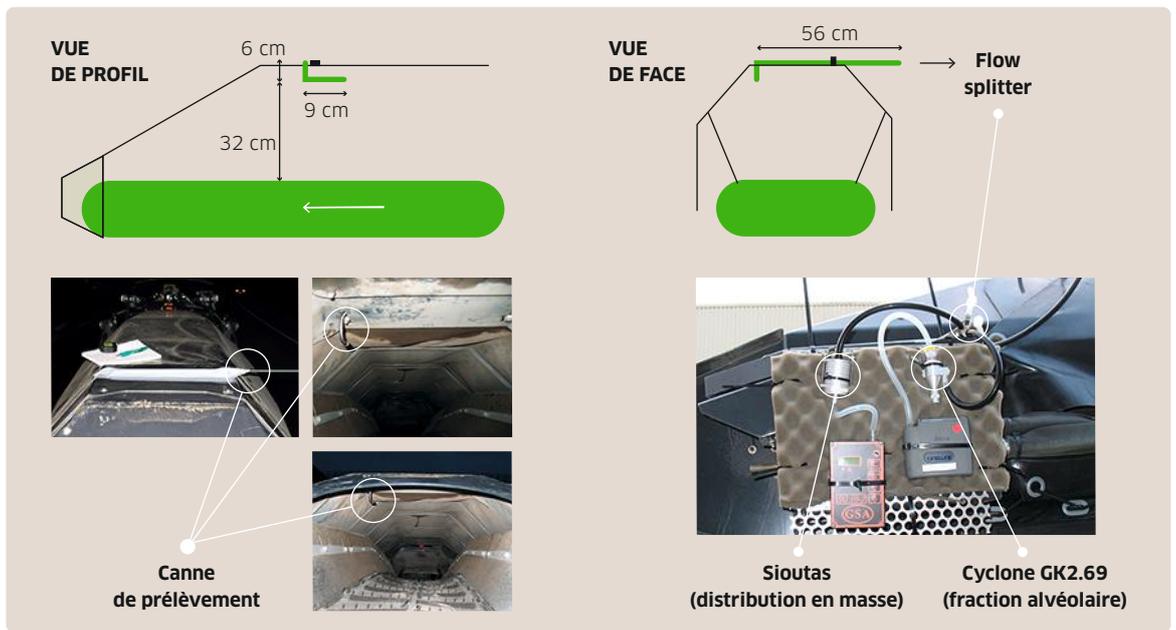


FIGURE 8 → Description du système de prélèvement à l'émission (en sortie de convoyeur).

ce système permet donc de limiter efficacement les rejets de poussières dans l'environnement proche de la machine et par conséquent l'exposition des travailleurs. Le système peut s'avérer néanmoins insuffisant pour l'élimination des particules fines submicroniques. Comme observé, le nettoyage à l'eau du système par arrosage entraîne des émissions de poussières parfois importantes. Cette opération de maintenance ponctuelle devra être optimisée afin de trouver des solutions protégeant au mieux les personnes par automatisation du procédé par exemple.

Mesure des concentrations particulières en sortie de convoyeur lors d'opérations de rabotage de route

Méthodologie de calcul de l'efficacité du séparateur électrostatique

L'intervention a été réalisée en novembre 2020 par l'INRS. Quatre chantiers mobiles de rabotage

de route ont été suivis. Les essais ont été conduits en présence d'aspersion d'eau, au niveau du convoyeur primaire. Pour tous les chantiers, les opérations réalisées sont similaires et ont consisté à raboter la couche superficielle d'une chaussée pour enlever l'intégralité de l'enrobé. L'efficacité E_T est calculée à partir de la formule (2) décrite précédemment avec $C_M(ON)$ et $C_M(OFF)$ les concentrations en masse établies respectivement avec le séparateur électrostatique activé (ON) et désactivé (OFF).

Pour le chantier n° 1 (séparateur ON) et le chantier n° 2 (séparateur OFF), la quantité estimée de matière rabotée étant proche (2,3 et 1,9 m³ respectivement, sur la durée du rabotage), ces deux chantiers ont été comparés l'un avec l'autre pour une première détermination de l'efficacité du séparateur électro-statique, en faisant l'hypothèse (non vérifiée) d'une granulométrie identique des poussières émises entre les deux chantiers.

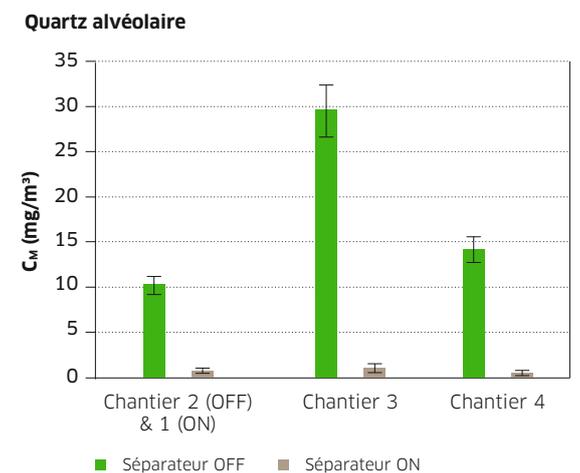
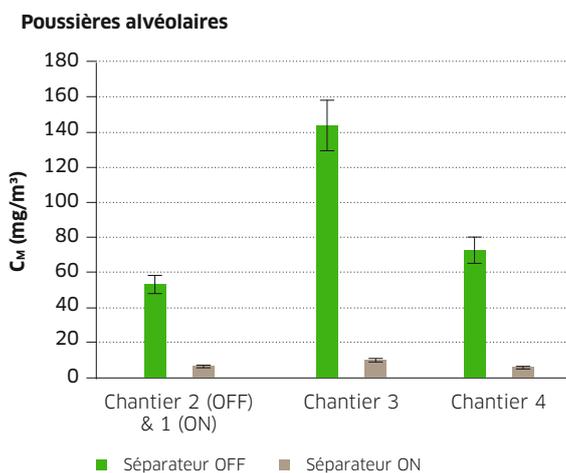


FIGURE 9 → Synthèse des prélèvements et des résultats en gravimétrie et en silice cristalline.

CONCENTRATION EN MASSE (C_m)	E_r			E_r (1 SD)
	CHANTIERS N° 1 & 2	CHANTIER N° 3	CHANTIER N° 4	
Poussières alvéolaires	88 %	93 %	92 %	91 % (3 %)
Silice cristalline	93 %	96 %	96 %	95 % (2 %)
Fraction totale (Sioutas)	75 %	> 75 %	> 87 %	> 79 %
Fraction $d_{ae} > 2,5 \mu m$	87 %	> 85 %	> 97 %	> 90 %
Fraction $d_{ae} 1 - 2,5 \mu m$	78 %	> 78 %	> 85 %	> 80 %
Fraction $d_{ae} 0,5 - 1 \mu m$	49 %	63 %	65 %	59 % (9 %)
Fraction $d_{ae} 0,25 - 0,5 \mu m$	62 %	49 %	68 %	60 % (9 %)
Fraction $d_{ae} < 0,25 \mu m$	78 %	65 %	59 %	67 % (10 %)

← TABLEAU 3
Efficacité de réduction des émissions (E_r) du séparateur électrostatique.

Pour les chantiers n° 3 et 4, la raboteuse a été utilisée dans les deux configurations : séparateur ON et OFF, pour la même opération, au cours du même chantier, et sur une distance et une profondeur équivalentes. Pour ces deux chantiers, la quantité de matière évacuée est considérée comme identique avec le séparateur activé et désactivé. Ainsi, une efficacité moyenne \bar{E}_r du séparateur électrostatique a été déterminée à partir de trois évaluations indépendantes (chantiers 1+2, chantier 3, chantier 4) de l'efficacité E_r .

Méthodes de prélèvement et d'analyse

Une canne de prélèvement en Inox de 6 mm de diamètre a été placée en sortie du convoyeur à gravats (prélèvement à l'émission), à 60 mm de la partie supérieure du convoyeur (Cf. Figure 8). Cette canne est reliée à un diviseur de débit (*Flow splitter* 4 voies, Palas), auquel sont reliés un impacteur en cascade (Sioutas, SKC) pour la distribution granulométrique en masse, et un cyclone (GK2.69, BGI) pour le prélèvement de la fraction alvéolaire. Tous les supports ont été analysés par gravimétrie [7]. La teneur en silice cristalline a également été déterminée sur les prélèvements en fraction alvéolaire par diffraction des rayons X [8].

À noter : Les conditions de prélèvement ne sont pas strictement isocinétiques ; la vitesse de l'air au niveau de la buse de prélèvement étant de 8 m/s, alors que la vitesse au point de prélèvement est estimée à 2 m/s. Cette différence n'a pas d'influence significative sur le prélèvement des particules de taille (d_{ae}) inférieure à 4 μm (fraction alvéolaire), mais elle peut entraîner une sous-estimation de la concentration pour les particules de diamètres supérieurs.

Résultats

Les concentrations massiques en poussières alvéolaires et en silice cristalline alvéolaire à la sortie de convoyeur sont très variables pour chaque chantier, comprises entre 6,5 et 143,7 mg/m^3 , et entre

0,75 et 29,6 mg/m^3 respectivement. Ces empoussièrlements sont dépendants des opérations réalisées qui conditionnent en particulier le débit matière. L'utilisation du séparateur électrostatique permet cependant de diminuer considérablement ces émissions (Cf. Figure 9). L'efficacité du séparateur peut être estimée pour les chantiers n° 3, 4, et en combinant les chantiers 1 et 2. Pour chacune de ces trois déterminations, le débit matière est considéré comme similaire avec séparateur ON et OFF. Une efficacité moyenne du séparateur obtenue à partir des données en concentration en masse est de 91 % \pm 3 % (n = 3) pour les poussières alvéolaires, et de 95 % \pm 2 % (n = 3) pour la silice cristalline alvéolaire (Cf. Tableau 3). La proportion de quartz dans la fraction alvéolaire diminue d'un facteur 2 avec l'utilisation du séparateur électrostatique : 8,9 % - 11,6 % (séparateur ON) ; et 19,1 % - 20,6 % (séparateur OFF).

Les distributions granulométriques en masse obtenues à l'aide des impacteurs en cascade ont permis de calculer une efficacité du séparateur pour une fraction granulométrique donnée (Cf. Tableau 3). L'efficacité apparaît ainsi supérieure à 80 % pour les particules microniques (de diamètre aérodynamique $d_{ae} > 1 \mu m$), et de l'ordre de 60 % pour les fractions plus fines (de $d_{ae} < 1 \mu m$). Ces observations sont en accord avec les résultats des essais réalisés en statique, qui ont montré que le système de séparation électrostatique présentait des efficacités de l'ordre de 60 % pour des particules de $d_{ae} = 1 \mu m$ et de 90 % au $d_{ae} = 4 \mu m$, pour toutes les configurations testées (Cf. Figure 7).

Conclusions des mesures de concentrations

Dans le cadre de ces investigations, les essais ont permis de mettre en évidence que le séparateur électrostatique permettait de réduire plus de 90 % en masse des émissions de particules alvéolaires dont la silice cristalline, en accord avec les résultats obtenus par l'IGF allemand [5]. Par ailleurs, ces essais en conditions réelles confirment que l'efficacité



du filtre électrostatique est plus importante pour les particules de diamètre aérodynamique supérieur à 1 µm.

Conclusion générale de l'étude

Les essais conduits sur la raboteuse ont montré l'efficacité des dispositifs de captage et de filtration des poussières implantés sur la machine et testés à la fois en conditions de laboratoire (machine statique) et sur le terrain.

L'efficacité de captage déterminée par traçage gazeux est de l'ordre de 90 % et l'efficacité de séparation du précipitateur électrostatique, déterminée sur la machine statique à partir de poussière test, est respectivement de 60 et 90 % aux diamètres aérodynamiques 1 et 4 µm. L'efficacité moyenne de séparation obtenue à partir des mesures avec la machine en fonctionnement réel est de 91 % pour les poussières alvéolaires et de 95 % pour la silice cristalline alvéolaire. Par ses performances, tant sur le plan du captage des poussières que de l'efficacité de séparation du précipitateur, ce système permet de limiter efficacement l'empoussièrement dans l'environnement proche de la machine et par conséquent l'exposition des opérateurs, en particulier vis-à-vis des poussières de silice. L'implantation de tels dispositifs est par conséquent fortement encouragée. Une attention particulière doit cependant être portée aux opérations de maintenance et de nettoyage du précipitateur électrostatique qui peuvent engendrer des situations d'exposition importantes des opérateurs.

Enfin, les résultats obtenus dans le cadre de cette étude restent valables uniquement dans le cadre des

conditions opératoires appliquées et des situations évaluées ; ils ne peuvent être facilement généralisés à d'autres situations sans une nouvelle évaluation. ●

1. Voir : https://travail-emploi.gouv.fr/IMG/pdf/Fiche_4_-_Rabotage_sur_chaussées_20_11_13.pdf.

2. Voir : <https://norminfo.afnor.org/norme/pr-nf-en-iso-20500-2/machines-mobiles-pour-la-construction-de-routes-securite-partie-2-prescriptions-specifiques-pour-fraiseuses-routieres/124124>.

3. La raboteuse étudiée correspond au modèle de marque Bomag n° 1000/35. Le dispositif électrostatique en question est le Ion dust shield.

4. L'efficacité du dispositif avait déjà été évaluée par les homologues allemands de l'INRS ; l'objectif de cette étude était de conforter ces premiers résultats, et de les faire connaître à un public francophone élargi.

5. Parties par milliard (en anglais : parts per billion).

6. Normo-litres par minute : débit donné dans les conditions normales de température et de pression, soit à 0 °C et 1,013 bar. Les unités usuelles dans ce contexte de mesure sont en L/min pour un débit de prélèvement ; et en m³/h pour un débit d'extraction.

Remerciements

Les auteurs remercient l'entreprise Colas à Heillecourt (54) pour la mise à disposition du local d'essai, ainsi que les sites de Vittel (88) et Luneville (54) pour leur accueil sur les chantiers de rabotage, l'entreprise Bomag pour la mise à disposition de la machine. Merci également à Cosmin Patrascu pour l'organisation de ces essais ; et à Naïma Gaudel, Stéphanie Pacault, Thiebaud Redeler, Rémi Bensimon et Thierry Lecaque (INRS) pour leur contribution à cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

[1] ANSES – *Dangers, expositions et risques relatifs à la silice cristalline*. Avis de l'Anses, Rapport d'expertise collective, avril 2019, 524 p.

[2] NIOSH – *Best practice engineering control guidelines to control worker exposure to respirable crystalline silica during asphalt pavement milling*. N° Niosh 2015-105, mars 2015.

[3] HAMMOND D., MEAD K., PATRASCU C., BONTHOUX F. – Captage des poussières de silice sur les chantiers de rabotage routier aux États-Unis. *Hygiène & sécurité du travail*, 2015, 241, NT 32, pp. 40-45. Accessible sur : <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=NT%2032>.

[4] HAMMOND D.R., SHULMAN S.A., ECHT A.S. – Respirable crystalline silica exposures during asphalt pavement milling at eleven highway construction sites. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 2016, 13 (7), pp. 538-548. Accessible sur : doi: 10.1080/15459624.2016.1153803.

[5] IGF (Institut für Gefahrstoff-Forschung der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie) – *Expert report regarding the efficiency of the newly developed Bomag dust electrostatic precipitator for ionizing dust particles, which occur when milling road surfaces*. Bochum, 2018, Report No. A8433/17, 42 p.

[6] IGF (Institut für Gefahrstoff-Forschung der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie) – *Auswertung Prüfstand Nr. A8641_19*. Dortmund, 2019, 5 p.

[7] INRS – *Méthode M-278 : Aérosols en fraction alvéolaire*. In : Base de données MétroPol, 2016. Accessible sur : <http://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol.html>.

[8] INRS – *Méthode M-158 : Silice cristalline*. In : Base de données MétroPol, 2020. Accessible sur : <http://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol.html>.