

Étude de cas

CARACTÉRISATION DES AÉROSOLS ULTRAFINS PRODUITS LORS DE TRAVAUX DE RÉFECTION DE VOIES FERRÉES EN TUNNEL

BENOÎT
OURY,
VIRGINIE
MATERA
INRS,
département
Métrologie
des polluants

DENIS BÉMER
INRS,
département
Ingénierie
des procédés

→ **LA PROBLÉMATIQUE :** De nombreux procédés industriels sont susceptibles d'émettre des particules ultrafines (PUF) dans l'air des lieux de travail (procédés thermiques ou mécaniques). Le prélèvement de ces aérosols et la détermination de leurs propriétés physiques et chimiques contribuent à améliorer la connaissance de leur toxicité. C'est dans ce cadre que l'INRS est intervenu auprès de la société Eurotunnel – Getlink. Il s'agissait ainsi de caractériser le plus complètement possible les PUF, sous forme d'aérosols, dans les situations de travail où plusieurs sources d'émission étaient présentes simultanément. L'objectif de cette étude était de disposer d'un cadre permettant de développer des techniques de métrologie adaptées à ce contexte. Ainsi, un ensemble de moyens de mesures complémentaires a été mis en œuvre, afin de caractériser les aérosols ultrafins produits sur un chantier de remplacement de rails du tunnel sous la manche. L'impact des nombreuses sources d'émission de PUF sur la contamination de l'air dans la zone de travail a été déterminé *via* des enregistrements sur appareils à lecture directe, des prélèvements sur filtres et impacteurs suivis d'analyses chimiques, et des observations en microscopie électronique.

→ L'INTERVENTION DE L'INRS :

Description de l'environnement de travail et des méthodes utilisées

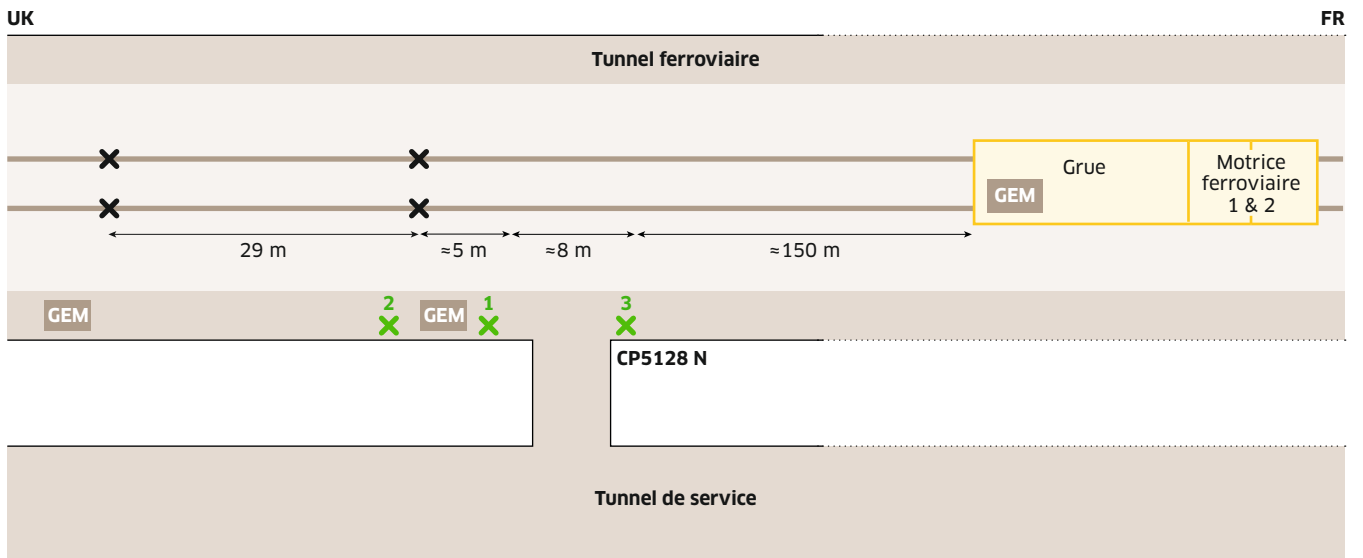
Les mesures ont été effectuées dans un des deux tunnels, séparés d'une distance de 30 mètres, à monovoie et monodirectionnels, réservés à la circulation ferroviaire des navettes Eurotunnel, des Eurostar et des trains de marchandises (Cf. Figure 1). Relié tous les 375 mètres par des

galeries de communication à un tunnel routier de service, chaque tunnel ferroviaire, de 7,6 mètres de diamètre, comprend une voie ferrée bordée de deux trottoirs et surplombée par une caténaire¹. La voie ferrée est constituée de rails soudés en continu, posés sur des traverses en béton.

Les mesures ont été effectuées lors d'une opération de remplacement de deux rails de 29 mètres de longueur. Le chantier comportait différentes motorisations thermiques (diesel et essence), dont la motrice en fonction (Diesel Krupp), attelée au train de travaux équipé d'un groupe électrogène Diesel, alimentant sa grue. Au plus près du chantier, deux petits groupes électrogènes alimentaient l'éclairage des personnels œuvrant sur la voie, ainsi que les ventilateurs et les meuleuses (Cf. Figure 2a). Les tronçonneuses utilisées pour sectionner les rails étaient dotées d'un moteur essence. En plus de ces matériels, différentes opérations étaient susceptibles d'émettre des particules fines dans l'atmosphère de travail :

- la découpe et le retrait des anciens rails ;
- le préchauffage des rails avant les opérations de soudage ;
- la soudure aluminothermique par coulage d'acier liquide produit par réaction chimique entre de la poudre d'aluminium et des grains d'oxyde de fer, dans un moule réfractaire épousant le profil du rail (Cf. Figure 2b) ;
- le meulage puis le ponçage de la zone de soudure pour retrouver la planéité du rail.

Les prélèvements et les mesures ont été réalisés en trois points en bordure de chantier, sur le trottoir de circulation (Cf. Figure 1). Le point n°2 était situé entre les deux groupes électrogènes Diesel et à proximité immédiate (5 mètres) de la zone de



GEM GEM groupe électrogène mobile (fonctionnant au diesel)

- ✘ Points de découpe, soudage et meulage des rails
- ✕ Points de prélèvements et de mesures

Points de mesures

- 1 Prélèvements des particules et analyse des métaux avec des dispositifs des fractions inhalable et alvéolaire et prélèvements avec impacteur en cascade MiniMoudi 135-8 (distribution granulométrique + analyse chimique)
- 2 DiSCmini, Nanoscan, TSI et Aéthalomètre AE51
- 3 Aéthalomètre AE51 et prélèvements fraction alvéolaire pour l'analyse du carbone

↑ FIGURE 1 Représentation schématique du chantier et de l'emplacement des points de prélèvements et de mesures.



↑ FIGURE 2A Vue générale de la zone de travail.



↑ FIGURE 2B Soudage des rails par procédé aluminothermique.



ENCADRÉ

EFFETS DE L'EXPOSITION AUX PUF ET PRINCIPES DE PRÉVENTION

Les études épidémiologiques ont démontré que l'exposition des personnes à la pollution par les particules fines de l'air ambiant était associée à une augmentation des troubles cardiovasculaires, de la morbidité et la mortalité respiratoires [1], ainsi que des cancers [2]. Des études montrent que la nature ultrafine des particules pourrait jouer un rôle dans l'initiation ou la stimulation d'une partie de ces effets [3]. Les particules ultrafines (PUF), définies comme les particules de diamètre aérodynamique inférieur à cent nanomètres (100 nm), ont pour caractéristique de présenter des concentrations en nombre souvent très élevées pour des concentrations massiques faibles, ainsi qu'un rapport surface/volume relativement important. Cette grande surface spécifique des PUF serait, en partie, à l'origine de réponses inflammatoires de l'organisme, responsables par exemple de l'aggravation des affections cardiovasculaires [4]. Si la pollution de l'air par les PUF a un impact reconnu en santé publique [5], elle concerne aussi l'air des lieux de travail où de très

nombreuses sources de PUF ont été clairement identifiées comme : les moteurs à combustion [6], les procédés de soudage et plus généralement de travail des métaux tels que l'usinage, la découpe, la rectification, la projection thermique, qui peut émettre des quantités très importantes de particules ultrafines [7,8], ou l'impression 3D [9]. Mais l'absence de relation dose - effet clairement établie complique l'établissement de valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP). En France, comme à l'étranger, des propositions de VLEP ont été faites par exemple pour le dioxyde de titane (TiO₂) nanométrique [10, 11]. Afin de mieux prendre en compte la toxicité spécifique des PUF, la réglementation de la qualité de l'air des lieux de travail prévoit d'abaisser, dans certains cas, les valeurs limites existantes basées sur des concentrations massiques. Ainsi, la directive européenne n° 2019/130 applicable au 21/02/2023, propose une valeur limite pour 8 heures d'exposition, égale à 50 µg.m⁻³ pour les particules émises par les moteurs Diesel (définie pour le carbone élémentaire

de la fraction alvéolaire)² ; la valeur guide utilisée pour les travaux souterrains étant jusqu'à présent fixée à 300 µg.m⁻³. Mais le seul contrôle de la concentration massique des PUF est insuffisant et nécessite d'être complété par le suivi d'autres métriques, comme la concentration en nombre ou en surface, afin d'améliorer l'évaluation des expositions. Cette démarche consistant à multiplier autant que possible les métriques (nombre, surface, masse, chimie, etc.) est d'ailleurs recommandée par la norme NF EN 16966 [12] ; elle permet de préciser au mieux l'exposition aux PUF, en l'absence de VLEP. Dans de nombreuses situations de travail, les PUF sont générées par différents procédés, ce qui conduit aussi à des mélanges complexes sur le plan physique et chimique, nécessitant des caractérisations variées, portant à la fois sur la granulométrie et la composition chimique des particules. Notons, qu'en matière de protection, les personnes intervenant directement sur les rails étaient équipées d'une cagoule à ventilation assistée, leur fournissant un air filtré.

travail la plus proche (découpe, soudage, etc.). Le point n°1, réservé aux appareils à lecture directe, était un peu plus éloigné de cette zone (de 10 mètres environ). Le point de mesure n°3 était situé en retrait et de ce fait, bien plus sous l'influence des émissions de la motrice Diesel, stationnée environ 100 m plus loin. La motrice s'approchait régulièrement de la zone de travail pour y effectuer l'approvisionnement des nouveaux tronçons de rails et l'enlèvement des anciens. Le choix des points de prélèvement a également tenu compte des contraintes liées à l'activité dans la zone de travail, de l'encombrement et de l'étroitesse du trottoir bordant les voies. La ventilation du tunnel était caractérisée, pendant la période de mesure, par des inversions brutales de la direction d'écoulement de l'air et, par conséquent, des flux de polluants. Ces inversions brusques étaient certainement causées par d'importantes différences de pression au sein des tunnels et de la ventilation.

Mesure des particules Diesel de la fraction alvéolaire

Les prélèvements ont été réalisés à l'aide de différents dispositifs de type cyclone, conçus pour prélever la fraction alvéolaire d'un aérosol : cyclones Dorr-Oliver (TSI) classiques, fonctionnant à un débit de 1,5 à 1,7 L.min⁻¹, dust-cyclone aluminium (SKC) à 2,5 L.min⁻¹ et cyclone Higgins-Dewell ou « SIMPEDS » (BGI-4L, BGI) à 2,2 L.min⁻¹. Les débits étaient assurés par des pompes autonomes et régulées ; la variation maximum du débit tolérée pour la durée du prélèvement est de 5 % ; au-delà, le prélèvement était écarté. Pour les prélèvements spécifiques aux particules Diesel, des filtres en fibres de quartz, chauffés préalablement à 450 °C plusieurs heures, afin de supprimer toute trace de carbone, ont été utilisés. Après le prélèvement, le filtre est analysé à l'aide d'un analyseur de carbone (thermo-optical carbon analyzer, Sunset-Laboratory). Le carbone élémentaire

taire (CE) est l'élément à doser ; il constitue le squelette de la particule et a été retenu par le Centre international de la recherche sur le cancer (CIRC) comme le traceur permettant d'évaluer une exposition aux particules Diesel. La différence de stabilité thermique entre le carbone organique et élémentaire est utilisée pour les discriminer. Différents protocoles d'analyses normalisés (et répertoriés dans la littérature sous les appellations Niosh 930, Improve A et Eusaar 2) peuvent être utilisés pour programmer l'analyseur. Chaque protocole correspond à un profil de montée en température de l'échantillon, qui va plus ou moins favoriser la dégradation thermique des composés adsorbés en surface de la particule de CE et générer des résidus carbonés, qui risqueront de fausser la mesure. En l'absence d'un matériau de référence pour l'analyse du carbone organique et du carbone élémentaire, aucune distinction absolue entre les deux espèces carbonées n'est possible et ne permet de discriminer l'efficacité des protocoles d'analyse. Malgré cette incertitude, le protocole Eusaar 2, associé à la correction optique en transmission, est retenu. En effet, il présente l'intérêt de favoriser la volatilisation des espèces organiques jusqu'à des températures de 650 °C sous atmosphère inerte, tout en limitant leur pyrolyse et l'oxydation prématurée du carbone élémentaire, qui intervient au-dessus de 700 °C [13, 14].

Un aéthalomètre³ (micro-Aeth AE51, AethLabs), muni de son sélecteur de fraction alvéolaire, a été placé à proximité des filtres (point n°3) pendant toute la durée des prélèvements. Si la concentration en carbone-suie (M_{BC}) donnée par l'aéthalomètre n'est pas rigoureusement équivalente à la concentration en carbone élémentaire donnée par la méthode de référence thermo-optique (M_{EC}), ces deux valeurs sont en général assez proches et l'aéthalomètre constitue un bon moyen d'approcher la concentration en carbone élémentaire [15]. L'aéthalomètre prélève l'aérosol sur un filtre au débit Q_p de 0,05 ou 0,1 L.min⁻¹ (diamètre de la zone de filtration : 3 mm). La concentration en carbone suie (« *black carbon* » : BC) est déterminée à partir des variations de l'atténuation de la lumière (ΔA) au travers du filtre, mesurée à la longueur d'onde $\lambda = 0,88 \mu\text{m}$ selon la relation :

$$M_{BC} = \frac{10^3 \Delta A}{\sigma_{BC} L} \quad (1)$$

Avec M_{BC} : la concentration de BC (g/m³) ; σ_{BC} (m²/g) : la section efficace d'absorption des particules de carbone suie déposées sur le filtre ($\sigma_{BC} = 12,5 \text{ m}^2/\text{g}$, fournie par le fabricant) ; L : (m) la longueur du chemin optique donnée par :

$$L = Q_p t_p / S_F \quad (2)$$

avec t_p : le temps d'échantillonnage, S_F : la surface du spot de filtration ($S_F = 1,07 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$).

L'atténuation A est définie par :

$$A = \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (3)$$

avec i et i_0 , respectivement : les intensités de la lumière transmise à travers le filtre d'échantillonnage et à travers le filtre de référence « propre ».

Dosage des métaux et distribution granulométrique

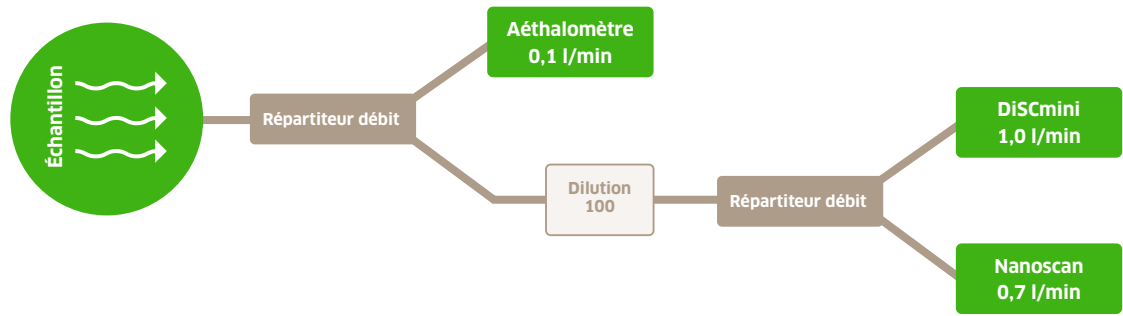
Deux types de dispositifs de prélèvement ont été utilisés pour la détermination des fractions inhalable et alvéolaire des particules métalliques (au point n° 1) :

- Une membrane en PVC est positionnée dans un cyclone Dorr-Oliver (fraction alvéolaire) opérant au débit de 1.7 L.min⁻¹ ou une cassette 37 mm (fraction inhalable) avec un débit de 2 L.min⁻¹. La membrane PVC est pesée avant et après le prélèvement, afin de déterminer la concentration en masse. En parallèle de cette analyse gravimétrique, et afin de déterminer les concentrations en fer et en aluminium, les supports sont ensuite mis en solution à chaud sous pression (UltraWAVE, Milestone) avec un mélange de 1 mL d'acide nitrique et 3 mL d'acide fluorhydrique, jusqu'à une montée en température de 260 °C, température maintenue pendant 20 minutes. Le volume final de la solution après digestion acide est de 20 mL. L'analyse des échantillons ainsi solubilisés est effectuée par ICP-OES⁴ (Varian 720-ES) avec reconstitution de matrice.
- Un impacteur en cascade MiniMoudi 135-8 (TSI) fonctionnant au débit nominal de 2 L.min⁻¹. Ce type de dispositif permet de collecter les particules en fonction de leur diamètre aérodynamique (D_{ae}) et de déterminer, par gravimétrie, la distribution granulométrique en masse des aérosols. Les échantillons ainsi collectés peuvent être ensuite caractérisés par le biais d'analyses chimiques complémentaires. Les 8 étages d'impaction et le filtre terminal collectent les particules de diamètres aérodynamiques compris entre 0,18 μm et 10 μm (avec un dernier étage collectant sur filtre la fraction < 0,18 μm). Les supports sont pesés avant et après prélèvement et sont ensuite traités afin de déterminer les concentrations en métaux, pour chaque étage, selon la procédure décrite précédemment pour les filtres.

Un prélèvement (à l'aide d'un *Mini particle sampler* MPS, Ecomesure) a été effectué pour l'observation directe des particules ultrafines collectées sur une grille de microscopie électronique à transmission (MET). L'analyse des particules par spectroscopie de rayons X à dispersion d'énergie (EDS) a permis



FIGURE 3 → Schéma de montage du dispositif de prélèvement et de mesure avec les appareils à lecture directe.



également de déterminer la composition chimique des particules observées (STEM Modèle 2100-F, Jeol, couplé à un système d'analyse EDS XFlash 5010, Bruker).

Mesure de la concentration en particules au moyen d'appareils permettant d'enregistrer les informations mesurées en fonction du temps

La concentration et la taille des particules ont été mesurées au moyen de trois appareils portables à lecture directe :

- un DiSCmini (Testo) qui permet la mesure de la concentration en nombre des particules

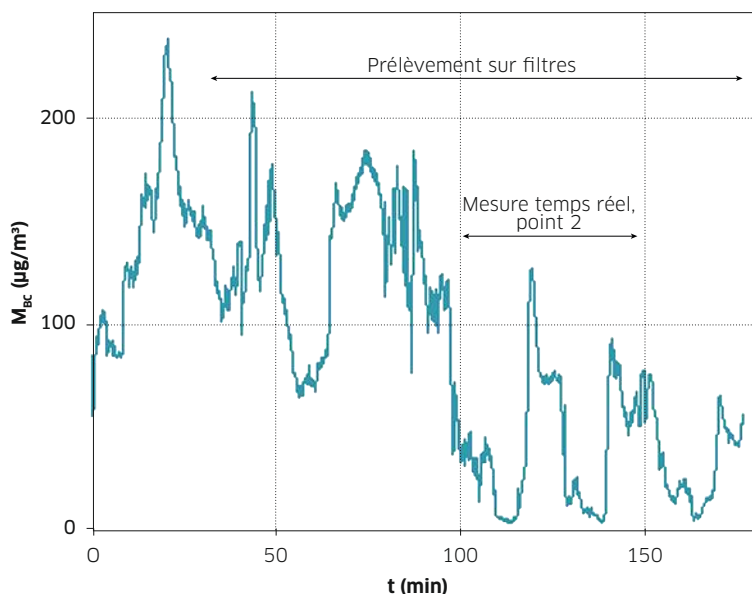
($N < 2.10^6$ particules/cm³) dont la taille est comprise entre 10 et 300 nm ainsi que leur diamètre moyen (dm) [16]. Débit de prélèvement : 1 L.min⁻¹ ;

- un micro-aéthalomètre portable (AE51, Aethlabs) pour la détermination de la concentration en masse des particules de suie. Débit réglé à 0,1 L.min⁻¹ ;
- un analyseur (Nanoscan, TSI) permettant la mesure de la distribution granulométrique en nombre des particules en fonction de leur diamètre de mobilité électrique (entre 10 et 300 nm) et de la concentration ($N < 2.10^6$ particules/cm³). Débit de prélèvement : 0,7 L.min⁻¹.

↓ TABLEAU 1 Concentrations en carbone élémentaire (CE), carbone organique (CO) et carbone-suie (BC) déterminées au point de mesure n° 3.

SYSTÈME D'ÉCHANTILLONNAGE	CM _{CE} (µg/m ³)	ÉCART-TYPE*	CM _{BC} (µg/m ³)	CM _{CO} (µg/m ³)	TEMPS ÉCHANTILLONNAGE (MIN)**
Cyclone Dorr-Oliver	73,9	3,65	/	147,8	140
Dust cyclone Aluminium	84,9	6,47	/	144,1	127
Cyclone Higgins -Dewell - SIMPEDS	86,7	3,24	/	131,4	147
Aéthalomètre AE51	/	/	82,8	/	180

*Quatre prélèvements ont été effectués avec chaque dispositif. **Durées d'échantillonnage différentes, dues aux conditions de mesures.



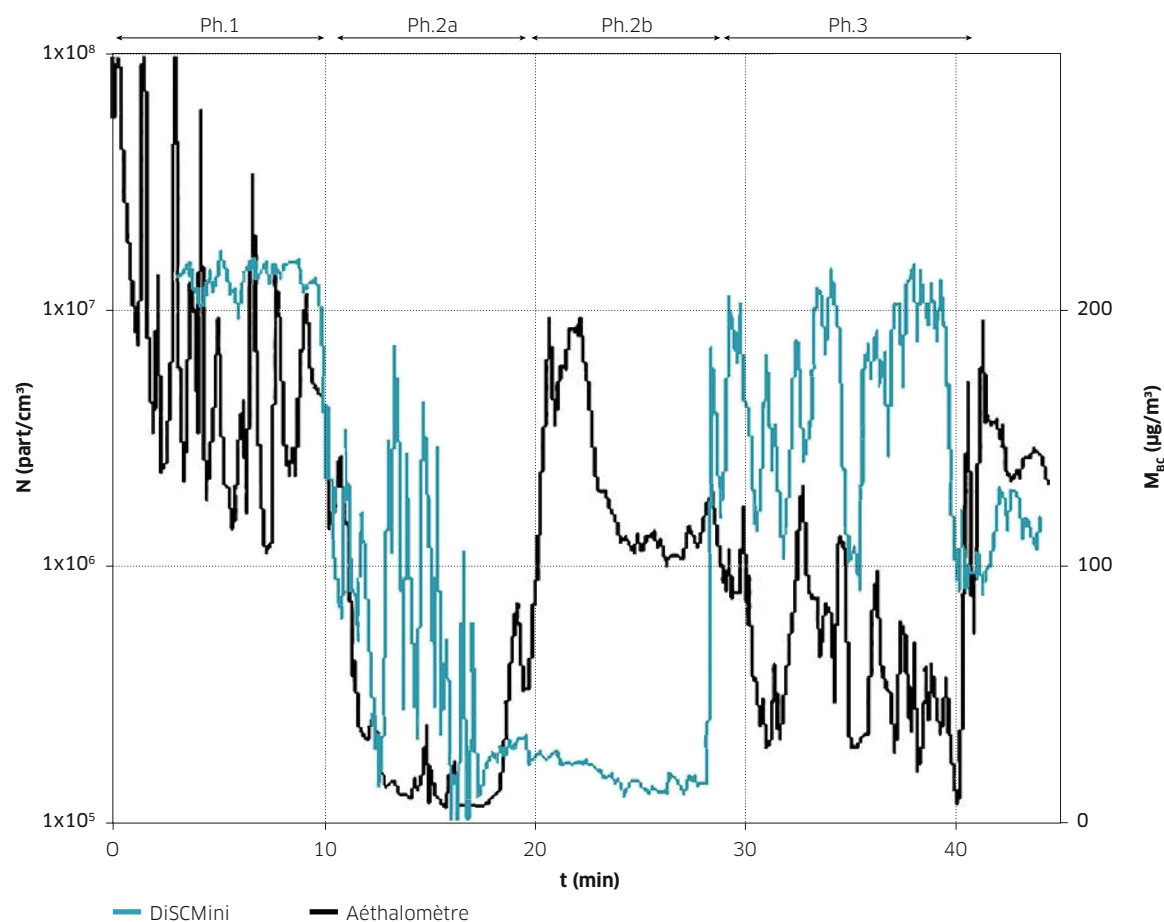
↑ FIGURE 4 Concentration en masse en carbone-suie (BC) donnée par l'aéthalomètre au point n° 3.

Les trois appareils sont reliés à un diviseur de débit (flow splitter, TSI), afin de réaliser les mesures à partir du même échantillon d'air (Cf. Figure 3). Ce dispositif permet de distribuer le flux d'air collecté aux différents appareils sans modifier la distribution granulométrique de l'aérosol. Ceci est vérifié à condition que les débits dans chacune des branches soient équivalents, ou si les particules ont une faible inertie, ce qui est le cas des particules de diamètre de mobilité inférieur à 300 nm. Compte tenu des concentrations en nombre élevées en PUF, les analyseurs DiSCmini et Nanoscan sont raccordés à un système de dilution au centième (Dil 550, Palas). Un deuxième micro-aéthalomètre AE51 a également été disposé au plus près des dispositifs de prélèvement des particules Diesel (point n° 3).

Résultats

Mesure des particules Diesel

Le Tableau 1 présente les résultats des mesures



← FIGURE 5
Concentration
en nombres
mesurée par
DiSCMini
(tracé bleu)
et concentration
en masse de BC
mesurée avec
l'aéthalomètre
(tracé noir)
au point de
mesure n° 2.

de concentration en particules issues des émissions des moteurs Diesel (groupes électrogènes et motrice), seules sources identifiées de carbone sur le chantier, sous forme de carbone élémentaire et organique pour les mesures sur filtre et de carbone-suie (BC) pour la mesure avec l'aéthalomètre. Le profil de concentration établi avec l'aéthalomètre au point de mesure n°3 est représenté sur la Figure 4. La concentration moyenne en BC donnée par l'aéthalomètre a été calculée sur le temps de prélèvement des filtres, décalé d'environ 25 minutes.

Ces résultats indiquent :

- des concentrations en CE un peu plus élevées avec les prélèvements réalisés avec les dust-cyclones aluminium et SIMPEDS, par rapport aux données du cyclone Dorr-Oliver ;
- une concentration moyenne en BC donnée par l'aéthalomètre très proche des concentrations en CE ;
- une fraction en CO comprise entre 60 et 66 % du carbone total (CE+CO) ;
- des fluctuations importantes de la concentration en BC (Cf. Figure 4) liés aux écoulements d'air dans le tunnel qui orientent vers les points de prélèvement soit les émissions en provenance

de la motrice, soit celles provenant des groupes électrogènes.

Mesure de la concentration en particules au moyen d'appareils à lecture directe

La Figure 5 représente la variation de la concentration en nombre établie au moyen du DiSCMini avec celle de la concentration en masse de carbone-suie, mesurée avec l'aéthalomètre au cours d'une période caractéristique de l'activité. Les mesures ont été effectuées au point de mesure n°2, sur une période de temps de 45 minutes, décalée d'environ 1h30 min par rapport à l'heure de départ des prélèvements sur filtres du point de mesure n°3 (Cf. Figure 4). Les variations de concentrations correspondent à différentes phases de travail :

- **phase 1 [0 - 10 min]** : écoulement de l'air dans le « sens UK → Fr »⁵, fin du soudage des extrémités les plus éloignées, groupes électrogènes en fonction, opérations de découpe et de meulage des rails ;
- **phase 2a [10 - 19 min]** : inversion de l'écoulement de l'air : « Fr → UK », groupes électrogènes en fonction, opérations de découpe et de meulage des rails ;
- **phase 2b [19 - 27 min]** : écoulement de l'air toujours dans le sens « Fr → UK », groupes



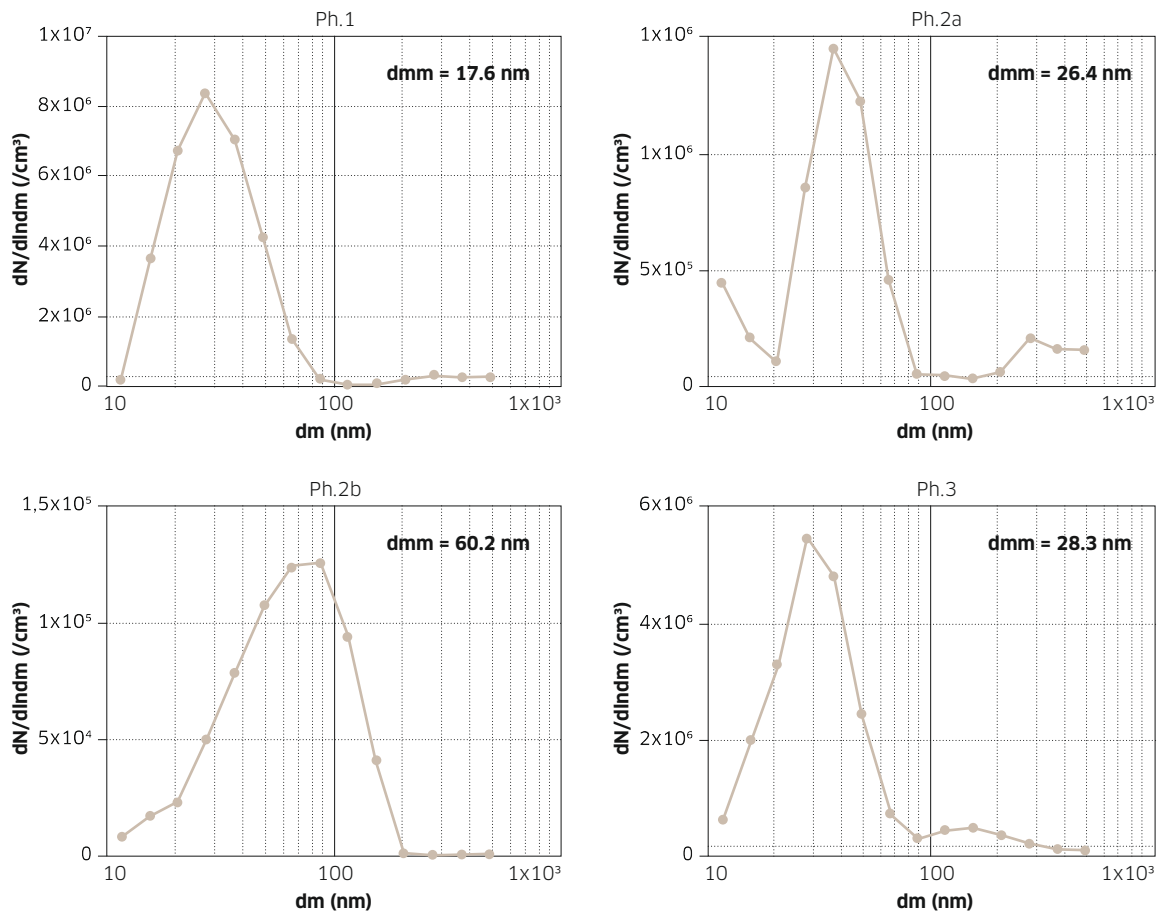


FIGURE 6 → Distributions granulométriques en nombre établies avec l'analyseur Nanoscan au cours des quatre phases décrites sur la Figure 5. *dmm* est le diamètre moyen donné par le DiSCmini au cours des mêmes périodes.

électrogènes en fonction mais moins sollicités, chauffage du rail avant soudure des extrémités proches du point n° 1 ;

- **phase 3 [27 - 44 min]** : inversion de l'écoulement de l'air : « UK → Fr », groupes électrogènes en fonction, démarrage du soudage aluminothermique.

Les distributions granulométriques établies avec l'analyseur Nanoscan au cours de ces mêmes périodes sont représentées sur la Figure 6, où les phases sont composées comme suit :

- **phase 1** : cette période est caractérisée par de fortes concentrations en nombre de particules ($N > 10^7$ particules/cm³) ainsi qu'en masse de CE, avec une distribution en nombre présentant un mode (maximum de la courbe de distribution) compris entre 20 et 30 nm ;
- **phase 2a** : l'inversion de l'écoulement d'air coupe l'alimentation en particules provenant de la zone de travail et fait baisser les concentrations. Le diamètre moyen est compris entre 30 et 40 nm ;
- **phase 2b** : la concentration en nombre chute radicalement alors que la concentration en CE augmente de manière importante, du fait de l'écoulement en provenance de la motrice Diesel en fonction. Les particules sont plus grosses avec un diamètre moyen situé entre 80 et 90 nm ;
- **phase 3** : une nouvelle inversion de l'écoulement

de l'air en provenance de la zone de travail avec démarrage de l'opération de soudage aluminothermique. Les concentrations redeviennent élevées, avec un mode compris entre 20 et 30 nm et un deuxième mode moins important, compris entre 100 et 200 nm.

Comme on peut le constater, les diamètres moyens mesurés par le DiSCmini sont en très bon accord avec les granulométries établies avec le Nanoscan. Ces mesures mettent en évidence que la concentration massique de BC n'est pas nécessairement corrélée à la concentration en nombre de particules de diamètre < 300 nm. Ceci s'explique par le fait que de nombreux procédés émettent des PUF métalliques non détectées par l'aéthalomètre. En outre, la motrice Diesel émet des particules de suie, dont la taille est significativement plus grande que celles émises par les deux groupes électrogènes, comme le montrent les phases 1 et 2b (Cf. Figure 5) et la distribution granulométrique sur la Figure 6, ce qui tend à décorrélérer la concentration en nombre de la concentration en masse de carbone-suie.

Dosage des métaux

→ **Prélèvements sur filtre**

Les résultats des prélèvements sur filtre au point de mesure n° 1, pour la détermination des concen-

	CONCENTRATION (mg/m ³)				DURÉE DE PRÉLEVEMENT (MINUTES)
	GRAVIMÉTRIE	Fe*	Al**	Zr	
Fraction inhalable	1,03/1,13	0,41/0,39	0,02/0,02	0,0174/0,0165	210
Fraction alvéolaire	0,84/0,90	0,29/0,30	0,005/0,005	0,0011/0,0013	130

*VLEP-8h (fumées d'oxyde de Fe, exprimée en Fe) : 5 mg/m³; **VLEP-8h (fumées de soudage, exprimées en Al) : 5 mg/m³.

← **TABLEAU 2**
Concentrations en métaux, pour les deux prélèvements, de la fraction inhalable et de la fraction alvéolaire.

trations correspondant aux fractions inhalable et alvéolaire, avec dosage du fer, de l'aluminium et du zirconium, sont résumés dans le *Tableau 2*. Deux filtres de prélèvements étaient utilisés pour chaque fraction ; le tableau donne les concentrations établies à partir de ces deux prélèvements. Les poussières sont fines, avec une fraction alvéolaire qui représente environ 80 % de la fraction inhalable. Le fer constitue 34 % des particules, correspondant à la fraction alvéolaire et 40 % de la fraction inhalable. Malgré la forte émissivité du procédé de soudage aluminothermique, les concentrations atmosphériques en aluminium sont faibles, en particulier en fraction alvéolaire. Ces concentrations sont très inférieures aux VLEP existantes, bien que celles-ci ne soient pas adaptées pour une comparaison avec les concentrations mesurées. En effet, comme déjà évoqué, les valeurs limites peuvent mériter d'être drastique-

ment revues à la baisse lorsque le caractère nanométrique des particules est avéré.

→ Prélèvements sur impacteurs et grille MET

La *Figure 7* présente la répartition des éléments métalliques identifiés sur les étages de l'impacteur MiniMoudi, à savoir : fer, aluminium et zirconium. Le zirconium provient certainement des lames et disques utilisés pour couper ou polir le rail. L'analyse de ces prélèvements confirme que le fer est majoritairement présent et détecté sur tous les étages. L'aluminium et le zirconium sont présents en moindre concentrations, et uniquement identifiés à partir des étages correspondant aux particules de diamètre aérodynamique de plus de 1,8 µm. Le fait de ne pas avoir détecté d'aluminium sur les étages inférieurs de l'impacteur (Dae < 1,8 µm) est très cohérent avec le rapport inhalable/alvéolaire pour le fer et l'aluminium (80 % – 25 %), mais reste surprenant compte

↓ **FIGURE 7**
Répartition des éléments Fe, Al et Zr sur les étages de l'impacteur MiniMoudi.

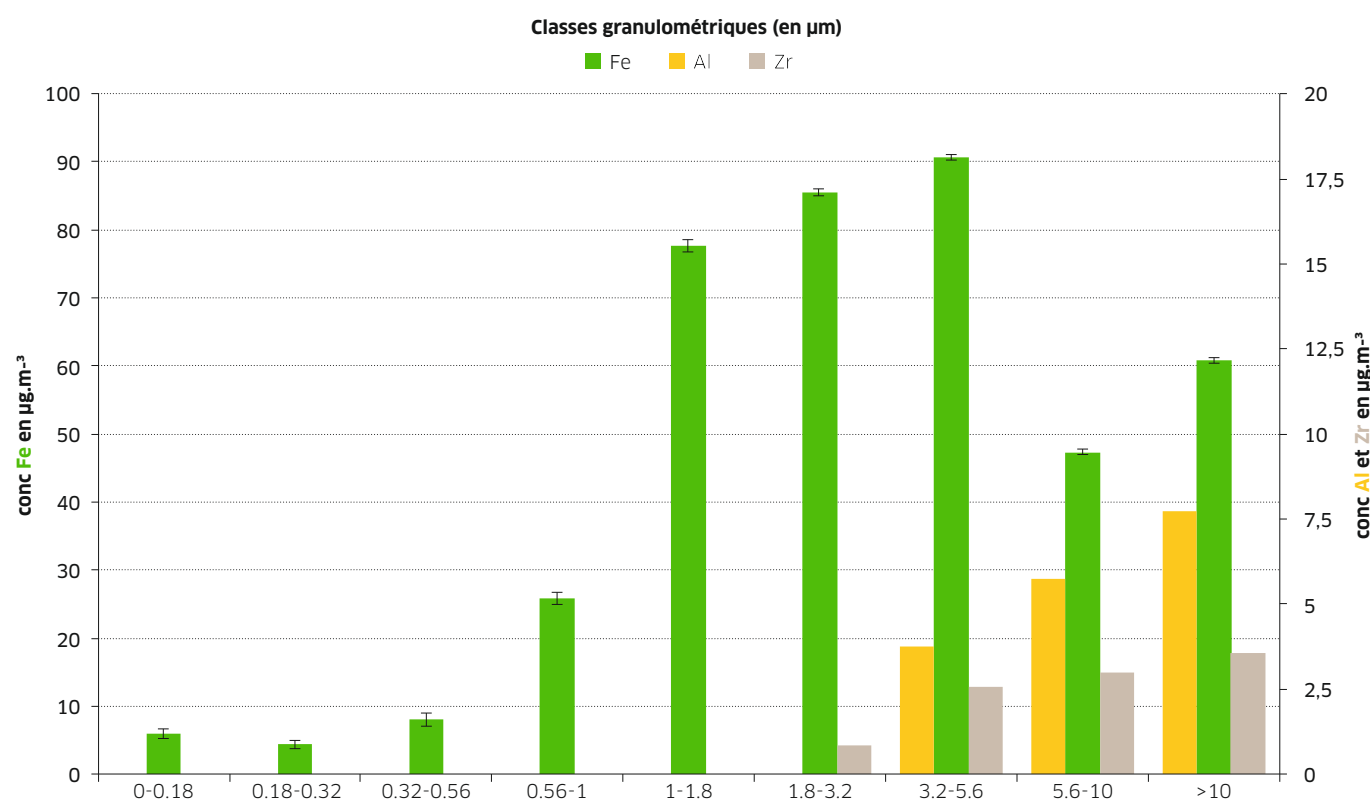


FIGURE 8 →
(À GAUCHE)
Composition chimique des particules établie par spectroscopie de rayon X à partir d'observation au MET.

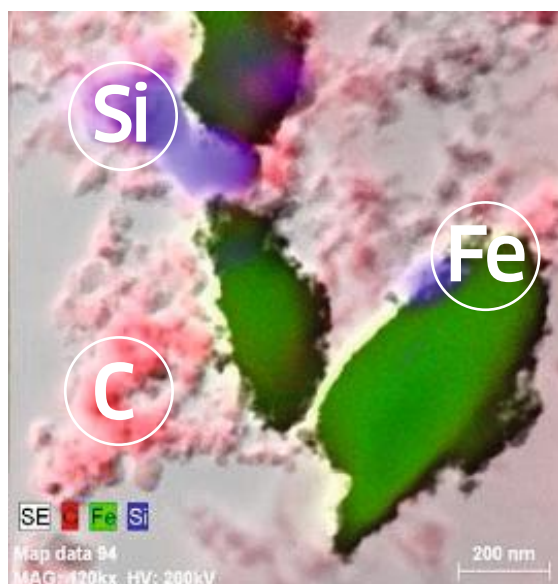
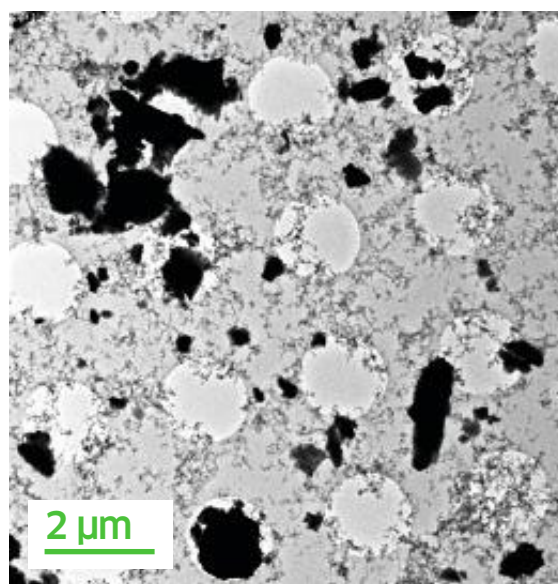


FIGURE 9 →
(À DROITE)
Vue au MET montrant la prépondérance des particules ultrafines sous forme d'agglomérats de nanoparticules tapissant la membrane de prélèvement.



tenu de la taille attendue des particules émises par le procédé de soudage aluminothermique. Les particules contenant de l'aluminium, retrouvées sur les trois premiers étages de l'impacteur MiniMoudi (Dae > 3,2 μm), pourraient être produites par la rupture du moule en céramique à la fin de l'opération de soudage des rails, libérant ainsi des particules d'alumine (résultant de l'oxydation de l'aluminium par l'oxyde de fer lors de l'aluminothermie).

Les analyses en spectroscopie de rayons X, réalisées à partir des observations effectuées au microscope électronique à transmission, confirment ces résultats, comme le montre le cliché présenté sur la Figure 8. On y distingue clairement les particules de fer (submicroniques) et un tapis de nanoparticules de carbone provenant des émissions Diesel, ainsi que des particules de silice. Ces dernières ont pu être produites par les opérations de tronçonnage du rail (présence de silice dans la composition des rails et opération réalisée à même le socle en béton). Le prélèvement sur le support MPS a été effectué en début d'activité, avant le démarrage des opérations de soudage, lors d'opérations de découpe des rails. Les spectres obtenus indiquent quand même la présence d'aluminium, qui n'est pas directement corrélée aux opérations de soudage aluminothermique, mais peut être due à la remise en suspension de particules anciennes. L'observation en microscopie (Cf. Figure 9) illustre bien la prépondérance très nette (en nombre) des particules ultrafines, présentes sous la forme caractéristique d'agglomérats.

Conclusion

Les nombreuses sources d'émission d'aérosols, présentes simultanément dans la zone de travail étudiée, forment un mélange complexe de particules, à la fois sur le plan granulométrique et chimique. Afin de caractériser au mieux cette pollution par-

ticulaire, il a été nécessaire de mettre en œuvre, de manière simultanée, plusieurs techniques de prélèvement et d'analyse, dans un environnement de travail et de mesure difficile : prélèvements sur divers supports (filtres et impacteur), suivis d'une analyse gravimétrique ou chimique (dosage des métaux et du carbone), associés à des mesures au moyen d'appareils à lecture directe. Cette combinaison d'analyses a permis de bien identifier et quantifier les particules produites, ainsi que l'impact des différentes sources sur la composition des aérosols. Les appareils portables à lecture directe permettent d'expliquer les scénarios d'exposition et les contributions des différentes sources : influence des écoulements d'air, variation des concentrations en fonction des activités... L'analyse des supports de prélèvement (par gravimétrie, analyse chimique ou microscopie), permet d'avoir une quantification précise de la chimie des particules, ce que ne permettent généralement pas les appareils à lecture directe, hormis l'aéthalomètre qui donne une mesure plus spécifique du carbone.

Cette campagne de mesure a été menée afin de caractériser les émissions et développer des techniques de métrologie associées. Les résultats ne sont pas représentatifs de l'exposition individuelle d'un salarié, car les prélèvements ont été réalisés en point fixe, au plus près des échappements des engins diesel et sur des durées non compatibles avec celles utilisées pour évaluer une exposition en référence à une valeur limite réglementaire. De plus, rappelons que les personnes intervenant directement sur les rails étaient équipées d'une cagoule à ventilation assistée, leur fournissant un air filtré.

La méthodologie mise en œuvre dans le cadre de ces mesures pourrait être généralisée à de nombreuses autres situations similaires de pollution

de l'air par les aérosols ultrafins. Ces mesures ont également mis en évidence l'émissivité du procédé de soudage aluminothermique dans un environnement confiné (en plus des particules de carbone produites par les motorisations Diesel) qui nécessiterait la mise en place de moyens de captage à la source et d'épuration spécifiques. De plus, ce procédé nécessiterait des investigations supplémentaires, afin de déterminer de manière plus précise les polluants particuliers et gazeux produits, car en l'état actuel, ce point reste peu documenté dans la littérature scientifique. ●

1. La caténaire est le système de suspension des fils conducteurs servant à l'alimentation en courant des engins à propulsion électrique.

2. Directive (UE) n°2019/130 du Parlement européen et du Conseil du 16 janvier 2019 portant modification de la directive n°2004/37/CE concernant la protection des travailleurs contre les risques liés à l'exposition à des agents cancérigènes ou mutagènes au travail (Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE). Accessible sur : www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000038083939.

3. Un aéthalomètre est un instrument qui mesure la concentration de carbone suie (BC : Black carbon) en effectuant une mesure de la lumière absorbée par les particules prélevées en continu sur une bande filtrante.

4. Le sigle « ICP-OES » désigne l'utilisation d'une spectroscopie d'émission de plasma à couplage inductif, idéale pour l'analyse (par exemple) de métaux en solution.

5. Le « sens UK -> Fr » désigne la direction du tunnel qui va du Royaume-Uni vers la France et le « sens Fr -> UK » désigne la direction opposée.

Remerciements

L'INRS remercie la Direction d'Eurotunnel d'avoir autorisé cette campagne de mesures, ses salariés pour leur accueil et leur aide, et plus particulièrement le responsable Hygiène et sécurité, Patrice Royer, ainsi que son équipe, pour avoir initié et organisé cette opération.

BIBLIOGRAPHIE

[1] DELFINO R.J., SIOUTAS C., MALIK S. – Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and cardiovascular health. *Environmental health perspectives*, 2005, 113, pp. 934-946.

[2] ILAR A., PLATO N., LEWNÉ M. ET AL. – Occupational exposure to diesel motor exhaust and risk of lung cancer by histological subtype: a population-based case-control study in Swedish men. *European journal of epidemiology*, 2017, 32, pp. 711-719. Accessible sur : doi: 10.1007/s10654-017-0268-5.

[3] KNOL A.B., DE HARTOG J.J., BOOGAARD H. – Expert elicitation on ultrafine particles: likelihood of health effects and causal pathways. *Particle and fibre toxicology*, 2009, 6 (19), pp. 1-16.

[4] IZZOTTI A., PARODI S., QUAGLIA A. ET AL. – The relationship between urban airborne pollution and short-term mortality: quantitative and qualitative aspects. *European journal of epidemiology*, 2000, 16, pp. 1027-1034.

[5] POPE C.A., DOCKERY D.W., SCHWARTZ J. – Review of epidemiological evidence of health effects of particulate air pollution. *Inhalation toxicology*, 1995, 7 (1).

[6] CAUDA E.G., KI KU B., MILLER A.L., BARONE T. L. – Toward developing a new occupational exposure metric

approach for characterization of diesel aerosols. *Aerosol science and technology*, 2012, 46, pp. 1370-1381.

[7] BÉMER D., MORELE Y., RÉGNIER R. – Filtration of ultrafine particles in industry. *Environmental Tech.*, 2018, 36 (18), pp. 2374-2380.

[8] MATERA V., ROUSSET D. ET AL. – Emissions, distributions et analyses chimiques des particules ultra fines issues de divers procédés industriels. *Hygiène & sécurité du travail*, 2019, 256, pp. 54-61. Accessible sur : www.hst.fr.

[9] BAU S., ROUSSET D., PAYET R. ET AL. – Characterizing particle emissions from a direct energy deposition additive manufacturing process and associated occupational exposure to airborne particles. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 2020, 17 (2), pp. 59-72.

[10] BINET S. ET AL. – Dioxyde de titane nanométrique: de la nécessité de proposer une valeur limite d'exposition professionnelle. INRS, 2017, coll. Note scientifique et technique NS 349. Accessible sur : www.inrs.fr.

[11] ANSES – Valeurs limites d'exposition en milieu professionnel. Le dioxyde de titane sous forme nanométrique (TiO₂-NP, P25). Avis de l'Anses – Rapport d'expertise collective, 2020, 132 p.

[12] NORME NF EN 16966 – Exposition sur les lieux de travail. Mesurage de l'exposition par inhalation de nano-objets et de leurs agrégats et agglomérats – Métriques à utiliser. Afnor, 2018. Accessible sur : www.afnor.org (site payant).

[13] INRS – Émissions particulières d'échappements de moteurs diesel. Méthode MétroPol M-436. Accessible sur : www.inrs.fr/publications/bdd/metropol.html.

[14] OURY B., MELIN S., PELLETIER E. – Prélèvement et analyse des particules émises par les échappements des moteurs diesel dans les atmosphères de travail. INRS, 2021, coll. Note scientifique et technique NS 372. Accessible sur : www.inrs.fr.

[15] RIGLER M., DRINOVEC L., VLACHOU A. ET AL. – A new method and instrument for the measurement of carbonaceous aerosols. In: European aerosol Conference 2017, Zürich, Abstract No. T210N1a8.

[16] BAU S., PAYET R., WITSCHGER O. ET AL. – Mesure en temps réel de l'exposition individuelle aux nanoparticules sous forme aérosol : performance et exemple d'application du DiSCmini. *Hygiène & sécurité du travail*, 2021, 262, pp. 52-62. Accessible sur : www.hst.fr.