

Caractérisation des particules nanométriques non intentionnelles émises dans différents milieux de travail

Maximilien Debia
Cyril Catto
Alan Fleck
Jean-Philippe Masse
Gilles L'Espérance
Brigitte Roberge

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1075

NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement :

- au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST (preventionautravail.com)
- au bulletin électronique [InfoIRSST](#)

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2019
ISBN : 978-2-89797-081-9
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
septembre 2019

Caractérisation des particules nanométriques non intentionnelles émises dans différents milieux de travail

Maximilien Debia¹, Cyril Catto¹, Alan Fleck¹, Jean-Philippe Masse², Gilles L'Espérance², Brigitte Roberge³

¹ Département de santé environnementale et santé au travail, École de santé publique, Université de Montréal

² Centre de caractérisation microscopique des matériaux, Polytechnique Montréal

³ IRSST

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1075



Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document.

En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

Cette publication est disponible en version PDF sur le site Web de l'IRSST.





ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les personnes suivantes qui ont contribué par leur expertise à la réalisation de ce projet ou qui ont facilité l'accès à différents milieux de travail: Jérôme Lavoué, Simon Aubin, Marie-France D'Amours, Isabelle Vézina, Ross Thuot, Jean-François Sauvé, Caroline Couture, Patrick E. Ryan, Kiet Anh Nguyen, Guillaume Lachapelle, François Couture, Renée Hallé, Marie-Josée Ferron, Julie McCabe, Geoffroy Denis, Siyu Tu et Paul Lambert.

Nous exprimons aussi notre considération à l'ensemble du personnel des entreprises et des laboratoires qui nous ont permis de réaliser les différentes interventions.

Cette activité s'inscrit dans une démarche menée conjointement avec une équipe de recherche de la France et vise à harmoniser les méthodes d'évaluation des expositions professionnelles aux particules nanométriques. Aussi, les auteurs tiennent à reconnaître la contribution des chercheurs et collaborateurs engagés dans ce vaste projet appelé ExproPNano et dirigé par Alain Garrigou. Nous remercions notamment Sabyne Audignon, Louis Galey et Alain Garrigou pour avoir nourri les échanges scientifiques sur le sujet.

SOMMAIRE

Les particules nanométriques émises non intentionnellement (PNNI) en milieux de travail présentent un potentiel de toxicité pour les travailleurs. Elles montrent une importante capacité de se déposer dans le système respiratoire et se distinguent par leur grande surface spécifique et un potentiel élevé d'inflammation pulmonaire. Cette étude vise à caractériser les PNNI émises dans six milieux de travail à travers un large éventail d'indicateurs.

Les concentrations ont été évaluées selon les métriques numériques et massiques à l'aide d'une panoplie d'instruments à lecture directe (ILD). Des mesures intégrées ont aussi été effectuées en tenant compte du type de contaminant spécifique à chaque milieu. Ces mesures incluent : (i) les mesures de carbone (élémentaire et organique) des fractions sous-microniques et respirables ainsi que des poussières combustibles respirables pour les émanations de moteur diesel (ÉMD) trouvées dans une mine souterraine (M1), dans un atelier de réparation de camions (M2) et dans le contexte d'activités d'entretien dans un réseau souterrain de transport (M3); (ii) les mesures gravimétriques et les concentrations de 12 métaux (aluminium, cadmium, chrome, cobalt, cuivre, fer, magnésium, manganèse, nickel, plomb, vanadium, zinc) dans les fumées et poussières métalliques émises dans une fonderie (M4) ainsi que dans un atelier d'usinage (soudage, meulage et coupage) (M5); (iii) la mesure de cire de paraffine (C₁₈-C₃₆) des fumées émises dans un atelier de moulage à la cire (M6). En parallèle, des mesures de caractérisation en microscopie ont été effectuées dans les six milieux.

Pour les mesures obtenues par ILD, les concentrations numériques journalières dans les six milieux variaient de 12 900 à 228 600 particules/cm³ et les concentrations massiques de 0,01 à 3,22 mg/m³. En nombre de particules, le milieu des mines souterraines était celui avec les plus fortes concentrations alors que l'atelier de moulage à la cire présentait les concentrations massiques les plus élevées. Dans les milieux où des ÉMD étaient présentes, des concentrations journalières de carbone élémentaire (CE) de 0,002 à 0,503 mg/m³ ont été rapportées avec les ILD.

Pour les mesures intégrées, les concentrations de carbone total (CT) mesurées dans cette étude sont inférieures à la valeur réglementaire québécoise de 0,4 mg/m³ du [Règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines](#) sauf une valeur de 0,7 mg/m³ mesurée dans le milieu M1. Lorsque l'on compare les concentrations de métaux des milieux M4 et M5 aux recommandations de l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), on constate que toutes les concentrations sont inférieures à 10 % des valeurs recommandées, sauf pour une mesure de manganèse (fraction respirable) dans la fonderie (M4). Les concentrations de cire de paraffine mesurées sont inférieures à la valeur limite d'exposition professionnelle de 2 mg/m³ proposée par l'ACGIH pour les fumées que dégage cette substance.

Les travailleurs exposés à des ÉMD (M1, M2 et M3) sont exposés à des particules aéroportées majoritairement de taille nanométrique et dont la concentration massique se trouve largement dans la fraction sous-micronique. En présence des fumées de fonderie (M4), les travailleurs sont exposés à des particules aéroportées majoritairement de taille nanométrique et dont la concentration massique se trouve principalement dans la fraction sous-micronique pour le chrome, le cobalt, le cuivre, le fer, le manganèse, le plomb, le vanadium et le zinc. Les

travailleurs de l'atelier d'usinage (M5) sont exposés à des fumées et poussières d'usinage qui sont majoritairement de taille nanométrique, mais ils recourent à certains procédés qui génèrent des particules plus grossières dont la taille est de l'ordre du micromètre. La contribution des particules plus grossières à la concentration massique est importante dans ce milieu et, par conséquent, la concentration massique se trouve dans la fraction inhalable notamment pour le chrome, le cuivre, le fer et le nickel. Les travailleurs de l'atelier de cire (M6) sont exposés à des fumées qui sont principalement de taille nanométrique et dont la concentration massique se trouve en majorité dans la fraction sous-micronique.

La stratégie innovante mise en place a permis de caractériser les PNNI émises dans les différents milieux de travail sur le plan des concentrations numériques et des concentrations massiques. Les études de microscopie, subséquentes aux prélèvements de particules sur les grilles de microscopie avec les échantillonneurs MPS (Mini Particle Sampler®), ont permis de caractériser les particules collectées selon leur morphologie et leur composition chimique.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	I
SOMMAIRE	III
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XIII
1. INTRODUCTION	1
2. ÉTAT DES CONNAISSANCES	3
2.1 Définitions.....	3
2.2 Effets sur la santé	3
2.3 Évaluation de l'exposition professionnelle.....	4
2.3.1 Mesures en temps réel	4
2.3.2 Mesures intégrées.....	6
2.3.3 Analyses en microscopie	7
2.3.4 Paradigme métrologique et stratégie d'évaluation	7
3. OBJECTIFS DE RECHERCHE	9
4. MÉTHODOLOGIE	11
4.1 Milieux d'étude.....	11
4.2 Dispositifs de mesure.....	11
4.2.1 Mesures en temps réel	12
4.2.2 Mesures intégrées.....	13
4.2.3 Analyses en microscopie	14
4.3 Analyses des données.....	16
5. RÉSULTATS	19
5.1 Mesures en temps réel	19
5.1.1 Concentrations numériques.....	19
5.1.2 Distributions granulométriques des concentrations numériques (M3 à M6).....	22
5.1.3 Concentrations massiques	24
5.1.4 Concentrations de carbone élémentaire sous-micronique CE ₁ (milieux M1, M2 et M3)	27
5.2 Mesures intégrées	28

5.2.1	Émanations de moteur diesel (ÉMD) (M1, M2 et M3)	28
5.2.2	Fumées et poussières métalliques (M4 et M5)	29
5.2.3	Fumées de cire de paraffine	33
5.3	Analyses en microscopie	34
5.3.1	Mine (M1)	34
5.3.2	Milieu souterrain et atelier mécanique (M2 et M3)	35
5.3.3	Fonderie (M4).....	37
5.3.4	Atelier d'usinage (M5).....	38
5.3.5	Atelier de cire de paraffine (M6).....	41
5.4	Comparaison des différents indicateurs d'exposition.....	42
5.4.1	Émanations de moteur diesel (M1, M2 et M3)	42
5.4.2	Fumées métalliques (M4 et M5)	46
5.4.3	Fumées de cire de paraffine (M6).....	47
5.4.4	Comparaison des mesures – tous milieux confondus (M1 à M6).....	47
5.5	Variations saisonnières.....	49
6.	DISCUSSION	51
6.1	ÉMD dans les milieux M1, M2 et M3.....	51
6.2	Fumées métalliques dans les milieux M4 et M5	53
6.2.1	Fonderie (M4).....	53
6.2.2	Usinage (M5).....	55
6.3	Fumées de cire de paraffine dans le milieu M6	57
6.4	Considérations relatives à la métrologie des fractions ultrafines	57
7.	CONCLUSION.....	61
	BIBLIOGRAPHIE	63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Milieux d'étude et principales PNNI évaluées.....	11
Tableau 2.	Instruments à lecture directe (ILD).....	13
Tableau 3.	Analyses sur supports effectuées lors de chaque visite dans les six milieux.....	14
Tableau 4.	Statistiques descriptives des concentrations numériques journalières mesurées à l'aide du P-Trak® dans les six milieux	19
Tableau 5.	Statistiques descriptives des concentrations numériques instantanées mesurées à l'aide de l'EEPS dans les milieux M3 à M6	22
Tableau 6.	Statistiques descriptives des concentrations massiques journalières mesurées avec les DustTrak™ 8520 dans les six milieux	24
Tableau 7.	Statistiques descriptives des concentrations massiques journalières (mg/m ³) mesurées avec les DustTrak™ DRX dans les six milieux	25
Tableau 8.	Statistiques descriptives des concentrations massiques journalières de CE ₁ mesurées avec les Airtec dans les milieux M1 à M3	27
Tableau 9.	Statistiques descriptives des concentrations massiques journalières de CE _R , CT _R , CE ₁ , CT ₁ , P _R et PC _R dans les milieux M1, M2 et M3.....	28
Tableau 10.	Ratios calculés entre les différents estimateurs de concentrations.....	29
Tableau 11.	Statistiques descriptives des concentrations massiques journalières des fumées et des poussières métalliques, mesurées avec des cassettes 37 mm ou avec des impacteurs SIOUTAS dans les milieux M4 et M5	30
Tableau 12.	Distributions moyennes (%) des concentrations massiques des particules déposées aux différents étages d'impaction des SIOUTAS et diamètres aérodynamiques massiques médians (DAMM) dans les milieux M4 et M5.	31
Tableau 13.	Statistiques descriptives des concentrations moyennes journalières de métaux mesurées avec les cassettes IOM, les cassettes 37 mm et les impacteurs SIOUTAS dans les milieux M4 et M5	32
Tableau 14.	Distributions moyennes (%) des concentrations de métaux déposés aux différents étages d'impaction des SIOUTAS et diamètres aérodynamiques massiques moyens (DAMM) dans les milieux M4 et M5	33
Tableau 15.	Distribution moyenne (%) des concentrations de cire de paraffine déposée aux différents étages d'impaction des SIOUTAS et diamètre aérodynamique massique médian (DAMM) dans le milieu M6	34
Tableau 16.	Coefficients de corrélation de Spearman entre les concentrations de carbone élémentaire mesurées dans les fractions sous-microniques (CE ₁) et respirables (CE _R) (mesures intégrées) et les moyennes journalières des paramètres mesurés avec les différents ILD utilisés dans les milieux M1, M2 et M3.....	43
Tableau 17.	Coefficients de corrélation de Spearman entre les concentrations de poussières totales (P _T) mesurées de façon intégrée avec les cassettes	

	37 mm et les moyennes journalières des paramètres mesurés avec les différents ILD	46
Tableau 18.	Coefficients de corrélation de Spearman entre les concentrations de poussières totales (P_T) mesurées de façon intégrée avec les SIOUTAS et les moyennes journalières des paramètres mesurés avec les différents ILD.....	46
Tableau 19.	Coefficients de corrélation de Spearman entre les concentrations de cire de paraffine mesurées de façon intégrée avec les SIOUTAS et les moyennes journalières des paramètres mesurés avec les différents ILD utilisés dans le milieu M6.....	47
Tableau 20.	Valeurs limites d'exposition (mg/m^3) professionnelle proposées pour les métaux par l'ACGIH (2017).....	54

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Dispositif de mesures environnementales.....	12
Figure 2.	Spectromètre de diamètre de mobilité électrique (EEPS).....	13
Figure 3.	Images MET en fond clair à faible grossissement (50X) d'une grille numérotée (A) et d'une ouverture à plus fort grossissement (400X).....	15
Figure 4.	Image MET en fond clair à fort grossissement d'un agglomérat de particules et spectre EDS correspondant.	16
Figure 5.	Distribution des concentrations numériques journalières (particules/cm ³) mesurées à l'aide du P-Trak® dans les six milieux.	20
Figure 6.	Distribution des concentrations numériques instantanées (moyennées sur une minute) (particules/cm ³) mesurées à l'aide du P-Trak® dans les six milieux.	20
Figure 7.	Exemples typiques de profils journaliers des concentrations numériques (particules/cm ³) mesurées à l'aide du P-Trak® dans les six milieux.	21
Figure 8.	Comparaison des distributions des concentrations numériques (particules/cm ³) mesurées avec le P-Trak® et l'EEPS.	22
Figure 9.	Distributions granulométriques moyennes des concentrations numériques de particules mesurées avec l'EEPS dans les milieux M3 à M6.	23
Figure 10.	Distribution granulométrique des concentrations numériques de particules mesurées avec l'EEPS lors du principal pic de concentration dans le milieu M3.	23
Figure 11.	Distribution des concentrations massiques journalières (mg/m ³) mesurées dans la fraction PM ₁ à l'aide du DustTrak™ DRX dans les six milieux.	26
Figure 12.	Distribution des concentrations massiques instantanées (moyennées sur une minute) (mg/m ³) mesurées dans la fraction PM ₁ à l'aide du DustTrak™ DRX dans les six milieux.....	26
Figure 13.	Distribution des concentrations massiques journalières de CE ₁ mesurées avec les Airtec dans les milieux M1, M2 et M3.	27
Figure 14.	Corrélation entre les concentrations massiques mesurées avec les cassettes 37 mm et les impacteurs SIOUTAS dans les milieux M4 et M5.	30
Figure 15.	Image au MET en fond clair (400X) de l'ouverture d'une grille ayant servi au prélèvement de particules dans le milieu M1 (mine).....	34
Figure 16.	Exemples d'images en fond clair au MET du type de particules de carbone majoritairement identifiées dans le milieu M1.	35
Figure 17.	Exemples d'images en fond clair au MET de particules identifiées dans le milieu M1.	35
Figure 18.	Image au MET en fond clair (400X) de l'ouverture d'une grille ayant servi au prélèvement de particules dans le milieu M2 (milieu souterrain).	36

Figure 19.	Exemples d'images en fond clair au MET du type de particules de carbone majoritairement identifiées dans les milieux M2 et M3.	36
Figure 20.	Exemples d'images en fond clair au MET de particules identifiées dans les milieux M2 ou M3.	37
Figure 21.	Image au MET en fond clair (400X) de l'ouverture d'une grille ayant servi au prélèvement de particules dans le milieu M4 (fonderie).	37
Figure 22.	Exemples d'images en fond clair au MET du type de particules majoritairement identifiées dans le milieu M4.	38
Figure 23.	Exemples d'images en fond clair au MET de particules identifiées dans le milieu M4.	38
Figure 24.	Image au MET en fond clair (400X) de l'ouverture d'une grille ayant servi au prélèvement de particules dans le milieu M5 (atelier d'usinage), à proximité du poste de coupage à l'arc.	39
Figure 25.	Image au MET en fond clair (400X) de l'ouverture d'une grille ayant servi au prélèvement de particules dans le milieu M5 (atelier d'usinage), dans une zone de meulage.	40
Figure 26.	Exemples d'images au MET en fond clair (400X) de particules identifiées dans le milieu M5 (usinage) à proximité de l'atelier de coupage à l'arc (M5).	40
Figure 27.	Exemples d'images au MET en fond clair (400X) de particules identifiées dans le milieu M5 (usinage) à proximité de l'atelier de meulage (M5).	40
Figure 28.	Image au MET en fond clair (400X) de l'ouverture d'une grille ayant servi au prélèvement de particules dans le milieu M6 (moulage de cire).	41
Figure 29.	Exemples d'images au MET (400X) en fond clair de particules identifiées dans le milieu M6 (atelier de moulage à la cire).	42
Figure 30.	Proportion des concentrations mesurées par les ILD dans les milieux M2 et M3, par rapport à celles mesurées dans le milieu M1.	44
Figure 31.	Corrélation entre les mesures intégrées de carbone élémentaire respirable (CE_{Resp}) et les moyennes journalières des mesures enregistrées avec les DustTrak™ 8520 pour la fraction respirable (PM_{Resp}) dans les milieux M1, M2 et M3.	44
Figure 32.	Corrélation entre les mesures intégrées de carbone élémentaire dans la fraction sous-micronique (CE_1) et les moyennes journalières enregistrées avec les Airtec dans les milieux M1, M2 et M3.	45
Figure 33.	Relation entre les mesures de concentrations massiques estimées avec les DustTrak™ DRX et les concentrations numériques mesurées avec les P-Trak®.	48
Figure 34.	Distribution granulométrique et limite de détection du P-Trak®.	48
Figure 35.	Distribution des mesures hivernales (portes fermées, D1, D2 et D3) et printanières (portes ouvertes, D4, D5 et D6) des concentrations de CE_R et CE_1 dans le milieu M3.	49

Figure 36. Distribution des mesures estivales (portes ouvertes, D1, D2 et D3) et
automnales (portes fermées, D4, D5 et D6) des poussières totales
prélevées sur cassette 37 mm ou avec les impacteurs SIOUTAS dans le
milieu M4.50

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CE :	Carbone élémentaire
CIRC :	Centre international de recherche sur le cancer
CO :	Carbone organique
CM ² :	Centre de caractérisation microscopique des matériaux
CT :	Carbone total
CNC :	Compteurs de noyaux de condensation
DAMM :	Diamètre aérodynamique massique médian
ECM :	Esters de cellulose mélangés
EDS :	Spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (<i>Energy dispersive X-ray spectroscopy</i>)
EEPS :	Spectromètre de mesure de la taille des particules d'échappement moteur (<i>Engine exhaust particle sizer</i>)
ELPI :	Impacteur électrique à basse pression (<i>Electrical low pressure impactor</i>)
ÉMD :	Émanation de moteur diesel
ESPUM :	École de santé publique de l'Université de Montréal
ETG :	Écart-type géométrique
FCAW :	Soudage à l'arc avec fil fourré (<i>Flux-cored arc welding</i>)
FeNO :	Fraction d'oxyde nitrique exhalé
FMPS :	Spectromètre de mesure rapide des particules à partir de leur mobilité (<i>Fast mobility particle sizer</i>)
FEV ₁ :	Volume d'expiration maximale en 1 seconde
FVC :	Capacité vitale forcée
GMAW :	Soudage à l'arc sous gaz avec fil solide (<i>Gas metal arc welding</i>)
ICP-MS :	Spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif
ILD :	Instrument à lecture directe

INERIS :	Institut national de l'environnement industriel et des risques
IRSST :	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
LHIMP :	Laboratoire d'hygiène industrielle et de métrologie des polluants
MEB :	Microscopie électronique à balayage
MET :	Microscopie électronique en transmission
MG :	Moyenne géométrique
MPS :	Mini préleveur de particules (<i>Mini particle sampler</i>)
NRD :	Préleveur de nanoparticules pouvant se déposer dans les voies respiratoires (<i>Nanoparticle respiratory deposition sampler</i>)
NIOSH :	National Institute for Occupational Safety and Health
PN :	Particules nanométriques
PNNI :	Particules nanométriques non intentionnelles
PNM :	Particules nanométriques manufacturées
PUF :	Particules ultrafines
SMPS :	Spectromètre de mesure du diamètre de mobilité électrique (<i>Scanning mobility particle sizer</i>)
TIG :	Soudage avec électrode de tungstène
VEMP :	Valeur moyenne d'exposition pondérée
VLEP :	Valeur limite d'exposition professionnelle

1. INTRODUCTION

Cette activité s'inscrit dans la suite logique de différentes recherches menées par l'équipe du Laboratoire d'hygiène industrielle et de métrologie des polluants (LHIMP) de l'École de santé publique de l'Université de Montréal (ESPUM) sur la question des expositions professionnelles aux particules nanométriques (PN).

Le projet IRSST 0099-7890 a d'abord permis de caractériser l'exposition à des particules nanométriques non intentionnelles (PNNI) et à des particules nanométriques manufacturées (PNM) chez différents travailleurs, notamment à l'aide de compteurs de noyaux de condensation (CNC) (Debia, Beaudry, Weichenthal, Tardif et Dufresne, 2012a). Le projet a démontré que les CNC étaient adaptés à l'évaluation des concentrations des PN, mais que plusieurs incertitudes demeuraient pour évaluer l'exposition à des PNM, notamment du fait de leur forme agglomérée.

Le projet IRSST 2013-0059 focalisait ensuite sur les PNM. Il a ainsi consisté à évaluer différentes méthodes de prélèvement et de caractérisation de ces particules dans l'air et sur des surfaces des milieux de travail (Debia, L'Espérance, *et al.*, 2017). Il a notamment contribué à l'étude spécifique de certaines tâches et de certains procédés industriels, de même qu'à l'étude de certaines PNM encore peu évaluées, comme la nanocellulose. Ces investigations ont permis de proposer une stratégie d'évaluation plus précise des expositions aux PNM en recourant à des techniques de microscopie électronique nécessitant un minimum de manipulations préanalytiques.

En cours, le projet ExproPNano, bénéficie d'un financement par l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) et est conduit en partenariat avec des équipes de recherche en France sous la direction d'Alain Garrigou. Ce projet vise à élaborer et à éprouver une démarche harmonisée d'évaluation des expositions professionnelles aux PN.

Au vu de ces recherches, il apparaît qu'une étude de caractérisation et de maîtrise des expositions professionnelles aux PN devrait inclure une évaluation des concentrations massique et numérique, une mesure de la distribution granulométrique ainsi qu'une caractérisation par microscopie électronique.

Dans cette perspective, cette activité fournit des données nouvelles au regard d'un large éventail d'indicateurs d'exposition à des PNNI.

2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

2.1 Définitions

Les particules nanométriques (PN) possèdent au moins une dimension inférieure à 100 nm. Elles se distinguent des PN manufacturées (PNM) par opposition aux PN émises non intentionnellement (PNNI) (aussi appelées particules ultrafines (PUF)). Les premières sont issues d'une production à des fins commerciales liées au domaine des nanotechnologies, alors que les PNNI ont une origine naturelle (p. ex. : évaporation, érosion, éruption volcanique) ou anthropique (fumées de soudage ou émanations de moteur diesel (ÉMD)). En milieu industriel, les PNNI sont principalement générées durant des procédés chauds ou de combustion sous forme de particules primaires plus ou moins agglomérées produites par condensation et par nucléation.

Les PNNI font l'objet spécifique des investigations résumées dans le présent rapport. Il est toutefois entendu que, dans ledit document, le terme « PNNI » pourra parfois englober, sous cette désignation, des fractions de particules fines en sus des PNNI *stricto sensu*.

2.2 Effets sur la santé

En raison de leurs petites tailles, les PNNI ont la capacité de pénétrer les vaisseaux sanguins puis d'atteindre d'autres cibles telles que le système cardiovasculaire, le foie et le système nerveux central (Bakand, Hayes et Dechsakulthorn, 2012; Kreyling, Semmler-Behnke, Takenaka et Moller, 2013). Les PNNI ont également une importante capacité de former des dépôts pulmonaires, une grande surface spécifique, ainsi qu'un potentiel élevé d'inflammation pulmonaire et de capacité d'oxydation (Frampton *et al.*, 2004).

Certains effets sur la santé associés à l'exposition aux PNNI ont été évalués lors d'études épidémiologiques. Ces effets incluent : (i) la mortalité (Atkinson, Fuller, Anderson, Harrison et Armstrong, 2010; Breitner *et al.*, 2011; Breitner *et al.*, 2009) ; (ii) les effets cardiovasculaires (p. ex. : arythmie, ischémie, variation de la pression artérielle) (Barclay *et al.*, 2009; Delfino *et al.*, 2011; Delfino *et al.*, 2009; Rich *et al.*, 2012) ; (iii) les effets respiratoires (p. ex., effets sur les fonctions pulmonaires et allergies) (Andersen *et al.*, 2008; de Hartog *et al.*, 2010; Song *et al.*, 2011).

Les effets de l'exposition aux PNNI sur différentes mesures de la fonction pulmonaire (p. ex. : volume d'expiration maximale en 1 seconde [FEV1] et capacité vitale forcée [FVC]) et de l'inflammation pulmonaire (p. ex., fraction d'oxyde nitrique exhalé [FeNO]) ont été évalués dans des études d'expositions environnementales. Karotki *et al.* ont constaté qu'une augmentation de l'exposition de 32 109 particules/cm³ était associée à une réduction de 2,1 % (IC 95 % : -3,7 à -0,2) du ratio FEV1/FVC dans une population de personnes âgées au Danemark (Karotki *et al.*, 2014). Gong *et al.* ont comparé les niveaux d'exposition aux PNNI avant et après l'implantation de mesures de contrôle de la qualité de l'air lors des Jeux olympiques de Beijing en 2008 et évalué les associations entre ces niveaux et les mesures de FeNO exhalé chez 125 jeunes adultes. Les auteurs ont signalé qu'une augmentation de 5340 particules/cm³ était associée à une augmentation de FeNO exhalé de 23,3 % (IC 95 % : 12,9 à 39,0) immédiatement après l'exposition (Gong *et al.*, 2014).

Sur le plan des mesures d'effets réalisées dans un contexte d'évaluation des expositions professionnelles, Haluza *et al.* ont constaté une diminution significative de -2,91 mL par année d'exposition du niveau de FEV1 chez des soudeurs (Haluza, Moshammer et Hochgatterer, 2014). Hoffmayer *et al.* ont, pour leur part, mis en évidence des changements au regard des biomarqueurs dans l'air exhalé à la suite d'expositions à des fumées de soudage. Ces auteurs ont suggéré que les effets irritants des voies respiratoires inférieures étaient accrus chez des soudeurs de pièces en acier doux utilisant le procédé de soudage à l'arc avec fil fourré (FCAW) par rapport à ceux utilisant le procédé de *soudage à l'arc sous gaz avec fil plein* (GMAW) (Hoffmayer *et al.*, 2012). Dierschke *et al.* ont, eux aussi, relevé des changements dans les divers marqueurs inflammatoires (LT-B4, IL-6 et IL-8) présents dans l'air exhalé ou dans les liquides de lavage nasal de travailleurs exposés à des fumées de soudage dans une chambre d'exposition contrôlée (Dierschke *et al.*, 2017).

Par ailleurs, plusieurs contaminants présents sous forme majoritairement nanométrique sont considérés comme cancérogènes pour l'homme. Ainsi, les gaz d'échappement des moteurs diesels et les fumées de soudage ont été classés comme contaminants du groupe 1 par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) (Benbrahim-Tallaa *et al.*, 2012; Guha *et al.*, 2017).

2.3 Évaluation de l'exposition professionnelle

Les expositions des travailleurs aux PN sont évaluées par différentes méthodes. La première méthode est la mesure effectuée en temps réel, avec un instrument à lecture directe (ILD) qui rapporte des concentrations massiques, numériques ou de surface spécifique de particules fines et ultrafines. La deuxième est la méthode classique pour évaluer les expositions des travailleurs qui se basent sur des mesures intégrées avec des prélèvements dans la zone respiratoire des travailleurs suivis d'analyses des contaminants selon une métrique massique. Ces dernières mesures sont largement utilisées pour établir une comparaison avec les normes d'exposition sanitaires ou réglementaires.

2.3.1 Mesures en temps réel

2.3.1.1 Instrumentation

Les compteurs de noyaux de condensation (CNC), tel qu'un P-Trak® ou un CPC 3700 (TSI Inc.), peuvent être utilisés pour évaluer les concentrations numériques de particules (nombre de particules/cm³). Plusieurs publications rapportent l'utilisation des CNC en milieu de travail et dans l'environnement extérieur (Brouwer, Gijssbers et Lurvink, 2004; Cattaneo, Garramone, Taronna, Peruzzo et Cavallo, 2009; Cena et Peters, 2011; Debia, Neesham-Grenon, Mudaheranwa et Ragetti, 2016; Debia, Trachy-Bourget, *et al.*, 2017; Dewalle, Vendel, Weulersse, Hervé et Decobert, 2010; Handy, Jackson, Robinson et Lafreniere, 2006; Schmolli, Peters et O'Shaughnessy, 2010; Szymczak, Menzel et Keck, 2007).

Les photomètres laser à diffusion de lumière, tel qu'un DustTrak™ (TSI Inc.), sont utilisés pour estimer des concentrations massiques de différentes fractions granulométriques d'aérosols prédéfinies (c.-à-d. pour différentes classes de tailles des particules). Ils sont largement utilisés pour la mesure de poussières dans l'environnement extérieur ou dans divers environnements intérieurs, tels que les bureaux et les industries (Bello *et al.*, 2009; Bello *et al.*, 2010; Debia *et*

al., 2016; Debia, Trachy-Bourget, *et al.*, 2017; Debia, Weichenthal et Dufresne, 2014; Evans, Ku, Birch et Dunn, 2010; Raynor *et al.*, 2012).

Plus grands et plus coûteux que les instruments de mesure précédemment mentionnés, des spectromètres de mesure du diamètre de mobilité électrique (SMPS : *Scanning Mobility Particle Sizer* ou FMPS : *Fast Mobility Particle Sizer*) ou de mesure du diamètre aérodynamique (impacteur électrique à basse pression, ELPI : *Electrical Low Pressure Impactor*) ont aussi été utilisés dans des études de caractérisation (Bello *et al.*, 2009; Bello *et al.*, 2010; Brouwer *et al.*, 2012; Dahm, Yencken et Schubauer-Berigan, 2011; Debia, Beaudry, Weichenthal, Tardif et Dufresne, 2012b; Koivisto, 2010; Kuhlbusch, Neumann et Fissan, 2004). Ces appareils mesurent à la fois les concentrations numérique et massique selon différentes classes de tailles des particules. La distribution granulométrique de l'aérosol est d'ailleurs un paramètre essentiel pour la caractérisation du risque des NP pour la santé, considérant que, lors de l'inhalation, le site de dépôt dans les voies respiratoires est fortement lié à la taille (Ostiguy, Debia, Roberge et Dufresne, 2014).

2.3.1.2 Niveaux d'exposition

Viitanen *et al.* ont effectué une revue de la littérature afin de documenter les niveaux d'exposition professionnelle des travailleurs aux PNNI (Viitanen, Uuksulainen, Koivisto, Hameri et Kauppinen, 2017). Les auteurs rapportent 72 études qui ont mesuré spécifiquement les expositions professionnelles des travailleurs en fournissant des concentrations numériques de particules (nombre de particules/cm³) à l'aide d'ILD. Ces publications couvrent 314 situations d'exposition professionnelle incluant les travaux d'asphaltage/bitumes, l'usinage, l'industrie du métal, la peinture et le recouvrement, les centrales électriques, le transport et les émanations de moteurs diesels, le soudage, les travaux de bureau, la restauration et fumées de cuisson ainsi que les services. Les auteurs rapportent que les concentrations les plus élevées ont été trouvées lors des activités de soudage et autres activités liées à l'industrie du métal, avec des concentrations qui dépassaient de plus de 100 fois les niveaux moyens de bruit de fond, soit plus de 1 000 000 particules/cm³.

Debia *et al.* ont décrit les concentrations de PNNI émises durant différentes activités de soudage. Des concentrations moyennes journalières variant de 50 000 à 150 000 particules/cm³ ont été rapportées, avec des pics de concentration atteignant le plafond de l'instrument de mesure, à savoir 500 000 particules/cm³ (Debia *et al.*, 2014). Des concentrations de plus de 100 000 particules/cm³ ont également été mesurées dans une usine de production et de pastillage de noir de carbone (Kuhlbusch et Fissan, 2006). Jarvela *et al.* ont évalué les émissions de PNNI lors de la production d'acier inoxydable et de ferrochrome. Les auteurs ont mesuré des concentrations allant de 58 000 à 662 000 particules/cm³ (Järvelä *et al.*, 2016). Freund *et al.* ont estimé des pics de concentration de 467 000 particules/cm³ durant des activités de pavage (Freund, Zuckerman, Baum et Milek, 2012).

Jorgensen *et al.* ont utilisé un FMPS pour évaluer la concentration numérique et la distribution granulométrique des particules pendant des travaux dans un tunnel. Dans ce contexte, les auteurs ont rapporté des moyennes géométriques de 240 000 particules/cm³ à 3 000 000 particules/cm³ lors des différentes activités de soudage. Les diamètres de mobilité à la concentration maximale de particules étaient de 10,8 nm pendant le soudage et de 60,4 nm pendant le travail de finition (Jorgensen, Buhagen et Foreland, 2016).

Les concentrations numériques de PNNI générées par les moteurs diesels ont aussi été évaluées dans plusieurs contextes d'expositions professionnelles incluant : les installations portuaires (concentration journalière moyenne de 36 000 particules/cm³ et journalière maximale de 67 000 particules/cm³), des stationnements d'autobus scolaires (concentration moyenne de 116 000 particules/cm³ et pic de concentration de 186 000 particules/cm³), et dans des trains à moteur diesel (concentration moyenne de 126 000 particules/cm³ et pic de concentration de 693 000 particules/cm³) (Bujak-Pietrek, Mikolajczyk, Kaminska, Cieslak et Szadkowska-Stanczyk, 2016; Debia *et al.*, 2016; Jeong, Traub et Evans, 2017).

Des mesures des concentrations massiques à l'aide d'ILD pour différentes fractions d'aérosols ont également été effectuées. Des concentrations variant de 22 à 483 µg/m³ de particules fines inférieures à 1 µm, aussi appelées particules sous-microniques PM₁, ont été rapportées dans une usine de production et de pastillage de noir de carbone (Kuhlbusch et Fissan, 2006). Une concentration moyenne géométrique de PM_{2,5} de 300 µg/m³ a été mesurée dans une école d'apprentis soudeurs et dans une centrale électrique (Kim, Magari, Herrick, Smith et Christiani, 2004). Les concentrations massiques particulières des émissions des moteurs diesels ont également été rapportées dans les divers milieux précédemment évoqués. Dans les installations portuaires, des concentrations journalières moyennes de 40,4 µg/m³ et de 37,7 µg/m³ ont été mesurées respectivement pour les fractions respirables et les fractions PM₁ (Debia *et al.*, 2016). Dans un stationnement d'autobus scolaires, des concentrations journalières moyennes variant de 25 à 45 µg/m³ ont aussi été rapportées (Debia, Trachy-Bourget, *et al.*, 2017).

2.3.2 Mesures intégrées

2.3.2.1 Instrumentation

L'exposition des travailleurs aux PNNI est également évaluée à partir de différents types de prélèvements qui seront analysés subséquemment en laboratoire. Ces mesures sont notamment utilisées pour évaluer la conformité des expositions aux normes réglementaires ou pour établir des comparaisons avec des recommandations sanitaires. Parmi les analyses envisageables, on compte notamment les mesures gravimétriques pour les poussières et fumées, le dosage par spectrométrie de masse à plasma à couplage inductif (ICP-MS) pour les fumées métalliques et l'analyse thermo-optique spécifique du carbone élémentaire (CE) et du carbone total (CT) pour les ÉMD (CT = CE + carbone organique (CO)).

Les mesures intégrées peuvent nécessiter différents sélecteurs granulométriques comme des cyclones pour prélever les fractions respirables et des impacteurs pour sélectionner les particules plus petites dites sous-microniques (PM₁). Par exemple, les méthodes pour évaluer les expositions aux ÉMD incluent la mesure des fractions respirables ou des fractions PM₁ de CE et de CT (NIOSH, 2003).

D'autres sélecteurs ont aussi été développés pour échantillonner spécifiquement la fraction de particules nanométriques déposées dans les voies respiratoires, le *nanoparticle respiratory deposition sampler* (NRD). Cena *et al.* ont testé cet instrument pour évaluer les expositions au Cr, au Ni et au Mn de soudeurs en comparaison aux mesures classiques utilisant une cassette 37 mm (Cena, Chisholm, Keane et Chen, 2015). Les auteurs concluent que la grande majorité du Cr et plus de la moitié du Ni et du Mn sont des fumées de moins de 300 nm de diamètre

aérodynamique. Les auteurs proposent que le prélèvement de ces fractions fine et ultrafine qui se déposeraient dans les voies respiratoires puisse être utilisé dans de futurs travaux pour établir des liens avec des mesures d'effets sur la santé.

2.3.2.2 Niveaux d'exposition

Le lecteur intéressé à obtenir de plus amples informations quantitatives sur l'exposition des travailleurs aux différents contaminants caractérisés par une fraction ultrafine dominante peut se rapporter à des documents synthèses ou à des articles scientifiques. Citons, par exemple, le document du Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) pour les expositions aux émanations de moteur diesel (ÉMD) (International Agency for Research on Cancer, 2014). Ce document rend compte des niveaux d'exposition au CE mesurés dans de nombreux milieux de travail. Ces milieux incluent, entre autres, l'industrie minière pour laquelle des concentrations variant de 148 à 637 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et de 3,5 à 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ont été rapportées pour des travaux effectués respectivement en milieu souterrain et en surface. D'autres documents scientifiques permettent aussi de documenter des niveaux d'exposition à des fumées de soudage. Hoffmeyer *et al.* indiquent, par exemple, que les soudeurs utilisant le procédé FCAW sont exposés à des concentrations respirables de fumées de soudage significativement plus élevées que ceux utilisant le procédé GMAW, avec des concentrations médianes respectivement de 7,14 mg/m^3 et de 3,05 mg/m^3 (Hoffmeyer *et al.*, 2012).

2.3.3 Analyses en microscopie

La caractérisation par microscopie électronique en transmission (MET) ou à balayage (MEB), suivie d'une analyse par spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie (EDS), est aussi réalisée à partir de prélèvements sur supports (grilles, filtres) pour caractériser les PN (Debia, L'Espérance, *et al.*, 2017; Kouassi *et al.*, 2017). Plusieurs travaux de caractérisation par microscopie électronique ont été réalisés antérieurement par des membres de la présente équipe de recherche. Le [rapport IRSST R-952](#) présente une revue des méthodes disponibles pour le prélèvement et l'analyse des particules par microscopie électronique (Debia, L'Espérance, *et al.*, 2017).

2.3.4 Paradigme métrologique et stratégie d'évaluation

Définir, aujourd'hui, l'indicateur d'exposition aux PN le plus approprié reste un défi du fait des particularités de ces particules et des incertitudes qui demeurent quant aux paramètres les plus déterminants des effets toxiques. Comme décrit précédemment, deux métriques dominent les mesures d'évaluation des expositions professionnelles aux PN : la mesure numérique (nombre de particules/ cm^3) et la mesure massique (mg/m^3).

Debia *et al.* ont démontré, lors d'une étude-terrain, que la métrique numérique décrivait bien les différences saisonnières et spatiales en termes de contamination aux ÉMD (Debia *et al.*, 2016). Lors d'une seconde étude, il a été démontré que les concentrations numériques étaient aussi mieux corrélées aux différents déterminants de l'exposition que ne l'étaient les concentrations massiques portant sur le même contaminant (Debia, Trachy-Bourget, *et al.*, 2017). Les concentrations massiques sont toutefois largement utilisées et la plupart des réglementations et recommandations émises sont exprimées dans cette métrique. Les ILD, qui estiment des concentrations massiques, sont ainsi largement utilisés en hygiène du travail. Kim *et al.* ont

évalué la qualité de prédiction des photomètres laser (DustTrak™, TSI Inc.) en effectuant des mesures parallèles en gravimétrie. Les auteurs concluent que ces instruments prédisent bien les mesures gravimétriques, mais que des facteurs de correction peuvent être nécessaires en fonction du type de contaminant évalué (Kim *et al.*, 2004).

Viitanen *et al.* indiquaient également que des lacunes existent en matière d'évaluation des expositions aux PNNI et que les données actuelles ne permettent pas de créer des matrices emploi-exposition spécifiques aux expositions aux PNNI du fait de plusieurs limites en lien avec la représentativité des mesures et le fonctionnement différent des divers ILD utilisés (Viitanen *et al.*, 2017).

Ainsi, il reste encore beaucoup d'incertitudes dans l'interprétation des données d'exposition; de nouvelles études sont nécessaires pour obtenir plus de précision. Au regard de tout ce qui précède et dans la suite logique des travaux engagés sur le thème d'intérêt, cette recherche veut combler certaines lacunes existantes (peu de données exploitables sur les expositions aux PNNI, milieux de travail encore insuffisamment étudiés), tout en prenant en compte, dans sa mise en œuvre, les derniers développements relatifs à l'expologie, et notamment à la métrologie des PN (comparaison des divers indicateurs, volonté de standardisation des stratégies). Cette activité de recherche fournit donc des données nouvelles pour mieux cerner les risques sanitaires attribuables aux PNNI au travers la mise en place critique d'une démarche d'intervention originale et innovante.

3. OBJECTIFS DE RECHERCHE

L'activité de recherche vise à évaluer diverses situations d'expositions potentielles aux PNNI dans six milieux de travail québécois. Il s'agit de caractériser et d'étudier, sur les plans qualitatif et quantitatif, les aérosols auxquels sont potentiellement exposés les travailleurs, à travers la mise en œuvre d'une stratégie d'intervention innovante combinant différents indicateurs d'exposition.

Plus spécifiquement, il s'agit de :

- dresser le portrait le plus complet possible des concentrations de PNNI en mesurant plusieurs indicateurs;
- caractériser la morphologie et la composition chimique des PNNI par microscopie électronique;
- évaluer la stratégie d'évaluation mise en œuvre.

4. MÉTHODOLOGIE

Un même plan d'intervention, consistant en une combinaison de mesures en temps réel et de mesures intégrées, a été répété à six reprises dans six différents milieux de travail avec deux sites d'échantillonnage simultanés.

4.1 Milieux d'étude

Les six milieux évalués sont des environnements dans lesquels il existe de fortes probabilités de trouver des PNNI. Ces milieux ont été choisis en fonction de données déjà générées par l'équipe de recherche et par des données issues de la littérature scientifique. Trois de ces milieux sont concernés par la présence d'équipements fonctionnant avec des moteurs diesels : il s'agit d'une mine d'or souterraine (M1), d'un milieu souterrain avec la présence de locomotives à moteur diesel et de moteurs auxiliaires fonctionnant aussi au diesel (M2) et d'un atelier mécanique de réparation et d'entretien de camions (M3). Les trois autres milieux sont des sections différentes d'une même entreprise où l'on trouve une fonderie d'acier inoxydable (M4), un atelier d'usinage avec des activités de soudage avec électrode de tungstène (TIG), de meulage et de coupage (M5), ainsi qu'un atelier de moulage à la cire de paraffine (M6). Dans les milieux M4 et M5, des fumées et poussières métalliques sont détectées alors que dans le milieu M6, des fumées de cire de paraffine sont présentes. Le Tableau 1 résume la description des six milieux.

Tableau 1. Milieux d'étude et principales PNNI évaluées

Milieu	Description	PNNI évaluée
M1	Mine d'or souterraine	Émanations de moteur diesel
M2	Milieu souterrain avec présence de moteurs diesels	Émanations de moteur diesel
M3	Atelier mécanique de camions	Émanations de moteur diesel
M4	Fonderie d'acier	Fumées et poussières métalliques
M5	Atelier d'usinage (soudage TIG, meulage, coupage)	Fumées et poussières métalliques
M6	Atelier de moulage à la cire de paraffine	Fumées de cire de paraffine

4.2 Dispositifs de mesure

Les dispositifs de mesure ont été installés dans deux valises portatives. Les valises ont été spécialement conçues pour les besoins du projet de recherche. La Figure 1 illustre un exemple de montage. Chaque valise était appareillée de façon identique, mais certains ajustements ont été effectués en fonction du type de contaminants et du milieu. Il y avait :

- i. un ensemble d'ILD pour l'enregistrement d'une large gamme de paramètres en temps réel tout au long de l'activité;

- ii. des trains d'échantillonnage pour des analyses subséquentes de différents supports permettant les mesures intégrées des concentrations massiques d'aérosols selon différentes fractions.

En parallèle, des prélèvements sur grille de microscopie pour l'analyse subséquente de la morphologie des particules et la caractérisation chimique élémentaire ont été effectués.



Figure 1. Dispositif de mesures environnementales.

4.2.1 Mesures en temps réel

Le Tableau 2 dresse l'inventaire des instruments à lecture directe utilisés au cours de ce projet, ainsi que les caractéristiques de chacun et les paramètres mesurés. À l'exception du spectromètre de diamètre de mobilité électrique (EEPS), représenté à la Figure 2, ces instruments étaient disposés dans les valises précédemment décrites et les têtes d'échantillonnage étaient maintenues en hauteur à l'extérieur de la valise à l'aide de tiges d'aluminium (Figure 1).

Les CNC (P-Trak® 8525, TSI Inc.) et les photomètres laser (DustTrak™ DRX et DustTrak™ 8520, TSI Inc.) ont été utilisés lors de chacune des interventions. Ces instruments permettent de mesurer les concentrations numériques de particules fines et ultrafines (particules/cm³), ainsi que les concentrations massiques (mg/m³) de particules pour différentes fractions (PM₁, PM_{2,5}, PM_{Resp}, PM₁₀ et PM_{tot}). L'instrument Airtec utilise une méthode de transmission de la lumière pour obtenir des mesures équivalentes de CE et ce type d'instrument a été utilisé dans les milieux où des évaluations des ÉMD ont été effectuées (M1, M2 et M3). Les Airtec étaient connectés avec des cyclones en série et des impacteurs pour mesurer spécifiquement les fractions sous-microniques de carbone élémentaire (CE₁). Dans ces mêmes milieux, les DustTrak™ 8520 étaient connectés avec des cyclones en nylon pour mesurer spécifiquement les fractions respirables (PM_{Resp}), avec la pompe de l'instrument ajustée à un débit de 1,7 L/min.

Dans les milieux M4, M5 et M6, les DustTrak™ 8520 étaient équipés d'un impacteur 10 µm. L'EEPS a été utilisé ponctuellement dans les milieux M3, M4, M5 et M6 (à noter que le transport de cet instrument n'était pas possible dans les milieux M1 et M2).

L'instrumentation a fait l'objet d'un entretien régulier et a été étalonnée, conformément aux bonnes pratiques en hygiène du travail, pour les fins de cette investigation. Les appareils ont été configurés pour enregistrer les mesures toutes les 10 secondes durant leur fonctionnement.

Tableau 2. Instruments à lecture directe (ILD)

Modèle	Paramètre mesuré (unité de concentration)	Type d'instrument	Taille des particules mesurées (en nm)
P-Trak® 8525 (TSI Inc.)	Concentration numérique (particules/cm ³)	Compteur de noyaux de condensation (CNC)	20 – 1000
DustTrak™ DRX 8533 (TSI Inc.)	Concentration massique (mg/m ³) pour 4 fractions granulométriques (PM ₁ , PM _{2,5} , PM _{resp} , et PM ₁₀)	Photomètre laser	100 – 15 000
DustTrak™ 8520	Concentration massique (mg/m ³)	Photomètre laser	100 – 15 000
Airtec (FLIR)	Concentration massique de CE (mg/m ³)	Transmission de la lumière	< 1000
EEPS 3090 (TSI Inc.)	Concentration numérique (particules/cm ³) pour 32 fractions granulométriques	Spectromètre de diamètre de mobilité électrique	56 – 560



Figure 2. Spectromètre de diamètre de mobilité électrique (EEPS).

4.2.2 Mesures intégrées

Des mesures gravimétriques et des mesures spécifiques ont été effectuées dans les six milieux. Les pompes d'échantillonnage étaient placées à l'intérieur de chacune des valises et les milieux de collecte étaient maintenus en hauteur à l'extérieur de la valise à l'aide de tiges d'aluminium (Figure 1).

Le Tableau 3 rapporte les divers paramètres mesurés de façon intégrée dans les différents milieux. L'étalonnage des pompes utilisées pour aspirer l'air à travers les supports d'analyse a été systématiquement effectué avant et après chaque échantillonnage. Ces échantillonnages intégrés ont été réalisés simultanément et durant les mêmes temps que les enregistrements des mesures avec les ILD.

Les analyses subséquentes des supports ont toutes été prises en charge par le laboratoire de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST). Les niveaux de CT et de CE ont été mesurés suivant la méthode [IRSST 388](#), équivalente à la méthode NIOSH 5040 (version 3, 2003) du National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Les poussières respirables (P_R) et les poussières combustibles respirables (PC_R) ont été analysées par gravimétrie, suivant la méthode [IRSST 384](#). Les concentrations de métaux (aluminium, cadmium, chrome, cobalt, cuivre, fer, magnésium, manganèse, nickel, plomb, vanadium et zinc) ont été dosées par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS) selon la méthode [IRSST 362](#). La détermination des fumées de cire de paraffine (C_{18} - C_{36}) a aussi été confiée à l'IRSST, mais les analyses ont été réalisées par le laboratoire SGS Galson (East Syracuse, NY), selon une méthode adaptée d'OSHA PV2047.

Tableau 3. Analyses sur supports effectuées lors de chaque visite dans les six milieux

	Paramètre mesuré	Dispositif d'échantillonnage
M1, M2 et M3	Fractions respirables de carbone élémentaire (CE_R), de carbone organique (CO_R) et de carbone total (CT_R)	Pompe Gilair (1,7 L/min) avec cassette fermée 37 mm avec filtre en fibre de quartz, munie d'un cyclone Dorr-Oliver
	Fractions PM1 de carbone élémentaire (CE_1), de carbone organique (CO_1) et de carbone total (CT_1)	Même montage avec l'ajout d'un impacteur
	Fractions respirables des poussières (P_R) et des poussières combustibles (PC_R)	Pompe Gilair (1,7 L/min) avec cassette fermée 37 mm avec filtre en fibre de quartz, munie d'un cyclone Dorr-Oliver
M4, M5	Poussières totales et inhalables, et dosage des métaux (gravimétrie et ICP-MS) Masses des particules et des métaux impactées sur filtres : 50 % diamètre de coupure : 2,5 μ m, 1,0 μ m, 0,5 μ m et 0,25 μ m	Pompe Gilair (1,5 L/min) avec cassette fermée 37 mm avec filtre en ester de cellulose (ECM) et cassette IOM (SKC Inc.) avec filtre ECM SIOUTAS (SKC) et pompe Leland Legacy (9 L/min), filtres ECM 25 mm et 37 mm
M6	Poussières totales et dosage des C_{18} - C_{36} Masses des particules impactées sur filtres : 50 % diamètre de coupure : 2,5 μ m, 1,0 μ m, 0,5 μ m et 0,25 μ m	Pompe Gilair (1,5 L/min) avec cassette fermée 37 mm avec filtres en fibre de verre SIOUTAS (SKC) et pompe Leland Legacy (9L/min), filtres fibre de verre 25 mm et 37 mm

4.2.3 Analyses en microscopie

Les prélèvements d'aérosols sur grilles de microscopie ont été effectués à l'aide du *Mini Particle Sampler*® (MPS). Cet équipement, développé par l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) en France, permet de prélever des particules sur des grilles de

microscopie poreuses (R'mili *et al.*, 2013b). Grâce à ce système, les particules ont été collectées directement sur des grilles d'observation de microscopie numérotées. Une pompe Gilair a été utilisée pour le prélèvement à un débit de 0,3 L/min. Trois prélèvements de 1 minute ont été effectués chaque jour d'échantillonnage dans les milieux M1, M4, M5 et M6. Deux prélèvements durant la même journée ont été effectués dans les milieux M2 et M3. Les observations ont par la suite été effectuées par MET en fond clair et les caractérisations ont été réalisées grâce à une analyse par EDS.

Une première observation générale de la grille a été effectuée pour regarder l'homogénéité du dépôt et la répartition des particules et agglomérats sur la grille. Par la suite, trois ouvertures ont été choisies afin d'y réaliser des observations à plus fort grossissement. Une image avec un grossissement de 50X, montrant l'emplacement des ouvertures choisies et de leur environnement, a été systématiquement enregistrée (Figure 3). Des images à plus fort grossissement ont par la suite été captées pour chaque ouverture choisie afin de voir la répartition des particules dans celles-ci.

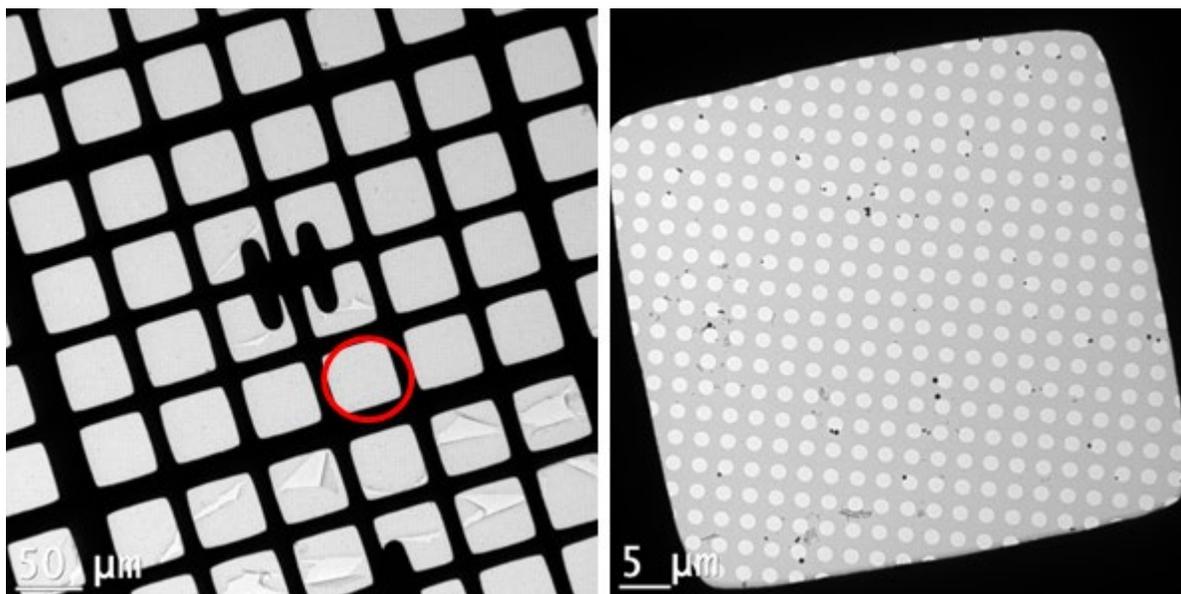


Figure 3. Images MET en fond clair à faible grossissement (50X) d'une grille numérotée (A) et d'une ouverture à plus fort grossissement (400X).

L'analyse des particules a ensuite été effectuée à un grossissement de 5000X à 25 000X. Pour chaque particule ou agglomérat de particules, une image était prise et une analyse par EDS était effectuée (Figure 4). Sept particules par ouverture ont été analysées pour trois ouvertures, soit un total de 21 particules par grille. Les particules ont été sélectionnées aléatoirement par l'opérateur, mais avec le souci d'assurer une bonne représentativité de la diversité des particules trouvées sur la grille lors du balayage initial. Pour chaque image, l'état de la particule (seule ou agglomérée), sa taille et les éléments présents ont été consignés.

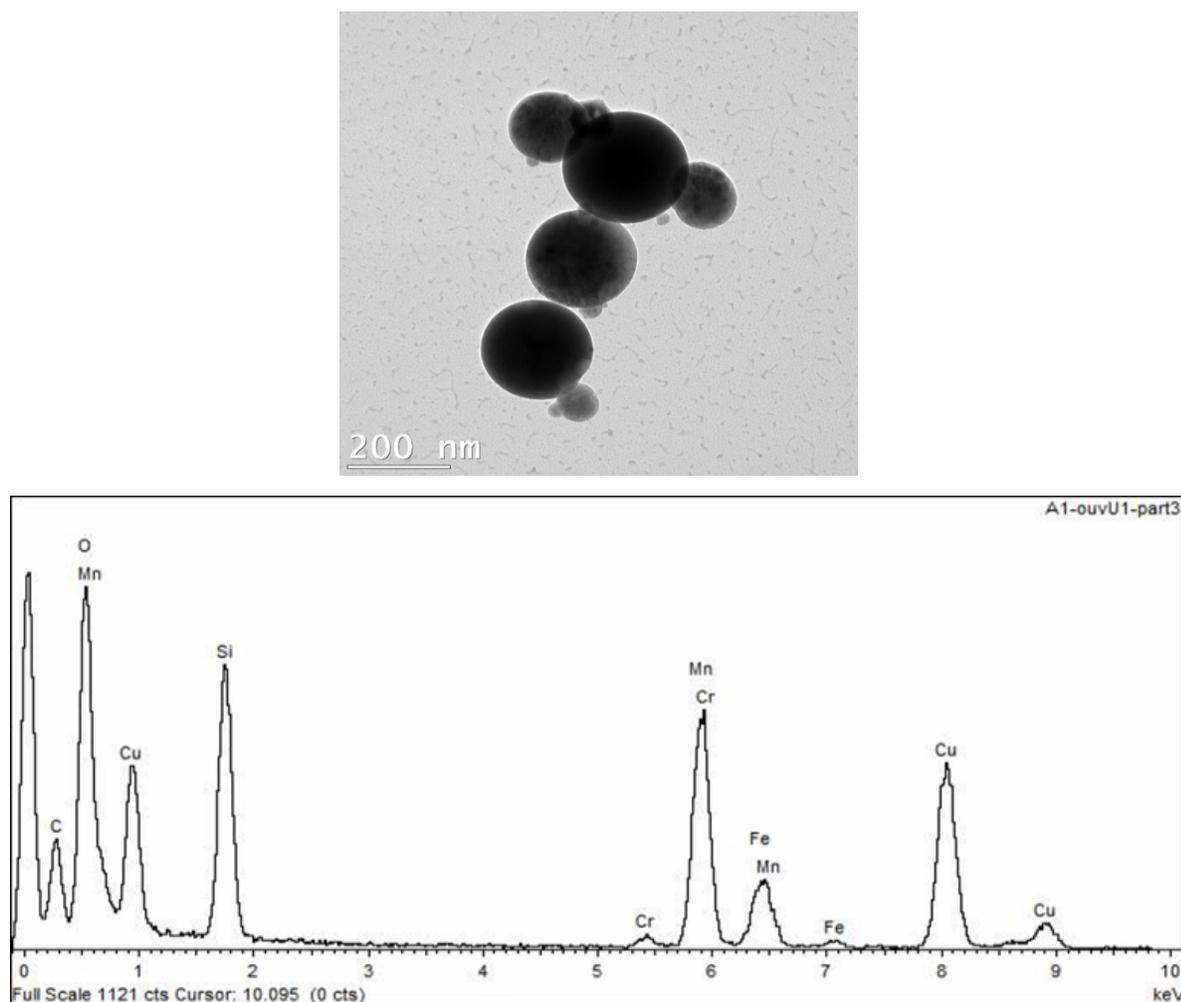


Figure 4. Image MET en fond clair à fort grossissement d'un agglomérat de particules et spectre EDS correspondant.

4.3 Analyses des données

La moyenne géométrique (MG), l'écart-type géométrique (ETG) ainsi que les maxima (MAX) et minima (MIN) des concentrations journalières ont été utilisés pour décrire les distributions des concentrations dans les six milieux. Les valeurs non détectées ont été traitées en divisant la limite de quantification par la racine carrée de 2. Des représentations graphiques des distributions sous forme de boîtes à moustache ont été réalisées. La valeur centrale des boîtes représente la médiane, les bords inférieurs et supérieurs sont les 1^{er} et 3^e quartiles respectivement et les extrémités des moustaches représentent les valeurs maximales et minimales ou 1,5 fois l'espace interquartile (entre le 1^{er} et 3^e quartile). Les valeurs situées à l'extérieur de la zone 1,5 fois l'espace interquartile sont représentées par des points.

Les calculs de diamètre aérodynamique massique médian (DAMM) ont été effectués pour les mesures réalisées avec les impacteurs SIOUTAS en considérant que la distribution des masses suit une loi lognormale comme décrit par Hinds (Hinds, 1998).

Pour évaluer la relation monotone entre les paramètres, des coefficients de corrélation de Spearman ont été calculés. Pour évaluer les relations entre certains paramètres, des analyses de régression linéaire ont été utilisées. Des comparaisons des concentrations entre les saisons ont été effectuées par le test *t* de Student avec les concentrations log transformées.

Le niveau de signification pour les analyses statistiques a été fixé à 5 %. La plupart des analyses statistiques et graphiques ont été effectuées à l'aide du logiciel R (version 3.4.2, R Development Core Team, Vienne, Autriche).

5. RÉSULTATS

5.1 Mesures en temps réel

5.1.1 Concentrations numériques

5.1.1.1 Compteurs de noyaux de condensation (P-Trak®)

Les moyennes géométriques, écarts-types géométriques, minima et maxima des concentrations numériques journalières mesurées à l'aide du P-Trak® dans chacun des six milieux visités sont présentés dans le Tableau 4. La Figure 5 montre les distributions des concentrations numériques journalières mesurées avec le P-Trak® dans les 6 milieux. Les concentrations numériques variaient considérablement avec des moyennes journalières allant de 12 900 à 228 600 particules/cm³. Les trois milieux où les concentrations les plus élevées ont été mesurées étaient, par ordre décroissant, la mine souterraine (M1), la fonderie (M4) et l'atelier de moulage à la cire (M6), avec des concentrations moyennes respectives de 128 200, 80 400 et 75 500 particules/cm³. Le milieu avec les concentrations les plus faibles était l'atelier mécanique de réparation de camions (M3) avec une concentration journalière moyenne de 22 800 particules/cm³. Le milieu M4 possédait la variabilité la plus élevée (ETG de 2,3) alors que dans le milieu M6 un ETG de 1,2 a été calculé pour les concentrations numériques.

Tableau 4. Statistiques descriptives des concentrations numériques journalières mesurées à l'aide du P-Trak® dans les six milieux

Milieu	n	MG (particules/cm ³)	ETG	Min (particules/cm ³)	Max (particules/cm ³)
M1	11	128 200	1,6	51 200	228 600
M2	10	32 800	1,8	12 900	58 600
M3	12	22 800	1,3	14 700	33 800
M4	12	80 400	2,3	23 700	262 200
M5	12	41 000	1,5	17 000	63 600
M6	12	75 500	1,2	50 600	105 700

n : nombre de moyennes journalières; MG : moyenne géométrique; ETG : écart-type géométrique; MIN : minimum; MAX : maximum

La Figure 6 présente les distributions des concentrations numériques instantanées (moyennées sur une minute), mesurées avec le P-Trak® dans chacun des six milieux. On constate que dans les milieux M1, M2, M3, M4 et M5, des concentrations de près de 500 000 particules/cm³ ont été estimées, soit la mesure maximale que peut effectuer l'instrument. Dans le milieu M6, des niveaux relativement élevés, de l'ordre de 75 000 particules/cm³, ont été mesurés, mais une certaine homogénéité des concentrations a été notée et aucune d'entre elles ne dépassait 350 000 particules/cm³.

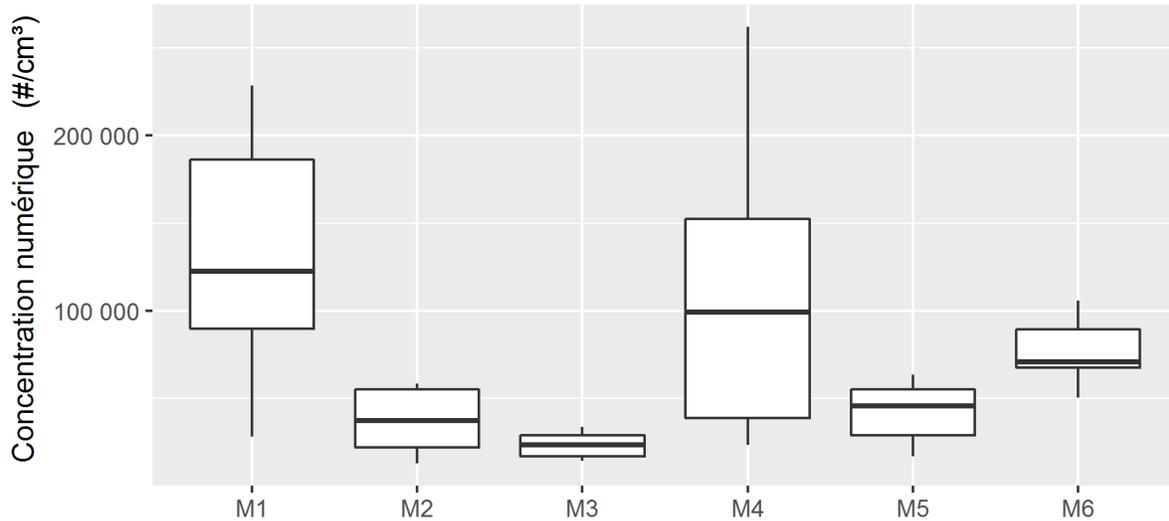


Figure 5. Distribution des concentrations numériques journalières (particules/cm³) mesurées à l'aide du P-Trak® dans les six milieux.

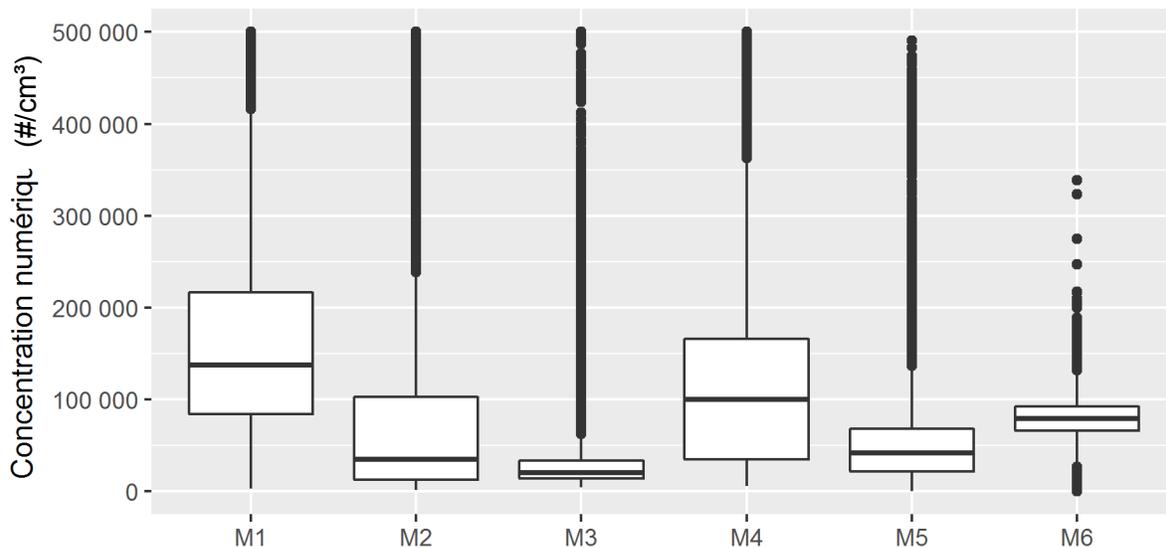


Figure 6. Distribution des concentrations numériques instantanées (moyennées sur une minute) (particules/cm³) mesurées à l'aide du P-Trak® dans les six milieux.

La Figure 7 illustre par un exemple pour chaque milieu le type de profils de concentration observés à l'aide des mesures du P-Trak®. De manière générale, la présence de nombreux pics de concentration de particules et des niveaux relativement élevés sont notés durant l'ensemble de la période d'échantillonnage pour M1 et M6. Dans plusieurs milieux, lors des arrêts des opérations (illustrés par des flèches bleues), une diminution de l'émission de particules est facilement observée. Ainsi, dans le milieu M5, lors de l'arrêt des activités d'usinage, la ventilation générale permet une diminution rapide des concentrations numériques.

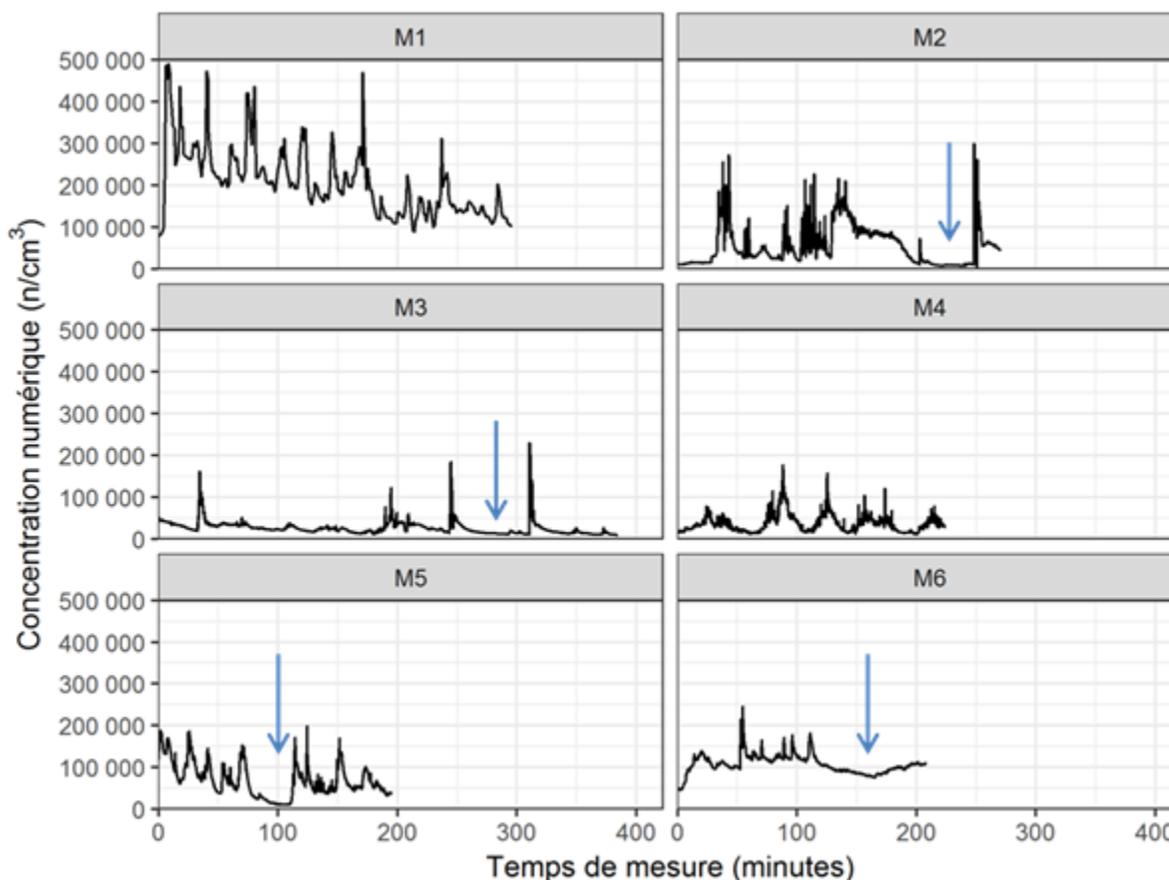


Figure 7. Exemples typiques de profils journaliers des concentrations numériques (particules/cm³) mesurées à l’aide du P-Trak® dans les six milieux.

5.1.1.2 EEPS

Les moyennes géométriques, écarts-types géométriques, minima et maxima des concentrations numériques mesurées avec l’EEPS sont présentés dans le Tableau 5 (à noter que le transport de l’instrument n’était pas possible dans les milieux M1 et M2). Les milieux M4 et M6 présentent des niveaux plus élevés que les milieux M3 et M5, conformément à ce qui avait été observé avec le P-Trak®.

La Figure 8 compare les concentrations numériques de particules mesurées avec les P-Trak® et l’EEPS lors de la même journée d’échantillonnage. Une bonne concordance est observée entre les données des deux instruments, toutefois les CNC (P-Trak®) semblent sous-estimer les concentrations par rapport à celles mesurées avec l’EEPS, surtout dans les milieux M4 et M6 où de plus fortes contaminations ont été observées.

Tableau 5. Statistiques descriptives des concentrations numériques instantanées mesurées à l'aide de l'EEPS dans les milieux M3 à M6

Milieu	MG (particules/cm ³)	ETG	Min (particules/cm ³)	Max (particules/cm ³)
M3	30 000	1,71	10 300	217 000
M4	222 000	1,39	29 700	392 000
M5	60 100	1,58	33 500	305 000
M6	204 000	1,15	157 000	458 000

MG : moyenne géométrique; ETG : écart-type géométrique;
MIN : minimum; MAX : maximum

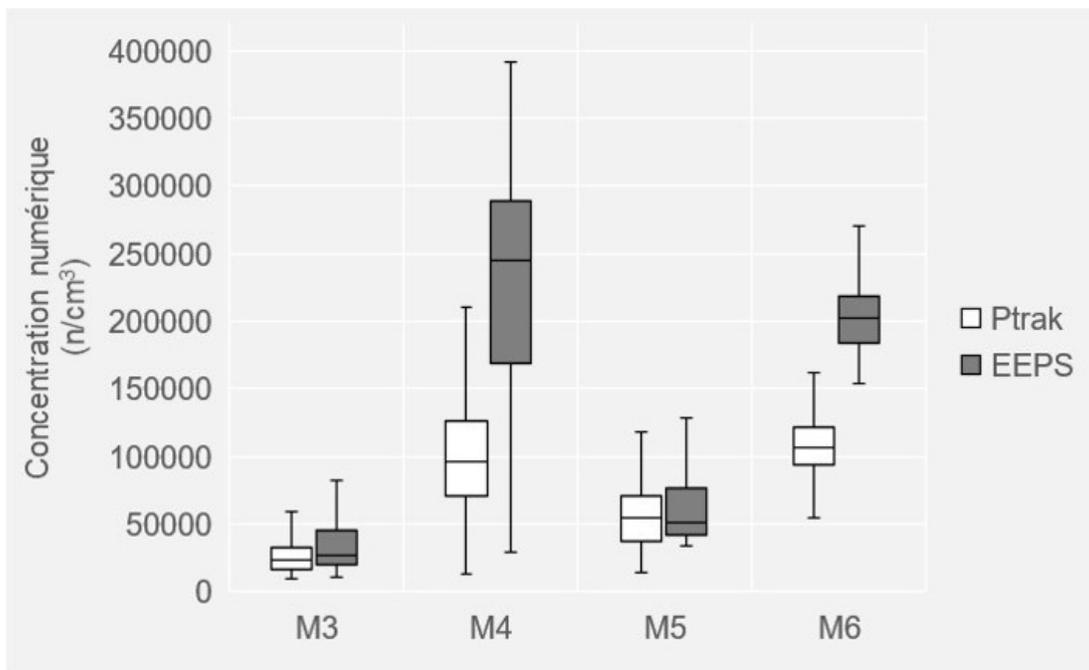


Figure 8. Comparaison des distributions des concentrations numériques (particules/cm³) mesurées avec le P-Trak® et l'EEPS.

5.1.2 Distributions granulométriques des concentrations numériques (M3 à M6)

La Figure 9 présente les distributions granulométriques des concentrations numériques de particules comptabilisées avec l'EEPS dans les milieux M3 à M6. Pour M3, les deux modes observés correspondaient à des diamètres de mobilité électrique de 22,1 nm et de 107,5 nm. Pour M4 et M5, les modes principaux sont respectivement de 9,31 nm et 10,8 nm tandis que le mode principal estimé pour M6 est de 60,4 nm.

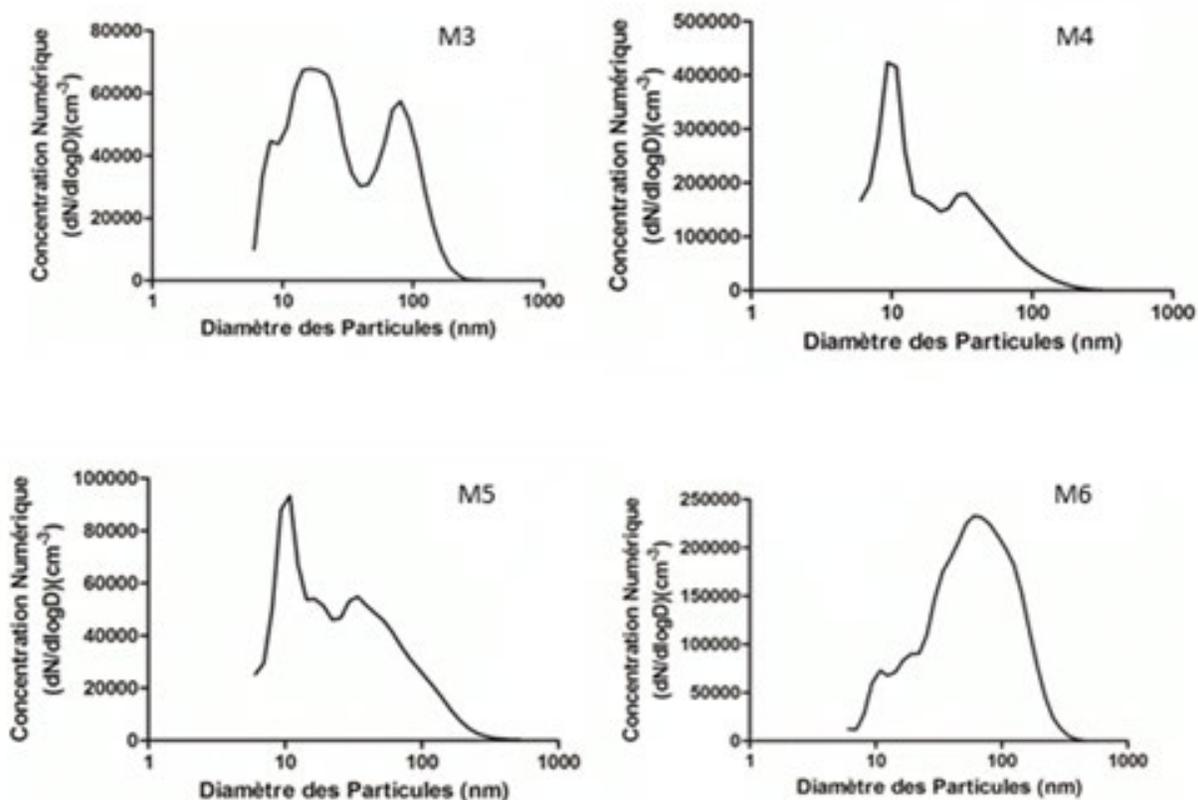


Figure 9. Distributions granulométriques moyennes des concentrations numériques de particules mesurées avec l'EEPS dans les milieux M3 à M6.

La Figure 10 présente la distribution granulométrique mesurée dans le milieu M3 avec l'EEPS lors du pic de concentration le plus important. Ce pic (le mode principal est alors à 60,4 nm) est associé spécifiquement à l'entrée d'un camion à côté de l'instrument.

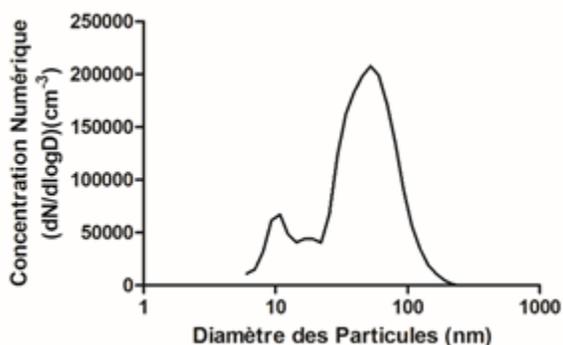


Figure 10. Distribution granulométrique des concentrations numériques de particules mesurées avec l'EEPS lors du principal pic de concentration dans le milieu M3.

5.1.3 Concentrations massiques

Les moyennes géométriques, écarts-types géométriques, minima et maxima des concentrations massiques journalières mesurées dans chaque milieu avec le DustTrak™ 8520 et le DustTrak™ DRX sont présentés respectivement dans le Tableau 6 et le Tableau 7.

Tableau 6. Statistiques descriptives des concentrations massiques journalières mesurées avec les DustTrak™ 8520 dans les six milieux

Milieu	n	MG (mg/m ³)	ETG	Min (mg/m ³)	Max (mg/m ³)
M1 *	12	0,59	2,34	0,19	2,22
M2 *	12	0,05	1,93	0,02	0,15
M3 *	12	0,02	1,76	0,01	0,07
M4 **	12	0,16	2,09	0,04	0,42
M5 **	12	0,15	1,52	0,08	0,29
M6 **	12	1,10	1,39	0,65	1,69

n : nombre de moyennes journalières; MG : moyenne géométrique;

ETG : écart-type géométrique; MIN : minimum; MAX : maximum

* La fraction respirable (PM_{Resp}) a été évaluée pour M1, M2 et M3

** La fraction PM₁₀ a été évaluée pour M4, M5 et M6

Les mesures prises avec les DustTrak™ présentent une large plage de concentrations avec des moyennes journalières allant de :

- 0,01 à 2,22 mg/m³ pour les mesures des fractions PM_{Resp} avec le DustTrak™ 8520 (M1, M2 et M3)
- 0,04 à 1,69 mg/m³ pour les mesures des fractions PM₁₀ avec le DustTrak™ 8520 (M4, M5 et M6)
- 0,01 à 1,78 mg/m³ pour les mesures des fractions PM₁ avec le DustTrak™ DRX
- 0,01 à 1,97 mg/m³ pour les mesures des fractions PM_{2,5} avec le DustTrak™ DRX
- 0,01 à 2,19 mg/m³ pour les mesures des fractions PM_{Resp} avec le DustTrak™ DRX
- 0,01 à 3,22 mg/m³ pour les mesures des fractions PM₁₀ avec le DustTrak™ DRX

Ainsi, les deux milieux caractérisés par les concentrations les plus élevées étaient la mine souterraine (M1) et l'atelier de moulage à la cire (M6) avec des concentrations géométriques moyennes de la fraction PM₁ de 0,50 mg/m³ et de 0,84 mg/m³ respectivement. Le milieu avec les concentrations les plus faibles était le garage mécanique de camions (M3) avec des concentrations géométriques moyennes de la fraction PM₁ de 0,02 mg/m³.

Il convient d'observer que les concentrations journalières maximales mesurées avec les DustTrak™ DRX sont détectées, pour toutes les fractions, dans le milieu M1 (Tableau 7). C'est toutefois dans le milieu M6 que la concentration journalière moyenne la plus élevée a été mesurée avec cet instrument, notamment pour la fraction PM₁ (Figure 11).

Tableau 7. Statistiques descriptives des concentrations massiques journalières (mg/m^3) mesurées avec les DustTrak™ DRX dans les six milieux

Milieu	N	PM ₁			PM _{2,5}	PM _{Resp}			PM ₁₀			PM _T				
		MG (ETG)	MIN	MAX		MG (ETG)	MIN	MAX	MG (ETG)	MIN	MAX	MG (ETG)	MIN	MAX		
M1	11	0,50 (2,1)	0,2	1,78	0,56 (2,1)	0,21	1,97	0,61 (2,1)	0,22	2,19	0,72 (2,3)	0,24	3,22	0,77 (2,3)	0,24	3,48
M2	8	0,06 (1,8)	0,03	0,13	0,07 (1,8)	0,03	0,15	0,07 (1,9)	0,03	0,17	0,08 (1,9)	0,03	0,19	0,09 (1,9)	0,03	0,19
M3	12	0,02 (1,8)	0,01	0,05	0,02 (1,7)	0,01	0,05	0,03 (1,7)	0,01	0,06	0,03 (1,7)	0,01	0,06	0,03 (1,8)	0,01	0,07
M4	12	0,1 (2,1)	0,03	0,27	0,11 (2,1)	0,03	0,3	0,12 (2,1)	0,04	0,33	0,14 (2,1)	0,04	0,37	0,15 (2,1)	0,04	0,38
M5	12	0,08 (1,6)	0,05	0,16	0,09 (1,6)	0,05	0,2	0,11 (1,5)	0,06	0,22	0,13 (1,5)	0,07	0,26	0,14 (1,5)	0,07	0,28
M6	12	0,84 (1,4)	0,51	1,3	1,01 (1,4)	0,61	1,55	1,03 (1,4)	0,63	1,61	1,04 (1,4)	0,65	1,68	1,05 (1,4)	0,66	1,71

N : nombre de moyennes journalières; MG : moyenne géométrique; ETG : écart-type géométrique; MIN : minimum; MAX : maximum

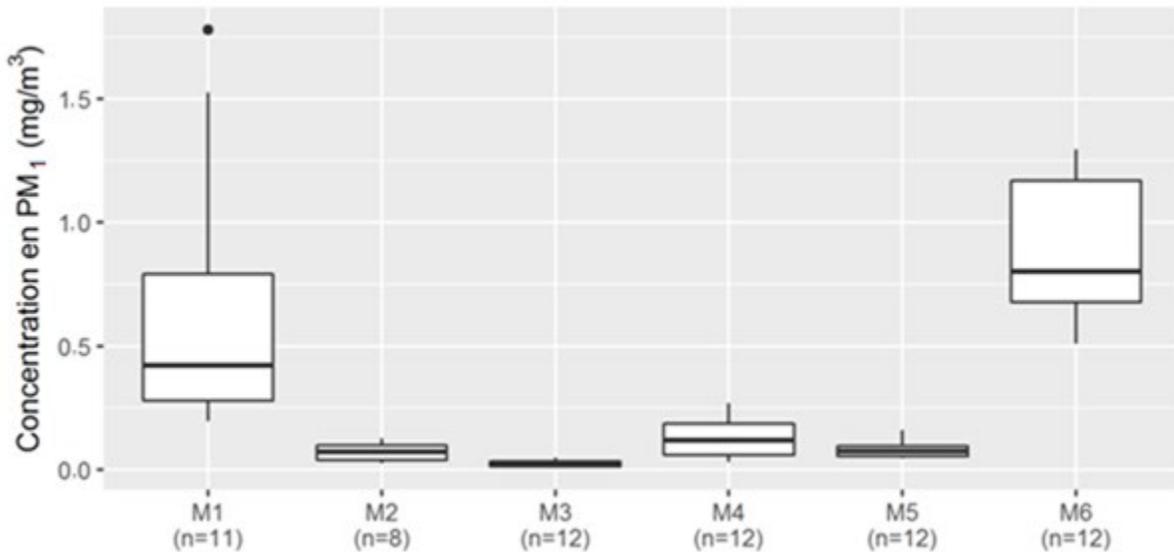


Figure 11. Distribution des concentrations massiques journalières (mg/m^3) mesurées dans la fraction PM_1 à l'aide du DustTrak™ DRX dans les six milieux.

La Figure 12 présente les distributions des concentrations massiques instantanées (moyennées sur une minute), mesurées pour la fraction PM_1 avec le DustTrak™ DRX, dans chacun des six milieux visités. Plusieurs valeurs très élevées ($> 2,5 \text{ mg}/\text{m}^3$) ont été mesurées dans le milieu M1. Comme observé pour les concentrations numériques mesurées avec le P-Trak®, un profil différent de ceux des cinq autres milieux se distingue dans le cas de M6, où l'on retrouve une homogénéité des concentrations (moins grande dispersion des mesures et l'ETG le plus faible parmi tous les milieux pour la fraction PM_1 , à $1,4 \text{ mg}/\text{m}^3$).

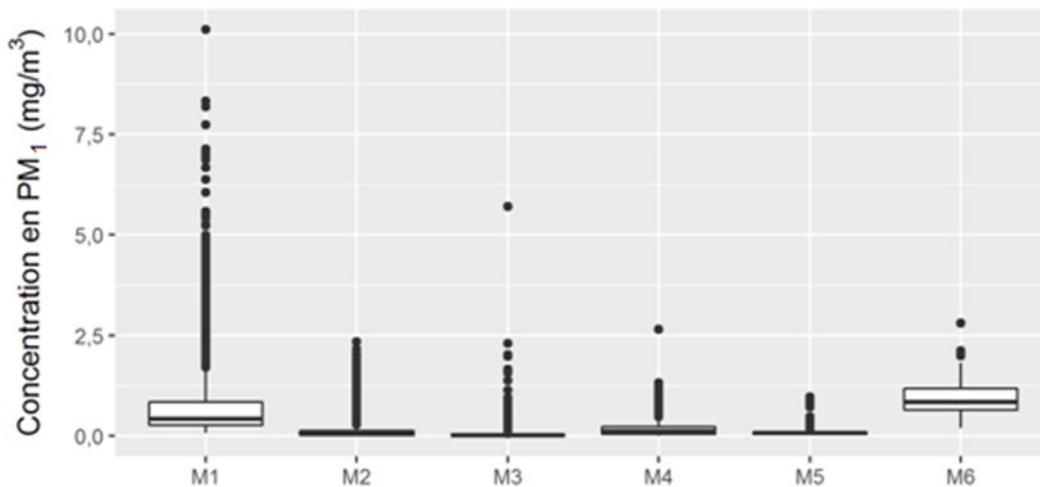


Figure 12. Distribution des concentrations massiques instantanées (moyennées sur une minute) (mg/m^3) mesurées dans la fraction PM_1 à l'aide du DustTrak™ DRX dans les six milieux.

Les lectures faites avec le DustTrak™ DRX permettent d'estimer que les concentrations massiques mesurées dans les fractions PM₁ représentent, en moyenne, 65 % (M1), 67 % (M2), 67 % (M3), 67 % (M4), 57 % (M5) et 80 % (M6) des concentrations massiques mesurées dans les fractions totales.

5.1.4 Concentrations de carbone élémentaire sous-micronique CE₁ (milieux M1, M2 et M3)

Les mesures de CE₁ ont été réalisées à l'aide des Airtec dans les milieux concernés par les ÉMD. Les moyennes géométriques, écarts-types géométriques, minima et maxima des concentrations massiques journalières de CE sont présentés dans le Tableau 8. La Figure 13 rend compte des distributions des concentrations massiques des moyennes journalières de CE₁ dans les trois milieux d'intérêt. Les concentrations varient de 0,004 à 0,148 mg/m³. Le milieu M1 (mine souterraine) se distingue encore une fois avec le niveau de concentration le plus élevé tandis que le milieu M3 (atelier mécanique) présente à nouveau la plus faible contamination.

Tableau 8. Statistiques descriptives des concentrations massiques journalières de CE₁ mesurées avec les Airtec dans les milieux M1 à M3

Milieu	n	MG (mg/m ³)	ETG	Min (mg/m ³)	Max (mg/m ³)
M1	12	0,148	2,0	0,044	0,503
M2	12	0,025	2,8	0,003	0,120
M3	11	0,004	2,0	0,002	0,011

n : nombre de moyennes journalières; MG : moyenne géométrique; ETG : écart-type géométrique; MIN : minimum; MAX : maximum

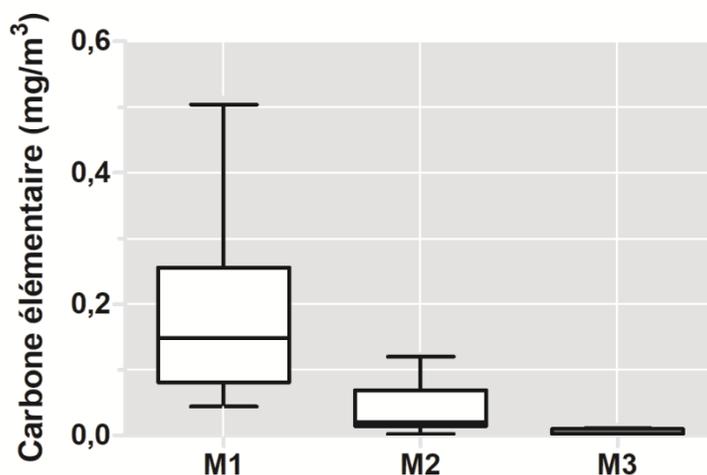


Figure 13. Distribution des concentrations massiques journalières de CE₁ mesurées avec les Airtec dans les milieux M1, M2 et M3.

5.2 Mesures intégrées

La sous-section suivante présente les résultats des mesures intégrées pour chaque catégorie de PNNI soit les ÉMD (M1, M2 et M3), les fumées et poussières métalliques (M4 et M5) ainsi que les fumées de cire de paraffine (M6).

5.2.1 Émanations de moteur diesel (ÉMD) (M1, M2 et M3)

Les moyennes journalières, écarts-types géométriques, minima et maxima des mesures intégrées de CE_R , CT_R , CE_1 , CT_1 , P_R et PC_R sont présentées dans le Tableau 9. Le milieu M1 se distingue par des concentrations plus élevées par rapport à M2 et M3.

Tableau 9. Statistiques descriptives des concentrations massiques journalières de CE_R , CT_R , CE_1 , CT_1 , P_R et PC_R dans les milieux M1, M2 et M3

Paramètre	Milieu	n	MG (mg/m ³)	ETG	Min (mg/m ³)	Max (mg/m ³)
CE_R	M1	11	0,137	2,3	0,037	0,580
	M2	12	0,025	2,4	0,008	0,072
	M3	12	0,003	2,4	<0,002	0,009
CT_R	M1	11	0,188	2,1	0,062	0,700
	M2	12	0,059	2,3	0,020	0,170
	M3	12	0,016	3,6	<0,003	0,054
CE_1	M1	12	0,133	2,3	0,033	0,510
	M2	12	0,015	2,2	0,006	0,055
	M3	12	0,002	2,0	<0,002	0,005
CT_1	M1	12	0,173	2,1	0,051	0,600
	M2	12	0,036	2,1	0,016	0,110
	M3	12	0,010	3,3	<0,003	0,039
P_R	M1	11	0,530	2,2	0,260	3,30
	M2	11	0,061	2,6	<0,023	0,340
	M3	12	0,036	1,5	0,018	0,062
PC_R	M1	9	0,244	1,9	0,080	1,00
	M2	11	0,100	2,5	0,040	0,470
	M3	12	0,019	1,7	<0,015	0,045

n : nombre de moyennes journalières; MG : moyenne géométrique;
ETG : écart-type géométrique; MIN : minimum; MAX : maximum

Le Tableau 10 rapporte les ratios CT_R/CE_R , CT_1/CE_1 , CT_1/CT_R , CE_1/CE_R et PC_R/P_R pour les trois milieux. Plus les ratios CT/CE sont élevés, plus il y a de carbone organique dans la mesure de carbone total. Des ratios CT/CE de plus de 2 ont été calculés pour les milieux M2 et M3. Ces résultats indiquent que d'autres sources de carbone organique sont présentes et que ces valeurs contribuent fortement aux concentrations de carbone total. À l'inverse, des ratios de 1,30 et de 1,37 ont été obtenus dans le milieu M1.

Concernant les ratios CT_1/CT_R ou CE_1/CE_R , plus ils sont grands, plus il y a de carbone dans la fraction sous-micronique. Les carbones élémentaires contenus dans la fraction sous-micronique (CE_1) pour M1 représentent ainsi 97 % de ceux de la fraction respirable (CE_R). Dans M2 et M3, seulement 60 % et 67 % du carbone semblent être de taille sous-micronique, respectivement. Des résultats similaires ont été obtenus pour le carbone total. Ces résultats indiquent que l'aérosol de carbone dans le milieu M1 est plus fin et que la fraction sous-micronique est en proportion plus élevée.

Tableau 10. Ratios calculés entre les différents estimateurs de concentrations

	M1	M2	M3
CT_R/CE_R	1,37	2,36	5,33
CT_1/CE_1	1,30	2,40	5,00
CT_1/CT_R	0,92	0,61	0,63
CE_1/CE_R	0,97	0,60	0,67
PC_R/P_R	0,46	0,61	0,53

Pour les ratios PC_R/P_R , plus ils sont grands, plus il y a de poussières combustibles dans la fraction respirable. Un ratio de 46 % de PC_R par rapport aux P_R a été calculé pour M1 alors que des ratios légèrement plus élevés ont été obtenus pour M2 et M3. Ces résultats indiquent la présence de sources de poussières non combustibles autres que les ÉMD dans les trois milieux, mais plus spécifiquement dans M1, où la majorité des aérosols se trouve dans la fraction non combustible.

5.2.2 Fumées et poussières métalliques (M4 et M5)

5.2.2.1 Concentrations massiques des fumées et poussières métalliques

Les concentrations massiques des poussières totales (cassettes 37 mm) et des particules fines et ultrafines (SIOUTAS, $<10 \mu\text{m}$) ont été mesurées dans les milieux M4 et M5. Les concentrations moyennes sont rapportées dans le Tableau 11. Les concentrations dans le milieu M5 apparaissent plus élevées que celles de M4 pour les deux dispositifs d'échantillonnage. Les concentrations moyennes mesurées avec le SIOUTAS étaient respectivement 28 % et 55 % plus faibles que celles obtenues avec les cassettes 37 mm dans les milieux M4 et M5.

La Figure 14 présente la relation entre les mesures effectuées avec les deux types d'échantillonneurs (cassette 37 mm par rapport à l'impacteur SIOUTAS). Une bonne corrélation est obtenue, mais la pente de la droite de régression de 0,3 confirme que les concentrations de SIOUTAS étaient inférieures à celles des cassettes 37 mm.

Tableau 11. Statistiques descriptives des concentrations massiques journalières des fumées et des poussières métalliques, mesurées avec des cassettes 37 mm ou avec des impacteurs SIOUTAS dans les milieux M4 et M5

Milieu	Instrument	n	MG (mg/m ³)	ETG	Min (mg/m ³)	Max (mg/m ³)
M4	Cassette	12	0,188	3,3	<0,080	1,20
	SIOUTAS	12	0,135	2,3	0,036	0,56
M5	Cassette	12	0,321	1,9	<0,074	0,92
	SIOUTAS	11	0,145	3,0	0,009	0,38

n : nombre de prélèvements; MG : moyenne géométrique;
ETG : écart-type géométrique; MIN : minimum; MAX : maximum

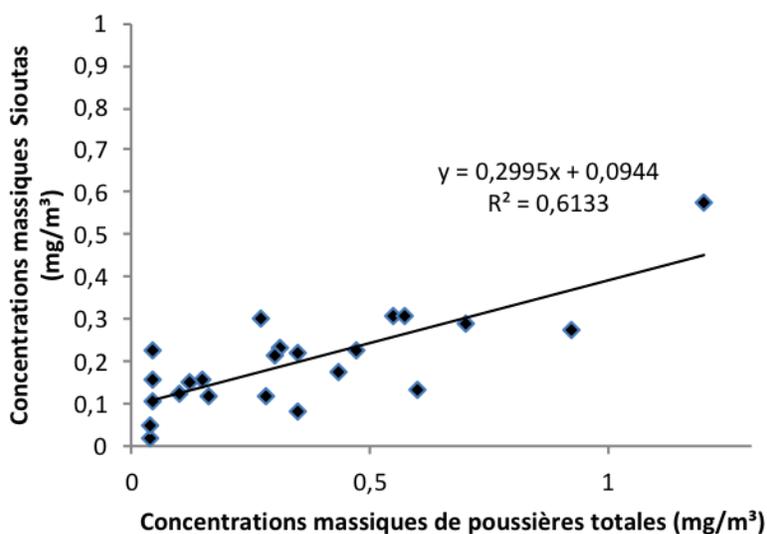


Figure 14. Corrélation entre les concentrations massiques mesurées avec les cassettes 37 mm et les impacteurs SIOUTAS dans les milieux M4 et M5.

Le Tableau 12 présente les distributions des concentrations massiques sur chacun des étages d'impaction du SIOUTAS dans les deux milieux d'intérêt, ainsi que les moyennes des DAMM estimés pour chacun des milieux. Pour M4 et M5, 51 % de la masse des poussières se retrouvaient en moyenne sur le premier étage d'impaction collectant les particules de diamètres aérodynamiques compris entre 2,5 et 10 µm. Des DAMM de 1,8 µm et de 2 µm ont été calculés pour les milieux M4 et M5 respectivement.

Tableau 12. Distributions moyennes (%) des concentrations massiques des particules déposées aux différents étages d'impaction des SIOUTAS et diamètres aérodynamiques massiques médians (DAMM) dans les milieux M4 et M5.

	M4 (n=12)	M5 (n=11)
2,5–10 µm	51	51
1,0–2,5 µm	19	23
0,5–1,0 µm	11	10
0,25–0,5 µm	19	16
<0,25 µm	-	-
DAMM (µm)	1,8	2,0

n : nombre de prélèvements;

DAMM : diamètre aérodynamique massique médian

5.2.2.2 Concentrations de métaux

Parmi l'ensemble des mesures de métaux effectuées, seuls les éléments chrome, cobalt, cuivre, fer, manganèse, nickel, plomb, vanadium et zinc ont été identifiés dans les milieux M4 et/ou M5 pour les poussières inhalables (cassette IOM), les poussières totales (cassettes 37 mm), et les particules fines et ultrafines (SIOUTAS, <10 µm) (Tableau 13). Les éléments aluminium, cadmium et magnésium n'ont pas été détectés et ne sont donc pas rapportés dans cette sous-section.

Dans le milieu M4, on retrouve presque systématiquement du fer, du cuivre, du manganèse et du plomb. Le zinc est aussi très présent, mais surtout sur les derniers étages d'impaction du SIOUTAS. Des occurrences ponctuelles de fer, cobalt et chrome sont aussi observées. Le nickel n'a pas été mesuré dans ce milieu.

Dans le milieu M5, le cuivre, le fer et le chrome sont très souvent identifiés. Des occurrences ponctuelles de manganèse, de cobalt, mais aussi de nickel sont également observées. Le plomb, le zinc, tous deux substantiellement présents dans M4, ne sont plus détectés dans M5, tout comme le vanadium.

Le Tableau 13 présente les résultats de concentrations de métaux mesurées dans chaque milieu. Les concentrations sont mentionnées quand au moins un échantillon comportait la présence de l'élément. Alors que les concentrations varient peu en fonction du dispositif d'échantillonnage pour M4, des différences importantes sont observées pour M5. Ainsi, dans ce milieu, les concentrations en métaux mesurées avec les cassettes 37 mm et celles mesurées avec les SIOUTAS sont, en moyenne, respectivement 30 % et 50 % plus faibles que les concentrations mesurées avec les IOM. Ces résultats suggèrent que les particules prélevées dans le milieu M5 (usage) sont plus grossières que celles collectées au site M4 (fonderie).

Tableau 13. Statistiques descriptives des concentrations moyennes journalières de métaux mesurées avec les cassettes IOM, les cassettes 37 mm et les impacteurs SIOUTAS dans les milieux M4 et M5

		M4				M5			
		MG ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ETG	Min ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Max ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MG ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	ETG	Min ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Max ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Chrome	IOM	1,73	1,2	<2,2	2,8	24,3	1,6	11	45
	37 mm	ND	-	-	-	11,2	2,2	3,4	38
	SIOUTAS	2,1	1,3	<1,8	2,7	4,0	1,6	2,3	10,5
Cobalt	IOM	0,09	1,6	<0,09	0,2	0,11	1,6	<0,1	0,24
	37 mm	0,09	1,1	<0,11	0,1	0,10	1,4	<0,11	0,20
	SIOUTAS	0,10	1,3	<0,04	0,1	0,10	1,3	<0,04	0,13
Cuivre	IOM	4,3	2,3	<1,0	8,8	5,9	2,5	1,7	24
	37 mm	3,5	2,1	<1,3	8,0	3,4	2,4	<1,3	21
	SIOUTAS	3,4	2,0	1,4	8,3	2,6	2,2	1,2	15
Fer	IOM	23,9	1,6	<22,3	52	225	1,7	110	510
	37 mm	23,1	1,2	<29,8	34	124	2,3	40	490
	SIOUTAS	22,6	1,5	<9,7	49	50	1,8	25	170
Manganèse	IOM	10,8	2,3	<2,4	26	2,8	2,0	<2,4	9,9
	37 mm	10,4	1,6	5,8	25	2,9	1,6	<3,1	9,3
	SIOUTAS	9,0	1,8	<3	23	2,2	1,4	<1,8	4,7
Nickel	IOM	ND	-	-	-	7,3	1,8	<4,9	16
	37 mm	ND	-	-	-	5,3	1,5	<5,7	15
	SIOUTAS	ND	-	-	-	4,2	1,3	<2,4	7,2
Plomb	IOM	0,6	2,0	<0,2	1,4	ND	-	-	-
	37 mm	0,6	1,6	<0,3	1,2	ND	-	-	-
	SIOUTAS	0,5	1,5	<0,3	1	ND	-	-	-
Vanadium	IOM	ND	-	-	-	ND	-	-	-
	37 mm	ND	-	-	-	ND	-	-	-
	SIOUTAS	0,2	1,4	<0,1	0,3	ND	-	-	-
Zinc	IOM	2,1	1,5	<2,2	4,6	ND	-	-	-
	37 mm	2,8	1,6	<3,0	7	ND	-	-	-
	SIOUTAS	2,9	1,6	<1	5,6	2,1	1,3	<1,2	3

IOM : N=10 pour M4 et N=8 pour M5
 37 mm : N=12 pour M4 et N=12 pour M5
 SIOUTAS : N=12 pour M4 et N=11 pour M5
 ND : Non détecté

L'analyse détaillée des quantités de métaux déposées sur les différents étages du SIOUTAS permet d'affiner la caractérisation (Tableau 14). Des variations de DAMM selon le milieu et le type de métal sont notées. Toutes les moyennes des DAMM restent inférieures à $1 \mu\text{m}$ quel que soit le métal dans M4. Dans le milieu M5, les DAMM moyens sont plus élevés : ceux du chrome, du cobalt, du fer et du nickel sont ainsi supérieurs ou égaux à $1 \mu\text{m}$.

Tableau 14. Distributions moyennes (%) des concentrations de métaux déposés aux différents étages d'impaction des SIOUTAS et diamètres aérodynamiques massiques moyens (DAMM) dans les milieux M4 et M5

	Chrome	Cobalt	Cuivre	Fer	Manganèse	Nickel	Plomb	Vanadium	Zinc
M4	n=2	n=2	n=12	n=3	n=11	n=0	n=11	n=3	n=8
2,5–10 µm	18	28	6	24	4	-	24	17	16
1,0–2,5 µm	18	18	7	15	4	-	10	17	13
0,5–1,0 µm	18	18	8	31	7	-	9	17	13
0,25–0,5 µm	22	18	30	15	48	-	17	17	20
<0,25 µm	22	18	49	15	37	-	39	33	37
DAMM (µm)	0,7	0,9	0,2	0,9	0,3	-	0,6	0,5	0,4
M5	n=11	n=2	n=11	n=11	n=3	n=2	n=0	N=0	n=1
2,5–10 µm	44	31	13	46	29	31	-	-	18
1,0–2,5 µm	15	17	8	19	15	16	-	-	18
0,5–1,0 µm	11	17	8	10	15	16	-	-	18
0,25–0,5 µm	12	17	9	10	20	16	-	-	18
<0,25 µm	18	17	63	14	22	20	-	-	26
DAMM (µm)	2,2	1	0,2	2,4	0,9	1	-	-	0,6

n : nombre de prélèvements; DAMM : diamètre aérodynamique massique médian

5.2.3 Fumées de cire de paraffine

Une concentration de 0,2 mg/m³ a été mesurée à l'atelier de cire avec une cassette 37 mm. Les 7 autres mesures effectuées avec ces mêmes cassettes sont toutes demeurées en deçà de la limite de quantification, soit des concentrations de moins de 0,2 mg/m³. En utilisant des impacteurs SIOUTAS, dix mesures ont été réalisées permettant d'estimer une concentration moyenne géométrique de 0,15 mg/m³ avec des niveaux variant de 0,07 à 0,37 mg/m³.

Le Tableau 15 rend compte de la répartition moyenne des concentrations de cire de paraffine sur les différents étages d'impaction du SIOUTAS et du DAMM des particules capturées dans le milieu M6. On observe que 51 % des particules déposées dans le SIOUTAS se trouvaient sur les étages inférieurs à 0,5 µm et que le DAMM était de 0,8 µm.

Tableau 15. Distribution moyenne (%) des concentrations de cire de paraffine déposée aux différents étages d'impaction des SIOUTAS et diamètre aérodynamique massique médian (DAMM) dans le milieu M6

	M6 (n=10)
2,5–10 µm	20
1,0–2,5 µm	15
0,5–1,0 µm	16
0,25–0,5 µm	28
<0,25 µm	23
DAMM (µm)	0,8

n : nombre de prélèvements;

DAMM : diamètre aérodynamique massique médian

5.3 Analyses en microscopie

Près de 1300 particules ou agglomérats de particules ont été analysés au cours de cette activité : 60 dans M1, 20 dans M2, 20 dans M3, 419 dans M4, 409 dans M5 et 360 dans M6. Chaque analyse inclut une image de la particule et une analyse par EDS.

5.3.1 Mine (M1)

La Figure 15 présente un exemple d'image de l'ouverture d'une des grilles exposées dans le milieu M1. Les particules identifiées dans ce milieu sont caractérisées essentiellement par des particules de carbone sphériques d'une dizaine de nanomètres agglomérées en longue chaîne. La Figure 16 donne un aperçu de ce type de particules abondamment observées. Des particules fines de silice de plusieurs centaines de nanomètres (Figure 17, gauche) et des particules métalliques fortement agglomérées (Figure 17, droite) ont également été identifiées dans ce milieu. Les principaux éléments identifiés parmi les particules métalliques sont le fer, le manganèse et le zinc.

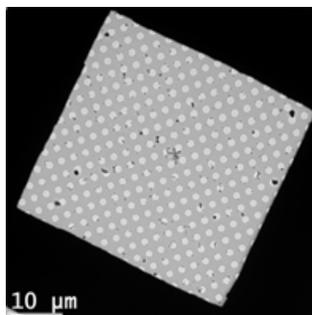


Figure 15. Image au MET en fond clair (400X) de l'ouverture d'une grille ayant servi au prélèvement de particules dans le milieu M1 (mine).

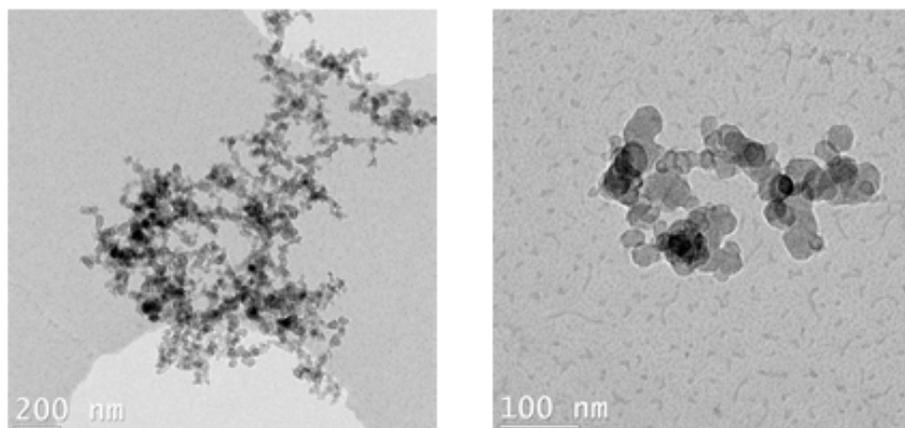


Figure 16. Exemples d'images en fond clair au MET du type de particules de carbone majoritairement identifiées dans le milieu M1.

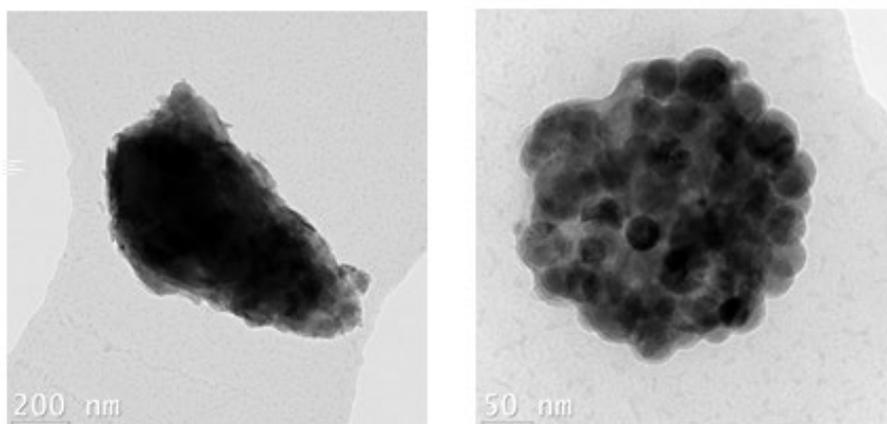


Figure 17. Exemples d'images en fond clair au MET de particules identifiées dans le milieu M1.

5.3.2 Milieu souterrain et atelier mécanique (M2 et M3)

Les milieux M2 et M3 seront traités dans la même section, car les particules d'émanation de moteur diesel identifiées possédaient les mêmes caractéristiques. La Figure 18 présente un exemple d'image de l'ouverture d'une des grilles exposées dans les milieux M2 et M3. Les particules identifiées sont caractérisées essentiellement par des particules de carbone sphériques, d'une dizaine de nanomètres, agglomérées en longue chaîne. La Figure 19 donne un aperçu de ce type de particules. Des particules de sels (NaCl) de l'ordre du micromètre ont aussi été identifiées dans le milieu M3 (Figure 20, gauche). Des « taches » ont été observées sur les grilles dans les milieux M2 et M3. Ces taches sont associées à des aérosols liquides composés d'éléments carbonés (Figure 20, droite).

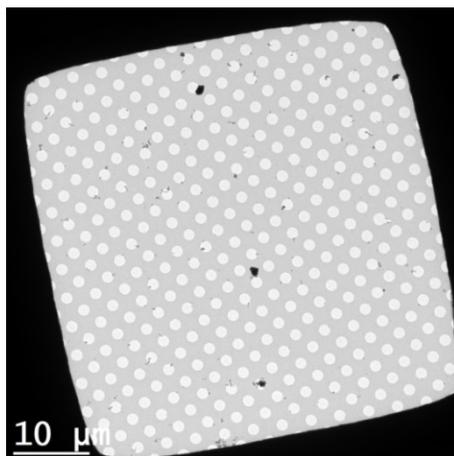


Figure 18. Image au MET en fond clair (400X) de l'ouverture d'une grille ayant servi au prélèvement de particules dans le milieu M2 (milieu souterrain).

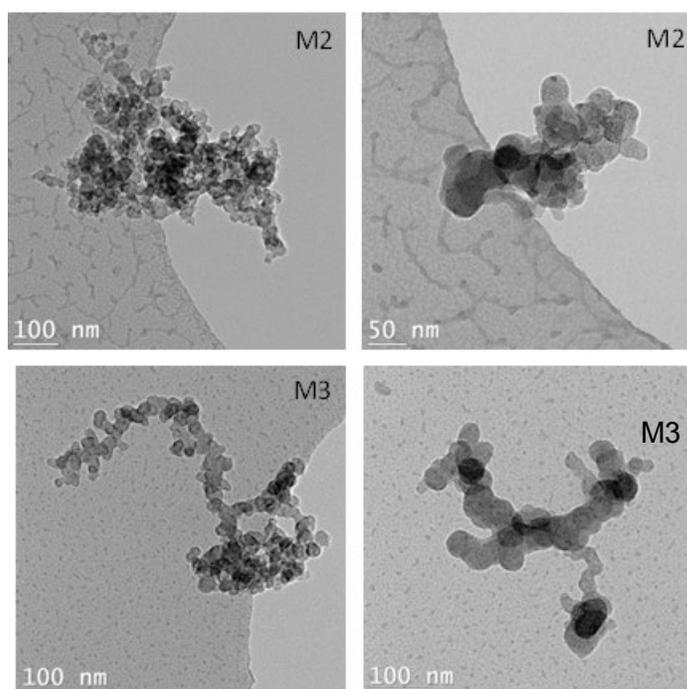


Figure 19. Exemples d'images en fond clair au MET du type de particules de carbone majoritairement identifiées dans les milieux M2 et M3.

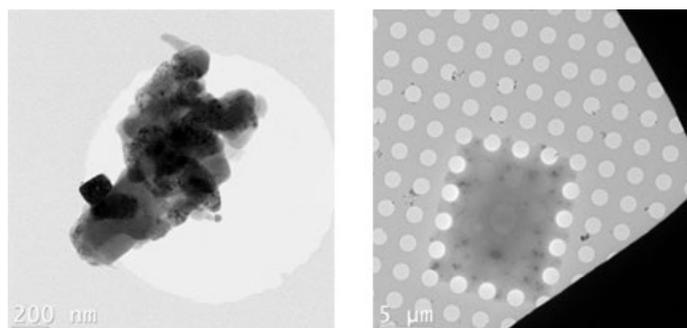


Figure 20. Exemples d'images en fond clair au MET de particules identifiées dans les milieux M2 ou M3.

5.3.3 Fonderie (M4)

La Figure 21 présente un exemple d'image de l'ouverture d'une des grilles exposées dans le milieu M4. Les particules identifiées dans ce milieu sont caractérisées essentiellement par des fragments sphériques de 50 à 500 nm, isolés ou en agglomérats (jusqu'à une dizaine de particules), et composés, essentiellement et de façon assez constante, d'oxydes métalliques. La Figure 22 donne un aperçu de ce type de particules abondamment observées de ce milieu puisqu'elles représentent 52 % des particules analysées. Les éléments identifiés et classés par ordre décroissant de fréquence d'occurrence sont les suivants : le fer (dans 66 % des particules analysées), le chrome (64 %), le silicium (61 %), le manganèse (59 %), le zinc (29 %), le cuivre (22 %), l'aluminium (9 %), le nickel (8 %) et le plomb (8 %).

D'autres types de particules sont également identifiés : des illustrations sont fournies à la Figure 23. On trouve ainsi des PN en chaîne longue, semblables à celles observées en M5 (voir sous-section 5.3.4.), des oxydes de zinc en forme d'aiguille (environ 500 nm de long) ainsi que des particules métalliques plus grossières d'une taille de l'ordre du micromètre et de forme non sphérique.

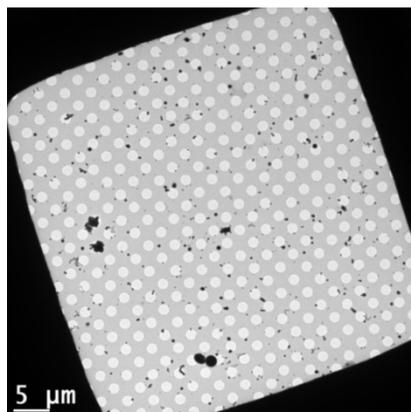


Figure 21. Image au MET en fond clair (400X) de l'ouverture d'une grille ayant servi au prélèvement de particules dans le milieu M4 (fonderie).

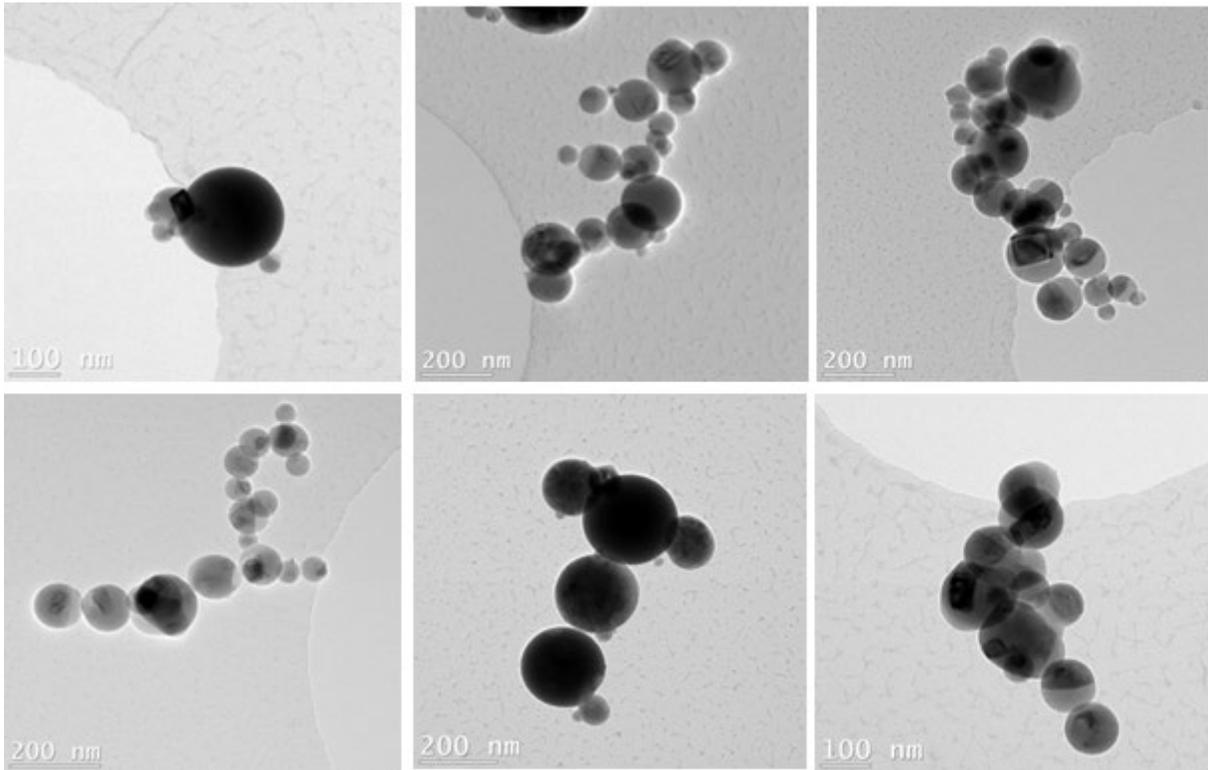


Figure 22. Exemples d'images en fond clair au MET du type de particules majoritairement identifiées dans le milieu M4.

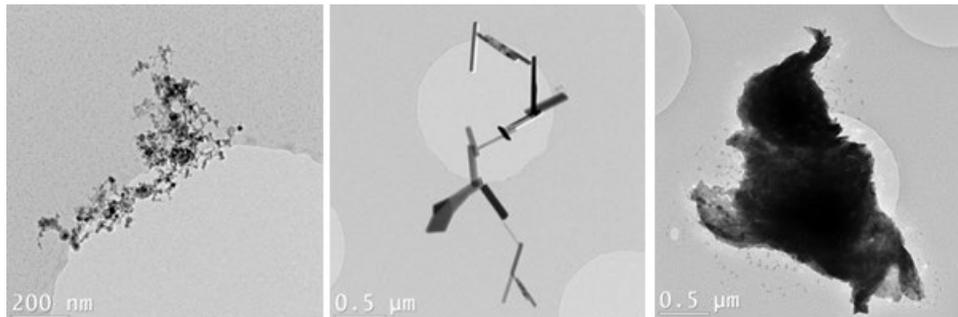


Figure 23. Exemples d'images en fond clair au MET de particules identifiées dans le milieu M4.

5.3.4 Atelier d'usinage (M5)

Les Figure 24 et Figure 25 présentent des exemples d'images d'ouvertures de grilles exposées à proximité d'un poste de coupage à l'arc et d'un poste de meulage dans le milieu M5.

Les particules identifiées dans le milieu M5 sont de formes et de compositions variées. De façon globale, les éléments dans ce milieu, par ordre de fréquence, sont les suivants : le fer (dans 77 % des particules analysées), le chrome (48 %), le silicium (41 %), le manganèse (35 %), le nickel (28 %), l'aluminium (26 %), le cuivre (13 %), le zinc (8 %), et le plomb (3 %).

On y retrouve principalement deux types de particules. La première catégorie regroupe des particules très fines, de l'ordre de quelques nanomètres, fortement agglomérées et en forme de chaîne (Figure 26). Ces particules sont détectées essentiellement sur les grilles prélevées à proximité des zones de soudage TIG et de coupage à l'arc. Les agglomérats peuvent atteindre des tailles de l'ordre du micromètre. Ces particules contiennent principalement les éléments fer, cuivre, silicium, chrome, manganèse, nickel ainsi que, plus rarement, du potassium, du soufre, du phosphore et du chlore. La deuxième catégorie, illustrée à la Figure 27, regroupe des particules de formes diverses, non spécifiques ou non sphériques, plutôt grossières (0,5 à 5 µm) et de compositions chimiques variées. Elles se situent essentiellement sur les grilles prélevées à proximité des opérations de meulage. Ces particules contiennent essentiellement les éléments fer, aluminium, silicium, chrome, nickel, manganèse et titane, ainsi que plus rarement du niobium, du potassium et du zirconium.

De plus, des particules sphériques d'oxydes métalliques de morphologie et de composition similaires à celles présentées précédemment dans M4 (Figure 22) ont aussi été observées à quelques reprises, de même que des particules de carbone de formes variées, similaires à celles décrites ultérieurement à la sous-section 5.3.5 pour le milieu M6.

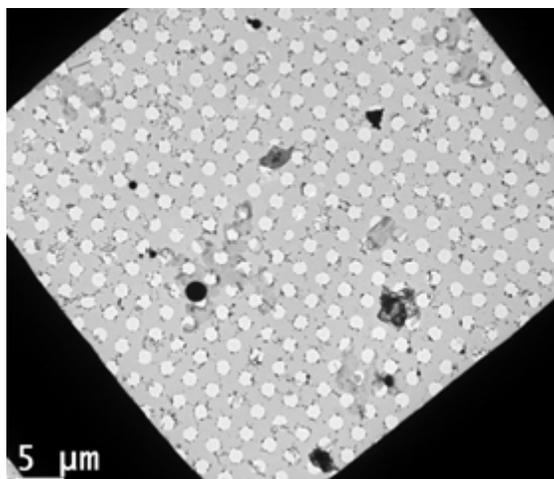


Figure 24. Image au MET en fond clair (400X) de l'ouverture d'une grille ayant servi au prélèvement de particules dans le milieu M5 (atelier d'usinage), à proximité du poste de coupage à l'arc.

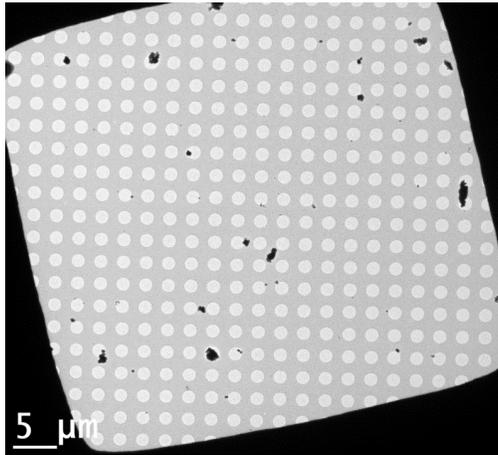


Figure 25. Image au MET en fond clair (400X) de l'ouverture d'une grille ayant servi au prélèvement de particules dans le milieu M5 (atelier d'usinage), dans une zone de meulage.

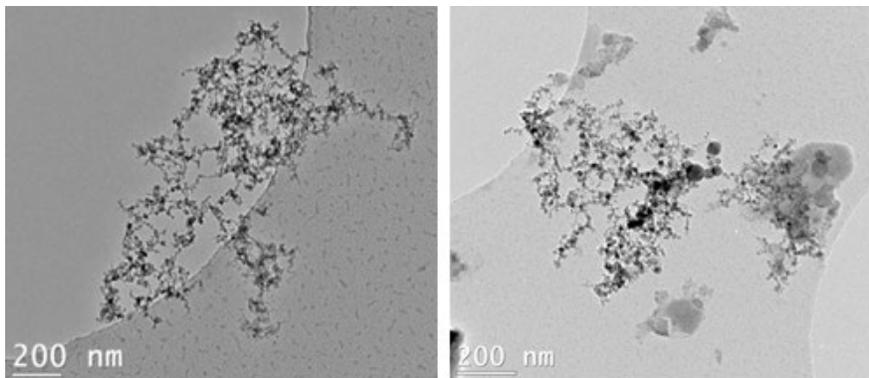


Figure 26. Exemples d'images au MET en fond clair (400X) de particules identifiées dans le milieu M5 (usinage) à proximité de l'atelier de coupage à l'arc (M5).

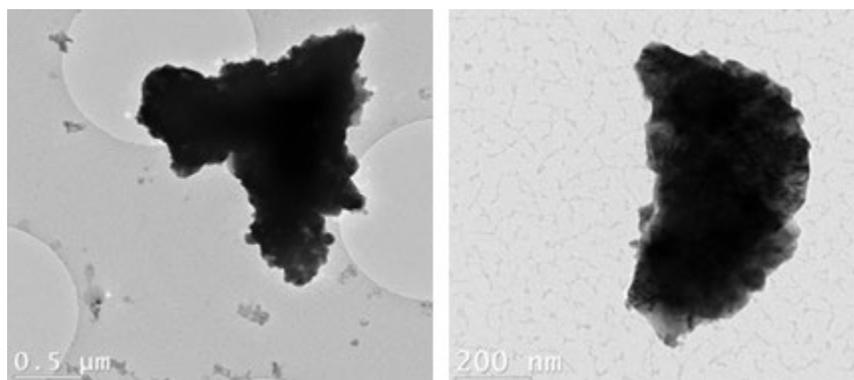


Figure 27. Exemples d'images au MET en fond clair (400X) de particules identifiées dans le milieu M5 (usinage) à proximité de l'atelier de meulage (M5).

5.3.5 Atelier de cire de paraffine (M6)

La Figure 28 présente un exemple d'image de l'ouverture d'une des grilles exposées dans le milieu M6. Les particules identifiées dans ce milieu sont riches en carbone, très homogènes et de formes variées allant de particules plutôt sphériques à des formes de bâtonnets, comme l'illustre la Figure 29. Ces particules ont des dimensions allant de quelques centaines de nanomètres à quelques micromètres et représentent 65 % des particules observées dans ce milieu. Des particules semblables à celles présentées à la Figure 26 ont également été identifiées dans M6.

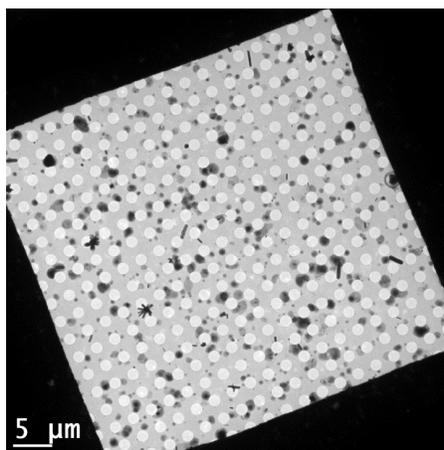


Figure 28. Image au MET en fond clair (400X) de l'ouverture d'une grille ayant servi au prélèvement de particules dans le milieu M6 (moulage de cire).

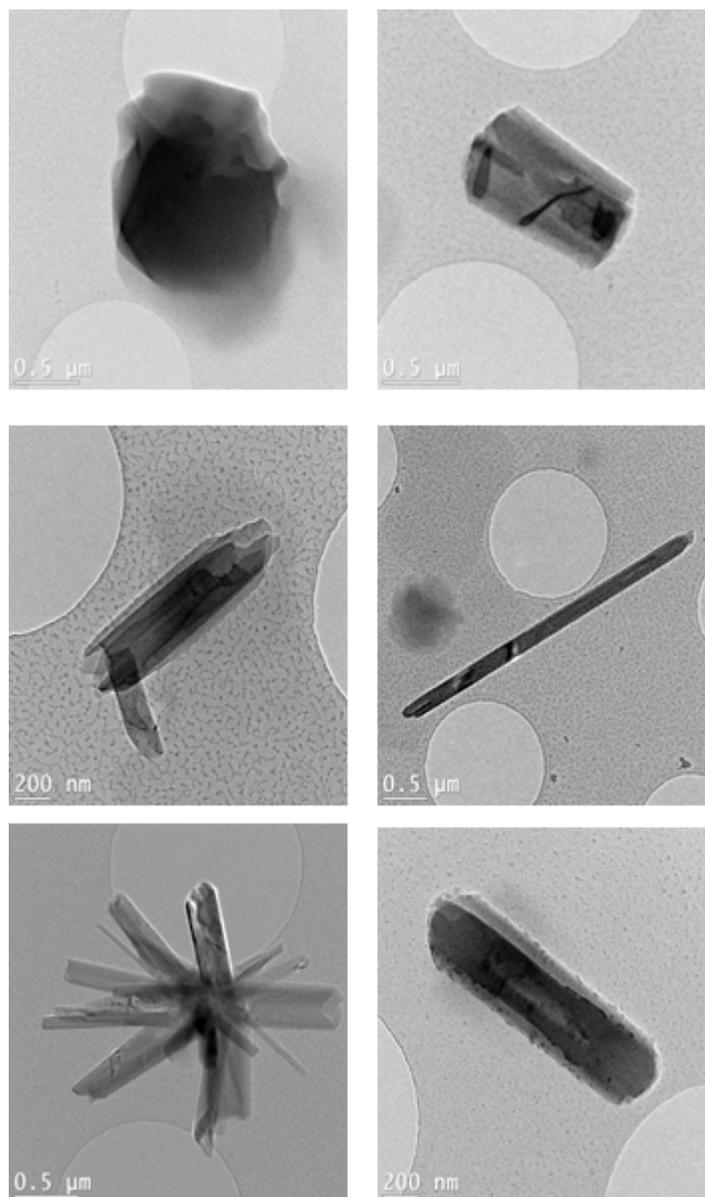


Figure 29. Exemples d'images au MET (400X) en fond clair de particules identifiées dans le milieu M6 (atelier de moulage à la cire).

5.4 Comparaison des différents indicateurs d'exposition

5.4.1 Émanations de moteur diesel (M1, M2 et M3)

De fortes corrélations ont été obtenues entre les mesures intégrées de carbone élémentaire (CE_1 et CE_R) et celles obtenues avec les ILD (Tableau 16). Ceci atteste que globalement les concentrations données par les ILD augmentent lorsque les concentrations de CE_1 et de CE_R augmentent. Globalement, pour les mesures intégrées de CE_1 , les meilleures corrélations ont été obtenues, d'abord, avec les concentrations estimées avec l'Airtec ($r=0,97$), puis avec celles

de PM_{Resp} et de PM_1 mesurées avec le DustTrak™ DRX ($r=0,94$ dans les deux cas), et finalement avec celles estimées par le DustTrak™ 8520 ($r=0,91$) et le P-Trak® ($r=0,86$). Pour les mesures intégrées de CE_R , c'est avec les données du DustTrak™ 8520 que la corrélation s'avère la plus forte ($r=0,90$). On observe que la force des corrélations entre les mesures avec un même instrument varie en fonction des milieux. Ainsi, les corrélations dans le milieu M2 sont très fortes pour le DustTrak™ DRX et plus faibles avec les données de l'Airtec. La situation est inversée dans le milieu M1, avec des corrélations très fortes avec l'Airtec et plus faibles avec le DustTrak™ DRX.

Tableau 16. Coefficients de corrélation de Spearman entre les concentrations de carbone élémentaire mesurées dans les fractions sous-microniques (CE_1) et respirables (CE_R) (mesures intégrées) et les moyennes journalières des paramètres mesurés avec les différents ILD utilisés dans les milieux M1, M2 et M3

	Concentrations CE_1 (intégrées)				Concentrations CE_R (intégrées)					
	P-Trak® ^a	DustTrak™ DRX ^b	DustTrak™ DRX ^c	DustTrak™ 8520 ^c	Airtec ^d	P-Trak® ^a	DustTrak™ DRX ^b	DustTrak™ DRX ^c	DustTrak™ 8520 ^c	Airtec ^d
		PM_1	PM_{Resp}	PM_{Resp}	CE_1		PM_1	PM_{Resp}	PM_{Resp}	CE_1
M1 <i>n=12</i>	0,60**	0,46*	0,42*	0,65**	0,96***	0,63***	0,43*	0,37	0,68**	0,97***
M2 <i>n=12</i>	0,67*	0,98***	0,90**	0,88**	0,73**	0,88**	0,79*	0,76*	0,79**	0,54
M3 <i>n=12</i>	0,75**	0,70*	0,73**	0,68*	0,74**	0,67*	0,52	0,55	0,50	0,65*
Tous <i>n=36</i>	0,86***	0,94***	0,94***	0,91***	0,97***	0,87***	0,86***	0,87***	0,90***	0,89***

^a concentration numérique; ^b concentration massique dans la fraction sous-micronique (PM_1); ^c concentration massique dans la fraction respirable (PM_{Resp}); ^d concentration de carbone élémentaire dans la fraction sous-micronique.
* $p<0,05$; ** $p<0,01$; *** $p<0,001$

La Figure 30 présente les relations entre les différents indicateurs obtenus avec les ILD (P-Trak®, DustTrak™ 8520, Airtec) dans les milieux M2 et M3, par rapport à ceux obtenus dans le milieu M1 (100 %), en comparaison avec les mesures intégrées de CE_R et CE_1 . On note que les proportions de CE_1 (moyennes journalières) obtenues avec l'Airtec sont très similaires aux mesures intégrées de CE_R et CE_1 . En revanche, les données provenant du P-Trak® sont différentes avec, en proportion, des concentrations plus élevées pour M2 et M3 que pour les autres indicateurs.

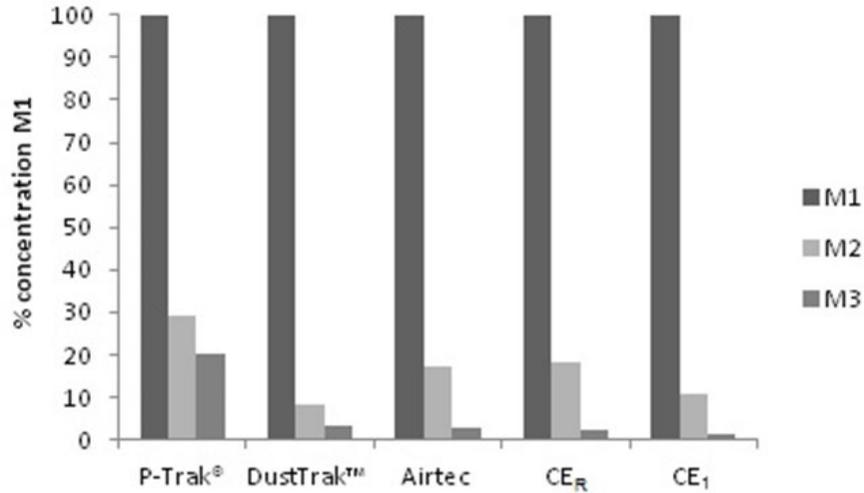


Figure 30. Proportion des concentrations mesurées par les ILD dans les milieux M2 et M3, par rapport à celles mesurées dans le milieu M1.

La Figure 31 illustre la corrélation entre les mesures intégrées de CE_R et les moyennes journalières des concentrations massiques enregistrées, également en fraction respirable, avec les DustTrak™ 8520. La Figure 32 montre, quant à elle, la corrélation entre les concentrations de CE₁ estimées de façon intégrée et les données de CE₁ enregistrées avec les Airtec.

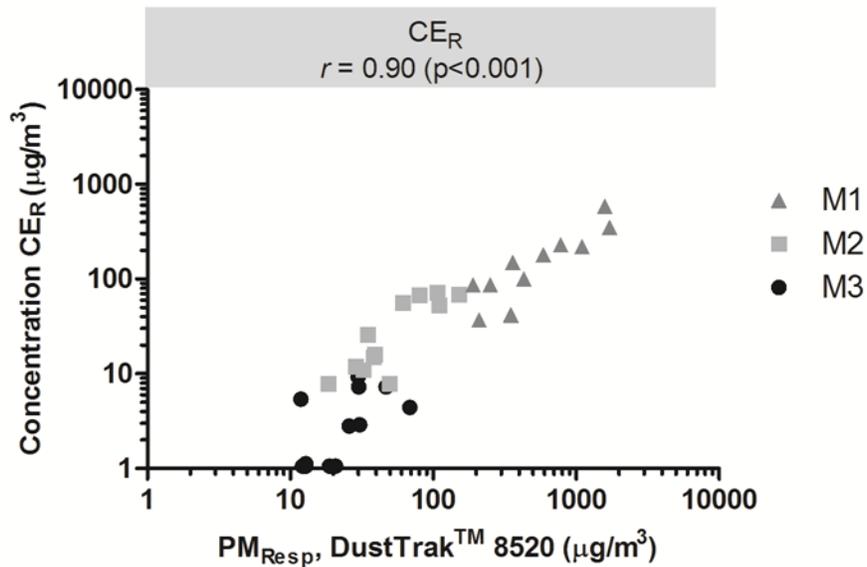


Figure 31. Corrélation entre les mesures intégrées de carbone élémentaire respirable (CE_{Resp}) et les moyennes journalières des mesures enregistrées avec les DustTrak™ 8520 pour la fraction respirable (PM_{Resp}) dans les milieux M1, M2 et M3.

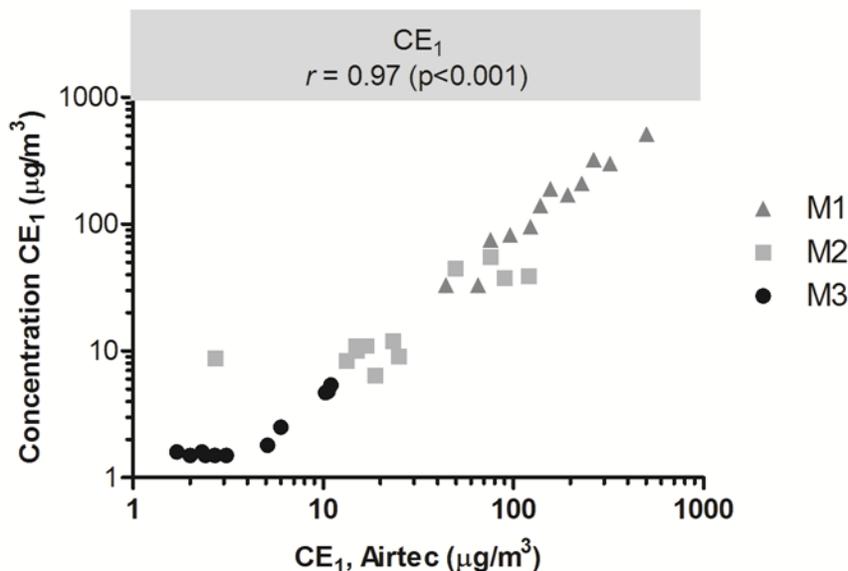


Figure 32. Corrélation entre les mesures intégrées de carbone élémentaire dans la fraction sous-micronique (CE₁) et les moyennes journalières enregistrées avec les Airtec dans les milieux M1, M2 et M3.

Bien que des corrélations significatives aient été observées (Tableau 16), les niveaux estimés par lesILD peuvent varier quantitativement. Ainsi, les ratios moyens calculés entre les concentrations journalières de CE_R et celles estimées avec le DustTrak™ 8520 varient largement en fonction des milieux. Ils sont respectivement de 0,20, 0,55 et 0,16 pour M1, M2 et M3. Ces résultats indiquent qu’une correction devrait être apportée aux mesures enregistrées par les DustTrak™ 8520 pour estimer quantitativement des niveaux de CE_R. L’équation (1) présente la régression linéaire, tous milieux confondus (M1 à M3), entre les mesures intégrées de CE_R et les concentrations journalières moyennes estimées avec le DustTrak™ 8520 (R=0,9 ; p<0,01).

$$CE_R (\mu\text{g}/\text{m}^3) = 0,16 \times [\text{DustTrak}^{\text{TM}} 8520 (\text{exprimée en } \mu\text{g}/\text{m}^3)] + 17,5 \quad (1)$$

L’équation (2) correspond à la régression linéaire entre les mesures intégrées de CE_R et les concentrations numériques journalières moyennes mesurées avec le P-Trak® (R=0,88; p<0,01).

$$CE_R (\mu\text{g}/\text{m}^3) = 0,0014 \times [\text{P-Trak}^{\text{®}} (\text{exprimée en particules}/\text{cm}^3)] - 11,7 \quad (2)$$

Finalement, rappelons que la corrélation obtenue entre les mesures intégrées de CE₁ et les concentrations journalières moyennes estimées avec l’Airtec est la plus forte obtenue (R=0,97; p<0,01). Par ailleurs, le ratio entre les concentrations estimées de façon intégrée et celles estimées grâce à l’utilisation de l’Airtec est de 1,01, signe d’une échelle de concentration similaire. L’équation (3) présente la relation linéaire entre ces deux mesures de CE₁.

$$CE_1 (\mu\text{g}/\text{m}^3) = 1,01 \times [\text{Airtec } (\mu\text{g}/\text{m}^3)] - 9,4 \quad (3)$$

5.4.2 Fumées métalliques (M4 et M5)

Dans le milieu M4, de bonnes corrélations ont été obtenues entre les niveaux de poussières totales mesurés à partir des mesures intégrées effectuées avec les cassettes 37 mm et les SIOUTAS, et les différentes mesures obtenues avec les ILD (Tableau 17 et Tableau 18). En revanche, dans le cas de M5, seules les mesures effectuées avec les cassettes 37 mm sont corrélées aux résultats provenant des ILD.

Tableau 17. Coefficients de corrélation de Spearman entre les concentrations de poussières totales (P_T) mesurées de façon intégrée avec les cassettes 37 mm et les moyennes journalières des paramètres mesurés avec les différents ILD

	P_T 37 mm						
	P-Trak® ^a	DustTrak™ DRX ^b					DustTrak™ 8520 ^b
		PM ₁	PM _{2,5}	PM _{Resp}	PM ₁₀	PM _{Tot}	PM ₁₀
M4 n=12	0,58*	0,70*	0,71**	0,72**	0,73**	0,73**	0,72**
M5 n=12	0,77**	0,75**	0,71**	0,70*	0,61*	0,60*	0,75**
Tous n=24	0,54**	0,59**	0,59**	0,58**	0,56**	0,53**	0,53**

^a concentration numérique; ^b concentration massique;
*p<0,05 ; **p<0,01 ; ***p<0,001

Tableau 18. Coefficients de corrélation de Spearman entre les concentrations de poussières totales (P_T) mesurées de façon intégrée avec les SIOUTAS et les moyennes journalières des paramètres mesurés avec les différents ILD

	P_T SIOUTAS						
	P-Trak® ^a	DustTrak™ DRX ^b					DustTrak™ 8520 ^b
		PM ₁	PM _{2,5}	PM _{Resp}	PM ₁₀	PM _{Tot}	PM ₁₀
M4 n=12	0,72*	0,77**	0,78**	0,77**	0,77**	0,73**	0,77**
M5 n=12	0,37	0,31	0,33	0,31	0,20	0,18	0,36
Tous n=24	0,47*	0,57**	0,60**	0,57**	0,55**	0,54**	0,61**

^a concentration numérique; ^b concentration massique;
*p<0,05 ; **p<0,01 ; ***p<0,001

5.4.3 Fumées de cire de paraffine (M6)

De fortes corrélations ont été obtenues entre les mesures de cire de paraffine effectuées de façon intégrée avec les impacteurs SIOUTAS et les moyennes journalières des concentrations massiques relevées avec les DustTrak™ DRX et DustTrak™ 8520 (Tableau 19). Les corrélations restent significatives, mais sont légèrement plus faibles ($r=0,6$) avec les moyennes journalières des concentrations numériques mesurées avec les P-Trak®.

Tableau 19. Coefficients de corrélation de Spearman entre les concentrations de cire de paraffine mesurées de façon intégrée avec les SIOUTAS et les moyennes journalières des paramètres mesurés avec les différents ILD utilisés dans le milieu M6

	Paraffine (C ₁₈ –C ₃₆) SIOUTAS						
	P-Trak® ^a	DustTrak™ DRX ^b					DustTrak™ 8520 ^b
		PM ₁	PM _{2,5}	PM _{Resp}	PM ₁₀	PM _{Tot}	PM _{Tot}
M6 <i>n</i> =12	0,60*	0,93***	0,95***	0,94***	0,94***	0,94***	0,93***

^a concentration numérique; ^b concentration massique;

* $p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$

5.4.4 Comparaison des mesures – tous milieux confondus (M1 à M6)

La Figure 33 présente les relations entre les moyennes journalières des concentrations massiques estimées dans la fraction sous-micronique avec les DustTrak™ DRX et celles des concentrations numériques mesurées avec les P-Trak®. On y distingue différentes relations linéaires en fonction du milieu d'échantillonnage. Les milieux M1 et M4 se distinguent notamment par des concentrations numériques élevées alors que les concentrations massiques sont en général inférieures à 1000 µg/m³. A l'inverse, dans le milieu M6, les concentrations numériques demeurent relativement faibles (< 100 000 particules/cm³) tandis que les concentrations massiques figurent parmi les plus élevées mesurées (soit entre 500 et 1500 µg/m³). Ces résultats suggèrent que les distributions de taille des particules sont différentes dans ces milieux.

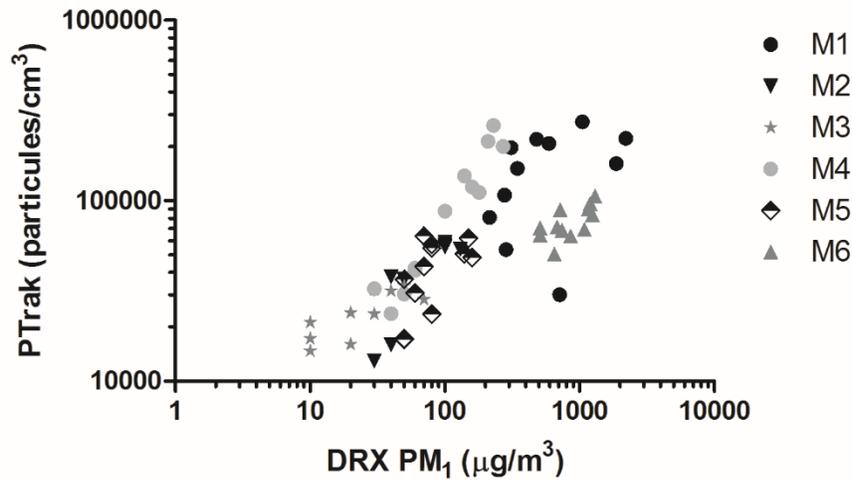
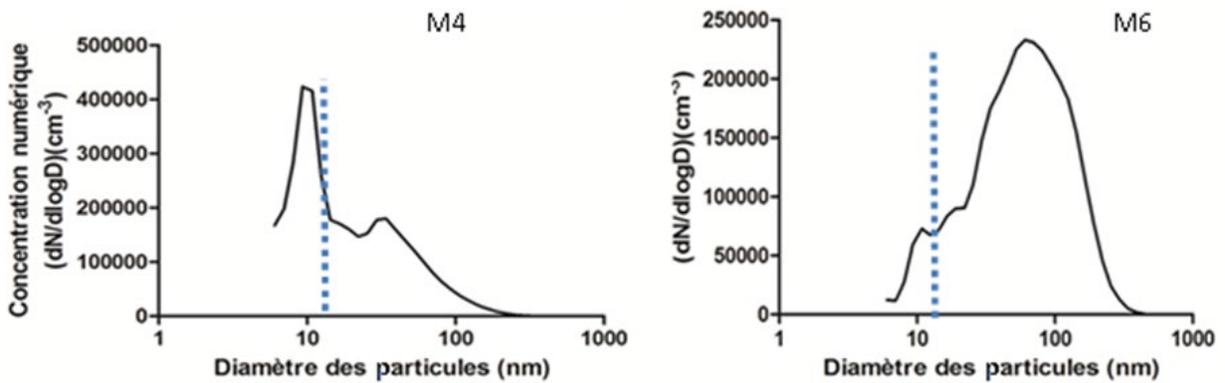


Figure 33. Relation entre les mesures de concentrations massiques estimées avec les DustTrak™ DRX et les concentrations numériques mesurées avec les P-Trak®.

La Figure 34 présente les distributions rapportées par l'EEPS pour M4 et M6 ainsi que la limite inférieure de détection du P-Trak® (comme indiqué dans le Tableau 2, le P-Trak® ne détecte que des particules de dimension supérieure à 20 nm). Cette figure permet de constater que pour M6, la grande majorité des particules détectées par l'EEPS, le seront aussi avec le P-Trak®. En revanche, pour M4, une proportion importante de particules se trouve sous la limite de détection du P-Trak®, ce qui laisse supposer une sous-estimation potentielle de la concentration numérique dans ce milieu.



..... Trait pointillé représente la limite inférieure du P-Trak®

Figure 34. Distribution granulométrique et limite de détection du P-Trak®.

5.5 Variations saisonnières

Dans trois des six milieux visités, soit M3, M4 et M6, des variations importantes des niveaux de concentrations ont pu être observées selon les saisons. Ce type de variabilité n'a pas été observé dans les autres milieux, soit les environnements souterrains (M1 et M2) ou sans ouverture directe vers l'extérieur (M5).

Pour M3, lorsque l'on sépare les mesures par campagne soit hiver (D1, D2, D3) par rapport à printemps (D4, D5, D6), des différences significatives ($p < 0.05$) sont constatées entre les mesures intégrées de CE_R et CE_1 ; les mesures hivernales étant au moins 3 fois plus élevées que les mesures printanières (Figure 35). Pour M4, les mesures automnales (D4, D5 et D6) sont apparues environ 2,5 fois plus élevées, quel que soit le dispositif d'échantillonnage utilisé (37 mm ou SIOUTAS), que celles mesurées durant la saison estivale (D1, D2 et D3) ($p < 0.05$) (Figure 36). Pour M6, les mesures estivales (D1, D2 et D3) sont apparues plus de 3 fois plus élevées (SIOUTAS) que celles mesurées durant la saison automnale (D4, D5 et D6) ($p < 0,05$).

Dans les milieux M3 et M4, la configuration des milieux permettait des changements importants de la ventilation naturelle et des mouvements d'air; cela était lié à l'ouverture (permanente en été) des nombreuses portes de garage dans l'atelier mécanique (M3), et à l'ouverture des accès situés aux deux extrémités de la fonderie pour M4. Dans le cas de M6, aucune différence de ventilation n'a été observée, mais des concentrations plus élevées ont été mesurées durant l'été. Ces différences peuvent s'expliquer par l'intensité des activités de travail qui étaient différentes durant ces deux périodes.

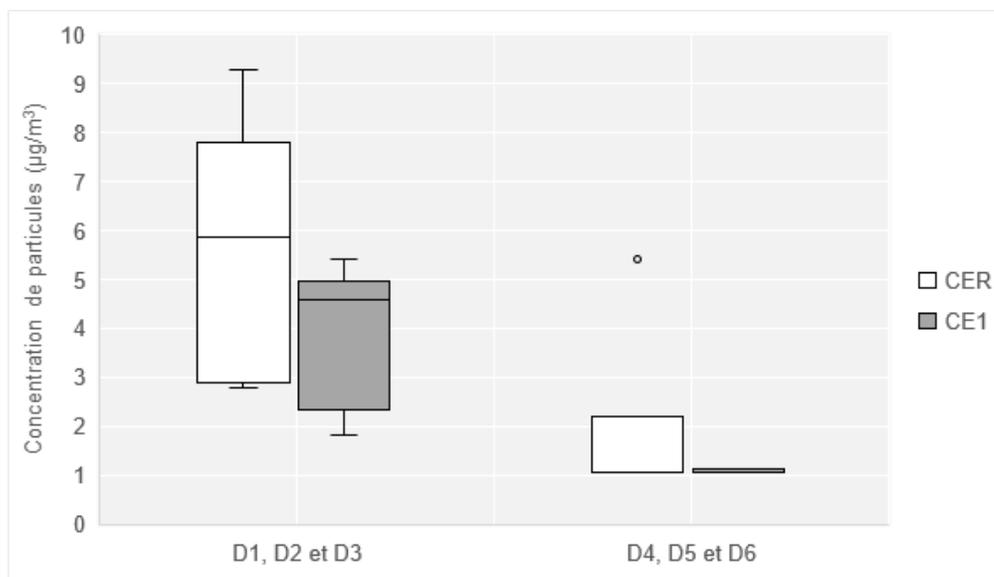


Figure 35. Distribution des mesures hivernales (portes fermées, D1, D2 et D3) et printanières (portes ouvertes, D4, D5 et D6) des concentrations de CE_R et CE_1 dans le milieu M3.

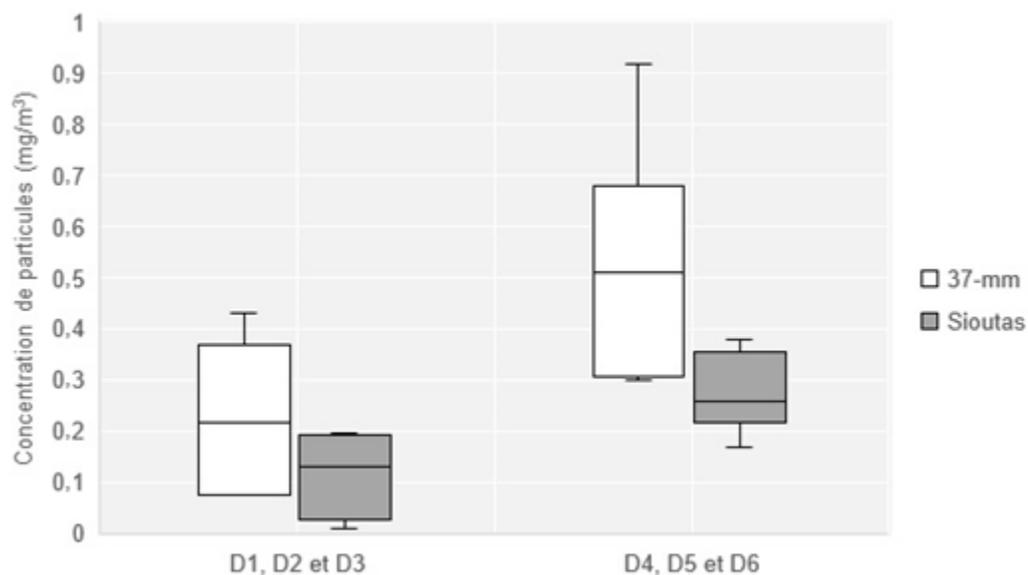


Figure 36. Distribution des mesures estivales (portes ouvertes, D1, D2 et D3) et automnales (portes fermées, D4, D5 et D6) des poussières totales prélevées sur cassette 37 mm ou avec les impacteurs SIOUTAS dans le milieu M4.

6. DISCUSSION

Cette activité a permis d'approfondir des situations d'exposition à des PNNI de divers types, dans six milieux de travail québécois. Grâce à la mise en œuvre d'une stratégie d'évaluation innovante faisant appel à un large éventail de méthodes et d'instruments, de nombreux indicateurs ont pu être mesurés en parallèle. Les niveaux de concentration ont ainsi été évalués sur le plan de métriques numériques et massiques à l'aide de plusieurs ILD. Des mesures intégrées ont aussi été effectuées en tenant compte du type de contaminant spécifique à chaque milieu. Ces mesures incluent : (i) les mesures de carbone (élémentaire et organique) des fractions sous-microniques et respirables, et les mesures de poussières combustibles respirables pour les ÉMD dans une mine souterraine (M1), dans un atelier de réparation de camions (M2) et lors d'activités d'entretien dans un réseau souterrain (M3); (ii) les mesures gravimétriques et des concentrations de 12 métaux (aluminium, cadmium, chrome, cobalt, cuivre, fer, magnésium, manganèse, nickel, plomb, vanadium, zinc) dans les fumées et poussières métalliques émises dans des fonderies (M4) et à la suite d'activités d'usinage (soudage, meulage et coupage) (M5); (iii) la mesure des concentrations de cire de paraffine (C₁₈-C₃₆) dans des fumées émises dans un atelier de moulage à la cire (M6). En parallèle, des mesures de caractérisation en microscopie ont été effectuées dans les six milieux.

6.1 ÉMD dans les milieux M1, M2 et M3

Les concentrations numériques rapportées dans les milieux concernés par les ÉMD sont très variables avec des concentrations journalières moyennes de 128 200 particules/cm³ [51 200–228 600], 32 800 particules/cm³ [12 900 – 58 600] et 22 800 particules/cm³ [14 700 – 33 800] pour les milieux M1, M2 et M3 respectivement. Les concentrations observées dans les milieux M2 et M3 sont du même ordre de grandeur que les niveaux rapportés dans des installations portuaires (concentration journalière moyenne de 36 000 particules/cm³, avec un maximum journalier de 67 000 particules/cm³) et dans les garages d'autobus scolaires (entre 5 000 et 80 000 particules/cm³) (Debia *et al.*, 2016; Debia, Trachy-Bourget, *et al.*, 2017). En revanche, les concentrations du milieu M1 sont plus élevées et se comparent mieux aux niveaux mesurés dans des milieux avec des trains à moteur diesel (concentration moyenne de 126 000 particules/cm³ et maximum de concentrations de 693 000 particules/cm³) ou dans des stationnements souterrains (concentration moyenne de 116 000 particules/cm³ et pic de concentration de 186 000 particules/cm³) (Bujak-Pietrek, 2010; Jeong *et al.*, 2017).

Les mesures de concentrations massiques obtenues avec les DustTrak™ s'étalent aussi sur une large plage de concentrations avec des moyennes géométriques journalières variant de 0,01 à 3,48 mg/m³. Dans les installations portuaires précédemment mentionnées, des concentrations journalières moyennes de 0,04 mg/m³ de PM_{Resp} et de 0,04 mg/m³ de PM₁ ont été estimées (Debia *et al.*, 2016). Dans les garages d'autobus scolaires, les concentrations journalières moyennes mesurées variaient entre 0,025 mg/m³ et 0,045 mg/m³ de PM_{Resp} (Debia, Trachy-Bourget, *et al.*, 2017). Ces concentrations sont du même ordre de grandeur que celles mesurées dans les milieux M2 et M3 ; en revanche, le milieu M1 se distingue, là encore, par des concentrations plus élevées avec des moyennes géométriques de 0,59 mg/m³ et de 0,61 mg/m³ avec le DustTrak™ 8520 et le DustTrak™ DRX respectivement.

Les concentrations de CT mesurées lors de cette étude sont inférieures à la valeur réglementaire québécoise de $0,4 \text{ mg/m}^3$ du Règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines à l'exception d'une valeur de $0,7 \text{ mg/m}^3$ mesurée dans le milieu M1. Dans ce milieu minier, des concentrations sont supérieures à certaines autres valeurs réglementaires, telles que celle en vigueur en Suisse, avec une limite de CE_R à $0,1 \text{ mg/m}^3$, quel que soit le milieu de travail. Fleck *et al.* ont évalué les concentrations personnelles de CE_R dans deux mines d'or souterraines similaires au milieu M1 de la présente étude (Fleck, Couture, *et al.*, 2018). Une moyenne géométrique en poste personnel de CE_R de $0,083 \text{ mg/m}^3$ a été rapportée, soit une valeur plus faible que la concentration de $0,137 \text{ mg/m}^3$ calculée pour le même paramètre en poste fixe dans la présente étude. Il a été observé que plusieurs des travailleurs évalués dans l'étude de Fleck *et al.* (2018) se trouvaient dans des cabines ventilées avec air filtré, ce qui explique probablement que les niveaux évalués directement dans la zone respiratoire des travailleurs étaient plus bas. Dans tous les cas, les mesures effectuées dans la présente étude ne permettent pas de conclure sur l'exposition des travailleurs puisque seules des mesures d'ambiance ont été effectuées.

Les ratios typiques de CT/CE associés aux ÉMD se situent normalement entre 1,2 et 1,3 (Noll, Bugarski, Patts, Mischler et McWilliams, 2007). Ces ratios correspondent aux ratios mesurés dans le milieu M1. Toutefois, des ratios plus élevés ont été rapportés pour M2 et M3, signe de fortes occurrences potentielles de CO non associées aux ÉMD dans ces milieux. Les ratios CT_R/CE_R variaient de 2,36 à 5,33 et ceux de CT_1/CE_1 de 2,4 à 5. Dans le milieu M2, l'interférence pourrait provenir de résidus d'huile déposés le long des voies de circulation. Dans le milieu M3, il est fort probable que des résidus d'huile soient aussi présents dans ce milieu puisqu'il s'agit d'un garage de camions. Aucune présence de fumée de cigarette n'a été observée lors des interventions dans les trois premiers milieux retenus dans le contexte de cette activité. Pour M1, le ratio moyen de 1,37 suggère que le CO dans ce milieu est directement associé aux ÉMD. Fleck *et al.* rapportent aussi des ratios proche de 1,3 dans l'environnement des mines souterraines. Toutefois, les ratios obtenus avec des mesures personnelles dans ce même milieu étaient plus élevés et donc susceptibles de contenir du CO (Fleck, Couture, *et al.*, 2018). Les auteurs associent ces sources d'interférence à la présence de brouillard d'huile à proximité des équipements et des travailleurs.

Les ratios CT_1/CT_R et CE_1/CE_R calculés dans chacun des trois milieux sont supérieurs à 0,5 (soit 50 %) (voir Tableau 10). Dans le milieu des mines, jusqu'à 97 % de la masse de carbone se trouve dans la fraction sous-micronique. Ces ratios sont de l'ordre de 0,6 (60 %) à 0,7 (70 %) pour les deux autres milieux. Ces résultats indiquent que la composition des aérosols d'ÉMD varie selon les milieux, mais que la majorité de la masse des particules est localisée dans la fraction sous-micronique. Des résultats similaires ont été obtenus par Fleck *et al.* (Fleck, Cabelguen, *et al.*, 2018).

Dans le milieu M1, il y avait, en proportion, plus de poussières non combustibles que dans les autres milieux, avec un ratio PC_R/P_R de 0,46. Des ratios supérieurs à 0,5 ont été calculés dans M2 et M3. Le milieu minier est particulièrement susceptible d'exposer les travailleurs à des poussières provenant de la roche, ce qui expliquerait ces résultats. Des poussières de silice ont notamment été observées dans ce milieu (voir Figure 17). Ces poussières provenant de la roche influenceraient les mesures non spécifiques obtenues avec des ILD comme les DustTrak™.

Globalement, la plupart des ILD ont montré de bonnes relations avec les mesures de concentration de CE_1 ou de CE_R . Ces résultats indiquent que les ILD peuvent être des outils de choix pour évaluer rapidement et à moindre coût des niveaux d'exposition, ou encore pour caractériser un milieu de travail ou un poste de travail. Ces instruments doivent toutefois être utilisés avec prudence et l'intervenant qui les utilise doit bien comprendre les limites de l'instrumentation et les corrections pouvant être nécessaires (voir sous-section 5.4.1). L'Airtec apparaît comme un bon instrument pour évaluer rapidement les expositions des travailleurs aux ÉMD notamment dans le milieu des mines souterraines en donnant une concentration de CE_1 directement comparable à des valeurs règlementaires ou sanitaires. D'autres auteurs ont également souligné l'intérêt de ces instruments pour évaluer l'exposition professionnelle aux ÉMD (Fleck, Couture, *et al.*, 2018; Noll et Janisko, 2013; Yu *et al.*, 2015).

Les images de microscopie indiquent la présence de particules de carbone sphériques agglomérées en chaîne de différentes grosseurs. Ces observations sont conformes aux données de la littérature qui rapportent aussi la présence de particules de carbone sphériques agglomérées en chaîne de diamètre de mobilité électrique variant de 50 à 300 nm. Les auteurs indiquent que les diamètres aérodynamiques équivalents sont de 50 à 150 nm, avec des densités effectives variant de 1,6 à 0,25 g/cm³ (Leung *et al.*, 2017; Park, Cao, Kittelson et McMurry, 2003). La distribution granulométrique des concentrations numériques des particules mesurées avec l'EEPS dans le milieu M3 présente deux modes : un premier à 22,1 nm et un deuxième à 107,5 nm (voir Figure 9). Le deuxième mode semble plus spécifiquement associé aux ÉMD puisqu'il domine lors des pics de concentration de particules (voir Figure 10). Ce mode correspond aussi aux tailles de particules rapportées dans la littérature (Park *et al.*, 2003).

Les travailleurs soumis à des ÉMD sont donc exposés à des particules aéroportées majoritairement de taille nanométrique et dont la concentration massique se trouve largement dans la fraction sous-micronique.

6.2 Fumées métalliques dans les milieux M4 et M5

6.2.1 Fonderie (M4)

Des concentrations moyennes journalières variant de 23 700 à 262 200 particules/cm³ et des concentrations instantanées variant de 29 700 à 392 000 particules/cm³ ont été respectivement mesurées avec les P-Trak® et l'EEPS dans les zones de production de la fonderie d'acier inoxydable. Le mode principal identifié avec l'EEPS se situait à 9,31 nm. Jarvela *et al.* ont aussi apprécié les émissions de particules lors de la production d'acier inoxydable et de ferrochrome. Ces auteurs ont mesuré, dans les zones de production, des niveaux comparables de concentrations de particules, allant de 84 800 à 360 000 particules/cm³ avec un compteur de particules CPC3007 et de 101 000 à 2 740 000 particules/cm³ avec un SMPS (Jarvela *et al.*, 2016). Pour leur part, Debia *et al.* ont mesuré les émissions de particules lors de la production d'aluminium, rapportant des concentrations moyennes variant de 70 000 à 144 000 particules/cm³ selon le procédé de production (Debia, Weichenthal, Tardif et Dufresne, 2012). Il existe donc une grande variabilité dans l'estimation des concentrations. De nombreux paramètres peuvent expliquer cette variabilité et plusieurs auteurs ont d'ailleurs tenté d'expliquer leurs résultats grâce aux profils temporels des concentrations et des observations-terrains. Jarvela *et al.* notaient, par exemple, que les concentrations mesurées étaient

relativement stables, mais qu'elles chutaient rapidement lorsque l'on arrêta le procédé (Jarvela *et al.*, 2016). Dans cette étude, des différences importantes, statistiquement significatives, ont été observées selon la saison dans la fonderie. Des ouvertures de portes permettaient, en effet, à l'air de circuler librement durant l'été alors que ces mêmes portes demeuraient fermées durant l'hiver, résultant en une augmentation importante des concentrations de particules.

Les mesures de l'EEPS indiquent la présence de particules ultrafines en grand nombre avec un mode principal autour de 10 nm. Ces données sont similaires à celles de Jarvela *et al.* qui rapportaient que le mode principal de la distribution de taille des particules dans les fonderies était inférieur à 10 nm (Jarvela *et al.*, 2016). Thomassen *et al.* ont également rapporté dans les procédés des anodes pré-cuites, un mode principal des distributions de tailles de particules inférieur à 20 nm (Thomassen *et al.*, 2006).

Les mesures intégrées ont permis de déterminer des concentrations moyennes géométriques des fractions totales (cassette 37 mm) et des fractions inférieures à 10 µm (SIOUTAS) de 0,188 mg/m³ et de 0,135 mg/m³ respectivement. Les concentrations maximales respectives s'élèvent à 1,2 mg/m³ et 0,56 mg/m³. À titre indicatif uniquement, ces concentrations maximales sont inférieures aux différentes réglementations et recommandations relatives aux poussières non classifiées autrement (Tableau 20). Elles sont également inférieures aux concentrations rapportées dans la littérature qui indiquent des concentrations moyennes de 1,58 mg/m³ dans une fonderie d'acier inoxydable (Jarvela *et al.*, 2016).

Lorsque les concentrations de métaux mesurées sont comparées aux recommandations de l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH, 2017) (Tableau 20), on constate que toutes les concentrations sont inférieures à 10 % des valeurs recommandées (même après corrections à l'aide des facteurs stœchiométriques correspondant pour les oxydes de fer, les oxydes de zinc et le pentoxyde de vanadium). Pour le manganèse, l'ACGIH propose également une valeur limite pour une fraction respirable. La concentration moyenne obtenue pour le manganèse avec le SIOUTAS (fraction <10 µm, la plus proche d'une fraction respirable) équivaut alors à environ 50 % de la recommandation de l'ACGIH. Toutefois, les données de la présente activité ne sont pas directement comparables aux recommandations et à certains niveaux identifiés dans la littérature puisque ce sont des mesures d'ambiance qui y sont rapportées. Il serait nécessaire de valider les niveaux d'exposition pour le manganèse dans ce milieu avec des mesures personnelles de la fraction respirable prises dans la zone respiratoire des travailleurs.

Tableau 20. Valeurs limites d'exposition (mg/m³) professionnelle proposées pour les métaux par l'ACGIH (2017)

Poussières non classifiées autrement	Chrome métal	Cobalt	Cuivre	Oxydes de fer	Manganèse	Nickel métal	Plomb métal	Pentoxyde de Vanadium	Oxyde de zinc
10 (I)	0,5 (T)	0,02 (T)	0,2 (fumées)	5 (R)	0,02 (R)	1,5 (I)	0,05 (T)	0,05 (I)	2 (R)
3 (R)			1 (poussières)		0,1 (I)				

R : fraction respirable

I : fraction inhalable

T : poussières totales

Des diamètres aérodynamiques massiques moyens (DAMM) de moins de 1 µm ont été calculés pour les différents métaux et peu de différences ont été constatées entre les mesures de métaux selon les différentes méthodes d'échantillonnage (cassettes IOM et 37 mm, et impacteur SIOUTAS). Ces résultats suggèrent que l'aérosol de ce milieu est très fin et que la majorité des masses des métaux évaluées se retrouve dans la fraction sous-micronique.

Les images de microscopie indiquent la présence de nombreuses particules sphériques métalliques de manganèse, de chrome, de fer, de nickel et de silice. Ces particules sphériques se présentent seules ou sous formes agglomérées comptant jusqu'à une dizaine de particules, dont la taille varie de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres. Ces particules sont similaires à celles identifiées par d'autres auteurs dans la production d'acier inoxydable et de ferrochrome (Huvinen, 2001; Jarvela *et al.*, 2016). Notons également, la présence d'oxyde de zinc en forme d'aiguille similaire à des particules identifiées dans une usine de production d'alliage de manganèse (Gjønnnes *et al.*, 2011).

Les travailleurs soumis à des fumées de fonderie sont donc exposés à des particules aéroportées majoritairement de taille nanométrique et dont la concentration massique se trouve principalement dans la fraction <10 µm ainsi que dans la fraction sous-micronique pour le chrome, le cobalt, le cuivre, le fer, le manganèse, le plomb, le vanadium et le zinc.

6.2.2 Usinage (M5)

Debia *et al.* ont précédemment décrit les concentrations numériques de particules durant différentes activités de soudage et ont rapporté des concentrations moyennes journalières variant de 50 000 à 150 000 particules/cm³, avec des pics de concentration allant jusqu'à 500 000 particules/cm³ (Debia *et al.*, 2014). Les mesures rapportées dans cette étude pour le milieu M5 sont en moyenne plus basses avec des concentrations moyennes de 41 000 particules/cm³ estimées à l'aide du P-Trak® et de 60 100 particules/cm³ avec l'EEPS. Cela s'explique principalement par le fait que, dans la présente étude, les auteurs ont caractérisé un atelier d'usinage où se déroulent différentes activités telles que le soudage avec électrode de tungstène TIG, le coupage au plasma, le meulage, l'assemblage et la finition. Les écoles de soudage comme celles visitées au cours de l'étude de Debia *et al.* (2014) sont des milieux avec des activités particulières dans lesquels un grand nombre d'étudiants réalisent simultanément des activités de soudage et durant des périodes prolongées. Ces situations d'exposition ne sont pas représentatives de l'ensemble des conditions de travail des travailleurs identifiés comme des soudeurs. Les moyennes rapportées dans la présente étude peuvent ainsi être considérées comme mieux représentatives de l'exposition des travailleurs dans un atelier d'usinage en milieu industriel.

Les mesures intégrées ont permis de mesurer des concentrations moyennes géométriques des fractions totales et inférieures à 10 µm (SIOUTAS) respectivement de 0,321 mg/m³ et de 0,145 mg/m³. Les concentrations maximales respectives s'élèvent à 0,92 mg/m³ et 0,38 mg/m³. À titre indicatif uniquement, ces concentrations sont inférieures à celles mentionnées par les différentes réglementations et recommandations relatives aux poussières non classifiées autrement (Tableau 20) et également inférieures à celles rapportées dans la littérature soient des concentrations moyennes de 7,14 mg/m³ et de 3,05 mg/m³ pour des procédés de soudage FCAW et GMAW respectivement (Hoffmeyer *et al.*, 2012).

Lorsque les concentrations de métaux mesurées sont comparées aux valeurs recommandées par l'ACGIH (Tableau 20), on constate qu'elles sont toutes inférieures à 10 % de ces valeurs (même après corrections à l'aide des facteurs stœchiométriques correspondant pour les oxydes de fer, oxydes de zinc et pentoxyde de vanadium). Les niveaux de manganèse étaient aussi près de 4 fois plus bas que ceux mesurés dans la fonderie (M4). Toutefois, là encore, les données de la présente activité ne sont pas directement comparables aux recommandations et à certains niveaux identifiés dans la littérature puisqu'il s'agit de données d'ambiance et que les recommandations s'appliquent à des concentrations prises dans la zone respiratoire des travailleurs.

Les mesures massiques permettent d'estimer des DAMM allant de 0,2 à 2,4 μm pour les différents métaux. Les images de microscopie indiquent la présence de plusieurs types de particules, dont de nombreuses particules métalliques d'oxydes de manganèse, de chrome, de fer, de nickel et de silice de tailles micrométriques et de formes non sphériques (voir Figure 27). Les différences de concentrations entre les cassettes IOM, les cassettes 37 mm et les impacteurs SIOUTAS suggèrent la présence de particules micrométriques collectées différemment selon les divers montages. Les analyses de microscopie ont montré que les particules plus grossières se trouvent majoritairement dans la section de l'usinage à proximité des activités de meulage. Les résultats issus des prélèvements avec les SIOUTAS (voir Tableau 12) sont similaires à ceux de Kondej et Gaweda qui rapportaient que la majorité des concentrations massiques des aérosols générés durant des activités de meulage sur acier se retrouvait sur l'étage le plus grossier de l'impacteur, à savoir de 2,5 à 10 μm (Kondej et Gaweda, 2012).

Un deuxième type de particules a été identifié dans le milieu M5, cette fois-ci à proximité des activités de soudage et de coupage. Des particules ultrafines agglomérées en longues chaînes de centaines de particules ont été identifiées (voir Figure 26). Ces analyses de microscopie montrent une bonne correspondance avec des travaux publiés sur les particules générées lors d'activité de soudage (Berlinger *et al.*, 2011; Huvinen, 2001).

Les niveaux mesurés avec l'EEPS indiquent un mode principal qui se situe à 9,31 nm (voir Figure 9). En situation de pic de concentration, on observe que le deuxième mode de particules, qui se trouve à 34 nm, gagne en intensité. Ce deuxième mode est probablement associé à la génération de particules dans ce milieu puisqu'il semble être le plus influencé par les changements de concentrations mesurées avec l'EEPS ou avec les autres instruments. Ce deuxième pic correspond aussi aux tailles de particules identifiées durant les observations réalisées par microscopie électronique.

Les travailleurs des ateliers d'usinage sont ainsi exposés à des fumées et à des poussières d'usinage qui sont majoritairement de taille nanométrique, mais dont certains procédés génèrent des particules plus grossières de l'ordre du micromètre. La contribution des particules plus grossières à la concentration massique est importante dans ce milieu et, par conséquent, la concentration massique se trouve dans la fraction inhalable notamment pour le chrome, le cuivre, le fer et le nickel.

6.3 Fumées de cire de paraffine dans le milieu M6

Le milieu M6 est caractérisé par des concentrations de particules proches de 100 000 particules/cm³. De tous les milieux, c'est celui qui présente les concentrations de particules mesurées avec les photomètres laser DustTrak™ les plus élevées (autour de 1 mg/m³). Le mode principal de la distribution en taille de particules est de 60,4 nm et le DAMM moyen calculé est de 0,8 µm. La majorité des particules ont des dimensions de quelques centaines de nanomètres à quelques micromètres, et elles sont riches en carbone.

Des niveaux similaires de concentrations ont été mesurés avec des instruments à lecture directe dans un milieu de travail où est appliquée de la cire chaude sur des skis (Freberg *et al.*, 2014). Les auteurs ont mesuré avec desILD des concentrations moyennes de 1,07 mg/m³ et de 1,62 mg/m³ pour des fractions respirables et inhalables respectivement. Toutefois, les auteurs ont également estimé des concentrations moyennes par des méthodes sur filtre (intégrées) de 3,1 et 6,2 mg/m³ pour les fractions respirables et inhalables respectivement. Dans ce milieu, sans la ventilation, les concentrations numériques étaient de 71 000 à 472 000 particules/cm³ avec des tailles de particules comprises entre 50 et 350 nm. Les niveaux appréciés lors de la présente étude sont tous inférieurs à 0,37 mg/m³, soit bien plus bas que ceux mesurés dans l'étude de Freberg *et al.* (2014). Les méthodes d'analyse n'étaient cependant pas les mêmes puisque ces auteurs ont utilisé une méthode gravimétrique alors que la présente équipe de recherche a utilisé une méthode de mesure spécifique de cire de paraffine (C₁₈-C₃₆) adaptée de l'OSHA PV2047. Les niveaux atteints lors de la présente activité sont toutefois bien plus bas que la valeur limite d'exposition professionnelle de 2 mg/m³ proposée par l'ACGIH pour les fumées de cire de paraffine. Aucune autre étude réalisée dans un milieu similaire à M6 n'a été identifiée dans la littérature. De nouvelles études sont donc nécessaires dans ces milieux caractérisés par la présence de fumées de cire.

Les travailleurs de l'atelier de cire sont ainsi exposés à des fumées riches en carbone qui sont principalement de taille nanométrique et dont la concentration massique se trouve en majorité dans la fraction sous-micronique.

6.4 Considérations relatives à la métrologie des fractions ultrafines

Viitanen *et al.* identifiaient récemment les facteurs clés pour permettre de faire des mesures fiables de PNNI en milieu de travail (Viitanen *et al.*, 2017). Les auteurs admettaient tout d'abord qu'il y a insuffisance de mesures de PNNI dans les milieux de travail en raison essentiellement de l'absence de valeur limite d'exposition spécifique et au manque de méthodes et d'outils pour l'échantillonnage. Les auteurs reconnaissaient aussi l'absence d'une méthode standardisée permettant de mesurer des particules d'un diamètre de moins de 20 nm.

Plusieurs enjeux sont aussi identifiés par Viitanen *et al.* pour évaluer les expositions professionnelles aux PNNI (Viitanen *et al.*, 2017). Parmi ceux-ci, notons l'impact important des paramètres de ventilation, le traitement du bruit de fond et la présence d'autres particules qui ne sont pas d'intérêt ou qui ne sont pas de taille nanométrique. Finalement, les auteurs identifiaient un besoin de réaliser des mesures parallèles en utilisant des techniques différentes afin d'améliorer la compréhension des évaluations de PNNI. La présente étude apporte plusieurs informations et réflexions en lien avec ces différentes problématiques.

Dans cette étude-ci, des évaluations répétées ont été réalisées dans six différents milieux. La répétition a permis de caractériser la variabilité des niveaux d'exposition en plus de préciser des niveaux moyens. La répétition a aussi permis de caractériser une variation saisonnière des niveaux de contamination dans deux des six milieux (M3 et M4). Ces variations saisonnières pouvaient être identifiées avec tous les indicateurs évalués et associées à la présence de ventilation naturelle dans les milieux de travail en période plus chaude. Pour M6, une variabilité en fonction des périodes d'échantillonnage a aussi été mise en évidence, mais cette variation n'était pas associée à des modifications des conditions environnementales.

Les concentrations numériques ont été rapportées à l'aide d'un CNC (P-Trak®) et d'un spectromètre de diamètre de mobilité électrique (EEPS). Des différences sont notées entre les concentrations rapportées et elles semblent augmenter lorsque les concentrations sont plus élevées. Zhu *et al.*, ont montré que le P-Trak® est généralement efficace pour effectuer des mesures d'exposition aux PNNI par rapport à d'autres instruments plus sensibles, mais non portatifs, sauf en cas de très fortes concentrations (Zhu, Yu, Kuhn et Hinds, 2006). Plusieurs auteurs utilisent aussi des compteurs qui mesurent les particules selon les diamètres aérodynamiques. Ces instruments nécessitent l'utilisation d'une densité effective afin de rendre compte des concentrations numérique et massique, et de comparer des diamètres aérodynamiques et de mobilité électrique (Park *et al.*, 2003). Il demeure toutefois difficile de déterminer une densité effective unique pour un aérosol industriel pouvant être polydispersé et de composition chimique variée. Dans la présente étude, un impacteur ELPI a également été testé dans le milieu M4 (données non présentées). Les concentrations rapportées avec une densité de 1 (MG de 15 000 particules/cm³) étaient très largement inférieures aux concentrations obtenues avec l'EEPS (MG de 222 000 particules/cm³) et du P-Trak® (MG de 83 362 particules/cm³). Toutefois, lorsque l'on considérait une densité de 5, les concentrations devenaient comparables et passaient de 15 000 particules/cm³ à 160 000 particules/cm³. Certains auteurs proposent des méthodologies pour déterminer cette densité effective et pour établir la correspondance entre les différents types de diamètres (aérodynamique/mobilité électrique/physique), mais de nouvelles études sont nécessaires pour mieux interpréter ces résultats et lever les incertitudes qui y sont associées. La comparaison de différentes concentrations numériques obtenues avec différents instruments reste donc un enjeu majeur pour l'évaluation des expositions professionnelles.

Cette étude a aussi permis de montrer l'avantage de développer des ILD spécifiques à la mesure d'un contaminant. Les mesures obtenues avec l'Airtec (FLIR) présentent un grand intérêt pour l'évaluation des expositions aux ÉMD puisqu'elles sont précises et qu'elles offrent à l'utilisateur une comparaison directe avec des valeurs limites exprimées en CE₁.

Les mesures en parallèle des concentrations selon différentes fractions (PM₁, PM_{Resp}, PM₁₀, PM_{Tot}) a aussi permis de mieux appréhender les variations de concentrations massiques entre ces indicateurs. Alors que pour les ÉMD (M2 et M3 uniquement) et les fumées et poussières d'usinage (M5), des différences ont été notées entre les différentes fractions, peu de variations ont été identifiées pour les fumées de fonderie et les ÉMD des mines (M1) (voir Tableau 9 et Tableau 13). Ces résultats reflètent évidemment l'impact de la distribution granulométrique des aérosols sur la mesure massique, mais suggèrent aussi le besoin de développer des méthodes harmonisées pour évaluer une fraction ultrafine qui aurait un impact sur la santé respiratoire des travailleurs. Comme présenté à la sous-section 2.3.2.1, le *nanoparticle respiratory deposition sampler* (NRD) veut répondre à cette problématique en permettant d'échantillonner

spécifiquement une fraction d'aérosols, essentiellement ultrafins, qui se déposerait dans les voies respiratoires. Peu de données publiées sont disponibles sur cet échantillonneur qui a été utilisé, selon la connaissance des auteurs, uniquement dans des études sur des fumées métalliques (Cena *et al.*, 2015; Cena, Chisholm, Keane, Cumpston et Chen, 2014).

Les études de microscopie ont permis de caractériser précisément les particules collectées. Plusieurs centaines d'analyses de la morphologie et de la nature des particules observées ont été effectuées durant cette étude. En 2016, Debia *et al.* recommandaient d'analyser une vingtaine de particules par grille de microscopie pour confirmer la présence de PNM et procéder à une caractérisation élémentaire des particules prélevées (Debia, L'Espérance, *et al.*, 2017). Cette recommandation a été appliquée dans la présente étude puisque 21 particules ont été observées par grille. Une très bonne homogénéité a été constatée dans les milieux évalués pour chacune des grilles. Ces résultats suggèrent que la recommandation d'analyser une vingtaine de particules par grille serait suffisante pour caractériser la nature de PNNI d'un milieu de travail.

Les prélèvements de particules sur grilles de microscopie ont été effectués avec des MPS. R'Mili *et al.* ont évalué les capacités de collecte d'un MPS à des débits de 0,3 L/min et avec des grilles de microscopie de type Quantifoil, soit un protocole similaire à celui retenu dans la présente étude (R'mili, Dutouquet, Sirven, Aguerre-Chariol et Frejafon, 2011). R'Mili et ses collègues rapportent des collectes dont l'efficacité était relativement faible pour les particules comprises entre 5 et 150 nm. Il est donc possible que les particules collectées sur les grilles ne soient pas représentatives en proportion des particules aéroportées présentes dans le milieu de travail. Toutefois, le recours à un MPS reste adéquat pour les évaluations en hygiène du travail en raison de la simplicité de sa mise en application et de son efficacité de reproductibilité des résultats mis en évidence dans cette étude. De nouvelles études sont toutefois nécessaires pour standardiser l'analyse des particules par microscopie électronique.

7. CONCLUSION

L'activité de recherche visait à évaluer diverses situations d'exposition potentielle aux PNNI dans six milieux de travail québécois.

Pour les ILD, les concentrations numériques dans les six milieux variaient de 12 900 à 228 600 particules/cm³, et les concentrations massiques de 0,01 à 3,22 mg/m³. En nombre de particules, le milieu des mines souterraines était celui dont les concentrations étaient les plus fortes alors que l'atelier de moulage à la cire présentait les concentrations massiques les plus élevées. Dans les milieux avec présence d'ÉMD, des concentrations journalières de CE₁ de 0,002 à 0,503 mg/m³ ont été mesurées avec les ILD.

Pour les mesures intégrées, des concentrations environnementales ont été déterminées dans chacun des milieux. À titre indicatif, les concentrations de CT mesurées dans cette étude sont inférieures à la valeur réglementaire québécoise de 0,4 mg/m³ du Règlement sur la santé et la sécurité du travail dans les mines, sauf une valeur de 0,7 mg/m³ mesurée dans le milieu M1. En prenant connaissance des concentrations de métaux des milieux M4 et M5 par rapport aux recommandations de l'ACGIH, on constate qu'elles sont toutes inférieures à 10 % des valeurs recommandées. La seule exception est la mesure en manganèse avec le SIOUTAS dans la fonderie (M4) qui était supérieure à la recommandation en fraction respirable du manganèse de l'ACGIH. Les concentrations de cire de paraffine mesurées étaient inférieures à la valeur limite d'exposition professionnelle de 2 mg/m³ proposée par l'ACGIH pour les fumées de cire de paraffine.

Les travailleurs soumis à des ÉMD (M1, M2 et M3) sont exposés à des particules aéroportées majoritairement de taille nanométrique et dont la concentration massique se trouve largement dans la fraction sous-micronique. Les travailleurs soumis à des fumées de fonderie (M4) sont exposés à des particules aéroportées majoritairement de taille nanométrique et dont la concentration massique se trouve principalement dans la fraction sous-micronique pour le chrome, le cobalt, le cuivre, le fer, le manganèse, le plomb, le vanadium et le zinc. Les travailleurs des ateliers d'usinage (M5) sont exposés à des fumées et des poussières d'usinage qui sont majoritairement de taille nanométrique, mais dont certains procédés génèrent des particules plus grossières de l'ordre du micromètre. La contribution des particules plus grossières à la concentration massique est importante dans ce milieu et, par conséquent, la concentration massique se trouve majoritairement dans la fraction inhalable notamment pour le chrome, le cuivre, le fer et le nickel. Les travailleurs de l'atelier de cire (M6) sont exposés à des fumées qui sont majoritairement de taille nanométrique et dont la concentration massique se trouve largement dans la fraction sous-micronique.

Les études de microscopie ont permis de caractériser précisément les particules collectées. Les particules identifiées dans les milieux M1, M2 et M3 indiquent la présence de particules de carbone sphériques agglomérées en chaîne de différentes grosseurs. Les particules identifiées dans le milieu de la fonderie (M4) sont caractérisées par des particules sphériques de 50 à 500 nm, isolées ou en agglomérats (jusqu'à une dizaine de particules), et composées, essentiellement et de façon assez constante, d'oxydes métalliques avec comme éléments prépondérants le fer, le chrome, le manganèse, le zinc, le cuivre, l'aluminium, le nickel et le plomb. Les particules identifiées dans l'atelier d'usinage (M5) sont de formes et de compositions

variées. On y trouve principalement deux types de particules. La première catégorie regroupe des particules très fines, de l'ordre de quelques nanomètres, fortement agglomérées, en forme de chaîne. Ces particules se retrouvent essentiellement sur les grilles prélevées à proximité des zones de soudage et de coupage à l'arc. Ces particules contiennent principalement les éléments fer, cuivre, silicium, chrome, manganèse, nickel ainsi que, plus rarement, du potassium, du soufre, du phosphore et du chlore. La deuxième catégorie regroupe des particules de formes diverses, non spécifiques ou non sphériques, plutôt grossières (0,5 à 5 µm) et de composition chimique variée. Ces particules sont détectées essentiellement sur les grilles prélevées à proximité des opérations de meulage. Ces particules contiennent essentiellement les éléments fer, aluminium, silicium, chrome, nickel, manganèse et titane, ainsi que plus rarement les éléments niobium, potassium et zirconium. Les particules identifiées dans l'atelier de cire (M6) sont des particules riches en carbone de formes variées allant de particules plutôt sphériques à des formes de bâtonnets. Ces particules ont des dimensions allant de quelques centaines de nanomètres à quelques micromètres.

La stratégie innovante mise en place a permis de caractériser précisément les PNNI émises dans les différents milieux de travail sur le plan des concentrations numériques, des concentrations massiques, de leur morphologie et de leur composition chimique. Des différences sont notées entre les concentrations numériques rapportées par un CNC (P-Trak®) et un spectromètre de diamètre de mobilité électrique (EEPS). La comparaison de différentes concentrations numériques obtenues avec différents instruments reste donc un enjeu majeur pour l'évaluation des expositions professionnelles. Les études de microscopie à la suite de prélèvements de particules sur grilles de microscopie avec les MPS ont permis de les caractériser précisément. Le recours au MPS reste adéquat pour les évaluations en hygiène du travail de par sa simplicité de mise en application et son efficacité de reproductibilité des résultats mis en évidence dans cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

- Andersen, Z. J., Loft, S., Ketzel, M., Stage, M., Scheike, T., Hermansen, M. N. et Bisgaard, H. (2008). Ambient air pollution triggers wheezing symptoms in infants. *Thorax*, 63(8), 710-716. doi: 10.1136/thx.2007.085480
- Atkinson, R. W., Fuller, G. W., Anderson, H. R., Harrison, R. M. et Armstrong, B. (2010). Urban ambient particle metrics and health: A time-series analysis. *Epidemiology*, 21(4), 501-511. doi: 10.1097/EDE.0b013e3181debc88
- Bakand, S., Hayes, A. et Dechsakulthorn, F. (2012). Nanoparticles: A review of particle toxicology following inhalation exposure. *Inhalation Toxicology*, 24(2), 125-135. doi: 10.3109/08958378.2010.642021
- Barclay, J. L., Miller, B. G., Dick, S., Dennekamp, M., Ford, I., Hillis, G. S., . . . Seaton, A. (2009). A panel study of air pollution in subjects with heart failure: Negative results in treated patients. *Occupational and Environmental Medicine*, 66(5), 325-334. doi: 10.1136/oem.2008.039032
- Bello, D., Wardle, B. L., Yamamoto, N., Devilloria, R. G., Garcia, E. J., Hart, A. J., . . . Hallock, M. (2009). Exposure to nanoscale particles and fibers during machining of hybrid advanced composites containing carbon nanotubes. *Journal of Nanoparticle Research*, 11(1), 231-249.
- Bello, D., Wardle, B. L., Zhang, J., Yamamoto, N., Santeufemio, C., Hallock, M. et Virji, M. A. (2010). Characterization of exposures to nanoscale particles and fibers during solid core drilling of hybrid carbon nanotube advanced composites. *International Journal of Occupational & Environmental Health*, 16(4), 434-450.
- Benbrahim-Tallaa, L., Baan, R. A., Grosse, Y., Lauby-Secretan, B., El Ghissassi, F. et Bouvard, V. (2012). Carcinogenicity of diesel-engine and gasoline-engine exhausts and some nitroarenes. *Lancet Oncology*, 13(7), 663-664.
- Berlinger, B., Benker, N., Weinbruch, S., LVov, B., Ebert, M., Koch, W., . . . Thomassen, Y. (2011). Physicochemical characterisation of different welding aerosols. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 399(5), 1773-1780.
- Breitner, S., Liu, L., Cyrus, J., Brüske, I., Franck, U., Schlink, U., . . . Hu, M. (2011). Sub-micrometer particulate air pollution and cardiovascular mortality in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 409(24), 5196-5204. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.08.023
- Breitner, S., Stolzel, M., Cyrus, J., Pitz, M., Wölke, G., Kreyling, W., . . . Peters, A. (2009). Short-term mortality rates during a decade of improved air quality in Erfurt, Germany. *Environmental Health Perspectives*, 117(3), 448-454. doi: 10.1289/ehp.11711
- Brouwer, D., Berges, M., Virji, M. A., Fransman, W., Bello, D., Hodson, L., . . . Tielemans, E. (2012). Harmonization of measurement strategies for exposure to manufactured nano-objects: Report of a workshop. *Annals of Occupational Hygiene*, 56(1), 1-9. doi: 10.1093/annhyg/mer099
- Brouwer, D. H., Gijsbers, J. H. et Lurvink, M. W. (2004). Personal exposure to ultrafine particles in the workplace: Exploring sampling techniques and strategies. *Annals of Occupational Hygiene*, 48(5), 439-453.
- Bujak-Pietrek, S. (2010). Occupational exposure to nanoparticles: Assessment of workplace exposure. *Medycyna Pracy*, 61(2), 183-189.
- Bujak-Pietrek, S., Mikolajczyk, U., Kaminska, I., Cieslak, M. et Szadkowska-Stanczyk, I. (2016). Exposure to diesel exhaust fumes in the context of exposure to ultrafine particles.

- International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 29(4), 667-682.
- Cattaneo, A., Garramone, G., Taronna, M., Perruzo, C. et Cavallo, D. M. (2009). Personal exposure to airborne ultrafine particles in the urban area of Milan. *Journal of Physics*, 151(1), 012039. Tiré de <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/151/1/012039>
- Cena, L. G., Chisholm, W. P., Keane, M. J. et Chen, B. T. (2015). A field study on the respiratory deposition of the nano-sized fraction of mild and stainless steel welding fume metals. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 12(10), 721-728. doi: 10.1080/15459624.2015.1043055
- Cena, L. G., Chisholm, W. P., Keane, M. J., Cumpston, A. et Chen, B. T. (2014). Size distribution and estimated respiratory deposition of total chromium, hexavalent chromium, manganese and nickel in gas metal arc welding fume aerosols. *Aerosol Science and Technology*, 48(12), 1254-1263.
- Cena, L. G. et Peters, T. M. (2011). Characterization and control of airborne particles emitted during production of epoxy/carbon nanotube nanocomposites. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 8(2), 86-92.
- Dahm, M. M., Yencken, M. S. et Schubauer-Berigan, M. K. (2011). Exposure control strategies in the carbonaceous nanomaterial industry. *Occupational and Environmental Medicine*, 68(6), S68-S73.
- De Hartog, J. J., Ayres, J. G., Karakatsani, A., Analitis, A., Ten Brink, H., Hameri, K., . . . Meddings, C. (2010). Lung function and indicators of exposure to indoor and outdoor particulate matter among asthma and COPD patients. *Occupational and Environmental Medicine*, 67(1), 2-10. doi: 10.1136/oem.2008.040857
- Debia, M., Beaudry, C., Weichenthal, S., Tardif, R. et Dufresne, A. (2012a). *Caractérisation et contrôle de l'exposition professionnelle aux nanoparticules et particules ultrafines* (Rapport n° R-746). Montréal, QC: IRSST.
- Debia, M., Beaudry, C., Weichenthal, S., Tardif, R. et Dufresne, A. (2012b). Exposition aux particules ultrafines dans le procédé des anodes précuites d'une aluminerie. *Travail & Santé*, 28(4), S12-S17.
- Debia, M., L'Espérance, G., Catto, C., Plamondon, P., Dufresne, A. et Ostiguy, C. (2017). *Évaluation de méthodes de prélèvement et de caractérisation de nanomatériaux manufacturés dans l'air et sur des surfaces des milieux de travail* (Rapport n° R-952). Montréal, QC: IRSST.
- Debia, M., Neesham-Grenon, E., Mudaheranwa, O. C. et Ragettli, M. S. (2016). Diesel exhaust exposures in port workers. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13(7), 549-557. doi: 10.1080/15459624.2016.1153802
- Debia, M., Trachy-Bourget, M. C., Beaudry, C., Neesham-Grenon, E., Perron, S. et Lapointe, C. (2017). Characterization of indoor diesel exhaust emissions from the parking garage of a school. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(5), 4655-4665. doi: 10.1007/s11356-016-8129-4
- Debia, M., Weichenthal, S. et Dufresne, A. (2014). Case study: Ultrafine particles exposure in apprentice welders. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 11(1), D1-9. doi: 10.1080/15459624.2013.836280
- Debia, M., Weichenthal, S., Tardif, R. et Dufresne, A. (2012). Ultrafine Particle (UFP) Exposures in an aluminium smelter: Soderberg vs. prebake potrooms. *Environment and Pollution*, 1(1), 2-12.

- Delfino, R. J., Gillen, D. L., Tjoa, T., Staimer, N., Polidori, A., Arhami, M., . . . Longhurst, J. (2011). Electrocardiographic ST-segment depression and exposure to traffic-related aerosols in elderly subjects with coronary artery disease. *Environmental Health Perspectives*, 119(2), 196-202. doi: 10.1289/ehp.1002372
- Delfino, R. J., Staimer, N., Tjoa, T., Gillen, D. L., Polidori, A., Arhami, M., . . . Sioutas, C. (2009). Air pollution exposures and circulating biomarkers of effect in a susceptible population: Clues to potential causal component mixtures and mechanisms. *Environmental Health Perspectives*, 117(8), 1232-1238. doi: 10.1289/ehp.0800194
- Dewalle, P., Vendel, J., Weulersse, J.-M., Hervé, P. et Decobert, G. (2010). Characterization of aerosols generated by nanosecond laser ablation of an acrylic paint. *Aerosol Science and Technology*, 44(10), 902-915.
- Dierschke, K., Isaxon, C., Andersson, U. B. K., Assarsson, E., Axmon, A., Stockfelt, L., . . . Pagels, J. (2017). Acute respiratory effects and biomarkers of inflammation due to welding-derived nanoparticle aggregates. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 90(5), 451-463. doi: 10.1007/s00420-017-1209-z
- Evans, D. E., Ku, B. K., Birch, M. E. et Dunn, K. H. (2010). Aerosol monitoring during carbon nanofiber production: Mobile direct-reading sampling. *Annals of Occupational Hygiene*, 54(5), 514-531.
- Fleck, A., Cabelguen, V., Couture, C., Lachapelle, G., Ryan, P., Thuot, R. et Debia, M. (2019). Comparison between personal sampling methodologies for evaluating diesel particulate matter exposures in mines: Submicron total carbon corrected for the adsorption of vapor-phase organic carbon vs. respirable total carbon. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 16(1), 1-14. doi: 10.1080/15459624.2018.1532576
- Fleck, A., Couture, C., Sauvé, J. F., Njanga, P. E., Neesham-Grenon, E., Lachapelle, G., . . . Debia, M. (2018). Diesel engine exhaust exposure in underground mines: Comparison between different surrogates of particulate exposure. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 15(7), 549-558.
- Frampton, M. W., Utell, M. J., Zareba, W., Oberdörster, G., Cox, C., Huang, L. S., . . . Stewart, J. (2004). Effects of exposure to ultrafine carbon particles in healthy subjects and subjects with asthma. (Rapport n° 126). Boston, MA: Health Effects Institute.
- Freberg, B. I., Olsen, R., Daae, H. L., Hersson, M., Thorud, S., Ellingsen, D. G. et Molander, P. (2014). Occupational exposure assessment of airborne chemical contaminants among professional ski waxers. *Annals of Occupational Hygiene*, 58(5), 601-611. doi: 10.1093/annhyg/meu015
- Freund, A., Zuckerman, N., Baum, L. et Milek, D. (2012). Submicron particle monitoring of paving and related road construction operations. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 9(5), 298-307. doi: 10.1080/15459624.2012.672924
- Gjønnnes, K., Skogstad, A., Hetland, S., Ellingsen, D. G., Thomassen, Y. et Weinbruch, S. (2011). Characterisation of workplace aerosols in the manganese alloy production industry by electron microscopy. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 399(3), 1011-1020.
- Gong, J., Zhu, T., Kipen, H., Wang, G., Hu, M., Guo, Q., . . . Rich, D. Q. (2014). Comparisons of ultrafine and fine particles in their associations with biomarkers reflecting physiological pathways. *Environmental Science & Technology*, 48(9), 5264-5273. doi: 10.1021/es5006016
- Guha, N., Loomis, D., Guyton, K. Z., Grosse, Y., El Ghissassi, F., Bouvard, V., . . . Straif, K. (2017). Carcinogenicity of welding, molybdenum trioxide, and indium tin oxide. *The Lancet Oncology*, 18(5), 581-582. doi: 10.1016/s1470-2045(17)30255-3

- Haluza, D., Moshhammer, H. et Hochgatterer, K. (2014). Dust is in the air: Part II: Effects of occupational exposure to welding fumes on lung function in a 9-year study. *Lung*, 192(1), 111-117. doi: 10.1007/s00408-013-9529-6
- Handy, R. G., Jackson, M. J., Robinson, G. M. et Lafreniere, M. D. (2006). The measurement of ultrafine particles: A pilot study using a portable particle counting technique to measure generated particles during a micromachining process. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 15(2), 172-177.
- Hinds, W. C. (1998). *Aerosol technology: Properties, behavior, and measurement of airborne particles* (2^e éd.). New York, NY: John Wiley & Sons.
- Hoffmeyer, F., Raulf-Heimsoth, M., Lehnert, M., Kendzia, B., Bernard, S., Berresheim, H., . . . Pesch, B. (2012). Impact of different welding techniques on biological effect markers in exhaled breath condensate of 58 mild steel welders. *Journal of Toxicology and Environmental Health, A*, 75(8-10), 525-532. doi: 10.1080/15287394.2012.675303
- Huvinen, M. (2001). Surface structure and speciation of metal aerosols: A key to the understanding of their biological effects. Dans L. Ebdon, L. Pitts, R. Cornelis, H. Crews, O. F. X. Donard, P. Quevauviller (Édit.), *Trace element speciation for environment, food and health* (p. 308-314). Cambridge, Angleterre: RSC.
- International Agency for Research on Cancer. (2014). *Diesel and gasoline engine exhausts and some nitroarenes*. Tiré de <https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/06/mono105.pdf>
- Järvelä, M., Huvinen, M., Viitanen, A. K., Kanerva, T., Vanhala, E., Uitti, J., . . . Tuomi, T. (2016). Characterization of particle exposure in ferrochromium and stainless steel production. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13(7), 558-568.
- Järvelä, M., Huvinen, M., Viitanen, A. K., Kanerva, T., Vanhala, E., Uitti, J., . . . Tuomi, T. (2016). Characterization of particle exposure in ferrochromium and stainless steel production. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 13(7), 558-568. doi: 10.1080/15459624.2016.1159687
- Jeong, C.-H., Traub, A. et Evans, G. J. (2017). Exposure to ultrafine particles and black carbon in diesel-powered commuter trains. *Atmospheric Environment*, 155, 46-52.
- Jorgensen, R. B., Buhagen, M. et Foreland, S. (2016). Personal exposure to ultrafine particles from PVC welding and concrete work during tunnel rehabilitation. *Occupational and Environmental Medicine*, 73(7), 467-473. doi: 10.1136/oemed-2015-103411
- Karotki, D. G., Bekö, G., Clausen, G., Madsen, A. M., Andersen, Z. J., Massling, A., . . . Møller, P. (2014). Cardiovascular and lung function in relation to outdoor and indoor exposure to fine and ultrafine particulate matter in middle-aged subjects. *Environment International*, 73, 372-381. doi: 10.1016/j.envint.2014.08.019
- Kim, J. Y., Magari, S. R., Herrick, R. F., Smith, T. J., Christiani, D. C. et Christiani, D. C. (2004). Comparison of fine particle measurements from a direct-reading instrument and a gravimetric sampling method. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 1(11), 707-715. doi: 10.1080/15459620490515833
- Koivisto, A. J. (2010). Impact of particle emissions of new laser printers on modeled office room. *Atmospheric Environment*, 44(17), 2140-2146.
- Kondej, D. et Gaweda, E. (2012). Metals in dust fractions emitted at mechanical workstations. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 18(4), 453-460. doi: 10.1080/10803548.2012.11076952
- Kouassi, S., Catto, C., Ostiguy, C., L'Espérance, G., Kroeger, J. et Debia, M. (2017). Exposure assessment in a single-walled carbon nanotube primary manufacturer. *Annals of Work Exposures and Health*, 61(2), 260-266.

- Kreyling, W. G., Semmler-Behnke, M., Takenaka, S. et Möller, W. (2012). Differences in the biokinetics of inhaled nano-versus micrometer-sized particles. *Accounts of Chemical Research*, 46(3), 714-722. doi: 10.1021/ar300043r
- Kuhlbusch, T. A. et Fissan, H. (2006). Particle characteristics in the reactor and pelletizing areas of carbon black production. *Journal of Occupational Environmental Hygiene*, 3(10), 558-567. doi: 10.1080/15459620600912280
- Kuhlbusch, T. A., Neumann, S. et Fissan, H. (2004). Number size distribution, mass concentration, and particle composition of PM₁, PM_{2.5}, and PM₁₀ in bag filling areas of carbon black production. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 1(10), 660-671.
- Leung, K. K., Schnitzler, E. G., Dastanpour, R., Rogak, S. N., Jäger, W. et Olfert, J. S. (2017). Relationship between coating-induced soot aggregate restructuring and primary particle number. *Environmental Science & Technology*, 51(15), 8376-8383. doi: 10.1021/acs.est.7b01140
- NIOSH. (2003). Diesel particulate matter (as Elemental Carbon). Dans NIOSH manual of analytical methods (4^e éd.). Tiré de <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/5040.pdf>
- Noll, J. D., Bugarski, A. D., Patts, L. D., Mischler, S. E. et McWilliams, L. (2007). Relationship between elemental carbon, total carbon, and diesel particulate matter in several underground metal/non-metal mines. *Environmental Science & Technology*, 41(3), 710-716.
- Noll, J. et Janisko, S. (2013). Evaluation of a wearable monitor for measuring real-time diesel particulate matter concentrations in several underground mines. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 10(12), 716-722.
- Ostiguy, C., Debia, M., Roberge, B. et Dufresne, A. (2014). *Nanomatériaux : guide de bonnes pratiques favorisant la gestion des risques en milieux de travail* (2^e éd., Rapport n° R-840). Montréal, QC: IRSST.
- Park, K., Cao, F., Kittelson, D. B. et McMurray, P. H. (2003). Relationship between particle mass and mobility for diesel exhaust particles. *Environmental Science & Technology*, 37(3), 577-583.
- R'mili, B., Dutouquet, C., Sirven, J. B., Aguerre-Chariol, O. et Frejafon, E. (2011). Analysis of particle release using LIBS (laser-induced breakdown spectroscopy) and TEM (transmission electron microscopy) samplers when handling CNT (carbon nanotube) powders. *Journal of Nanoparticle Research*, 13(2), 563-577.
- Raynor, P. C., Cebula, J. I., Spangenberg, J. S., Olson, B. A., Dasch, J. M. et D'Arcy, J. B. (2012). Assessing potential nanoparticle release during nanocomposite shredding using direct-reading instruments. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 9(1), 1-13. doi: 10.1080/15459624.2012.633061
- Rich, D. Q., Zareba, W., Beckett, W., Hopke, P. K., Oakes, D., Frampton, M. W., . . . Wang, Y. (2012). Are ambient ultrafine, accumulation mode, and fine particles associated with adverse cardiac responses in patients undergoing cardiac rehabilitation?. *Environmental Health Perspectives*, 120(8), 1162-1169. doi: 10.1289/ehp.1104262
- Schmoll, L. H., Peters, T. M. et O'Shaughnessy, P. T. (2010). Use of a condensation particle counter and an optical particle counter to assess the number concentration of engineered nanoparticles. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 7(9), 535-545. Tiré de <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15459624.2010.496072>

- Song, S., Lee, K., Lee, Y. M., Lee, J. H., Lee, S. I., Yu, S. D. et Paek, D. (2011). Acute health effects of urban fine and ultrafine particles on children with atopic dermatitis. *Environmental Research*, 111(3), 394-399. doi: 10.1016/j.envres.2010.10.010
- Szymczak, W., Menzel, N. et Keck, L. (2007). Emission of ultrafine copper particles by universal motors controlled by phase angle modulation. *Journal of Aerosol Science*, 38(5), 520-531.
- Thomassen, Y., Koch, W., Dunkhorst, W., Ellingsen, D. G., Skaugset, N. P., Jordbekken, L., . . . Weinbruch, S. (2006). Ultrafine particles at workplaces of a primary aluminium smelter. *Journal of Environmental Monitoring*, 8(1), 127-133.
- Viitanen, A. K., Uuksulainen, S., Koivisto, A. J., Hämeri, K. et Kauppinen, T. (2017). Workplace measurements of ultrafine particles: A literature review. *Annals of Work Exposures and Health*, 61(7), 749-758. doi: 10.1093/annweh/wxx049
- Yu, C. H., Patton, A. P., Zhang, A., Fan, Z. H., Weisel, C. P. et Liroy, P. J. (2015). Evaluation of diesel exhaust continuous monitors in controlled environmental conditions. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 12(9), 577-587.
- Zhu, Y., Yu, N., Kuhn, T. et Hinds, W. C. (2006). Field comparison of P-Trak and condensation particle counters. *Aerosol Science and Technology*, 40(6), 422-430.