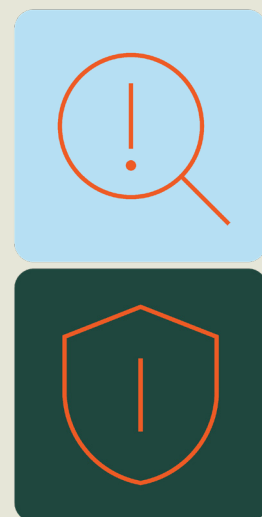


Effets respiratoires de l'exposition journalière aux particules respirables, fines et ultrafines dans divers milieux de travail

Audrey Smargiassi¹, Maximilien Debia¹, Eva Suarthana²,

RS-1235-fr





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.

Pour en savoir plus

Visitez notre dépôt institutionnel PhareSST! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.

www.pharesst.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](http://infoIRSST)

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2026
ISBN 978-2-89797-341-4 (PDF)

<http://doi.org/10.70010/AKAG3178>

Divulgarion de l'utilisation de
l'intelligence artificielle générative (IAG)



© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé
et en sécurité du travail, 2026

Ce document est sous une licence Creative Commons.
[Attribution - Utilisation non commerciale - Pas d'œuvre dérivée 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/). Cette licence autorise l'utilisation et le partage du document, à condition que l'IRSST soit cité en tant que source, que le contenu est diffusé sans modification et qu'il est utilisé à des fins non commerciales. Si vous souhaitez modifier son contenu ou l'utiliser à des fins commerciales, veuillez contacter :
publications@irsst.qc.ca



IRSST — Service des communications et des relations publiques
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec) H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca

Note au lecteur

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des autrices et auteurs. Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document n'ont pas fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

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 dépôt institutionnel de l'IRSST (PhareSST).

Cadre de référence pour la recherche en SST



Prévention des atteintes à l'intégrité physique et psychique



Réadaptation, retour et maintien au travail



Surveillance et prospection des données en SST



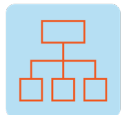
Identification des dangers, estimation et évaluation des risques



Élimination des dangers et maîtrise des risques



Métrologie appliquée à la SST



Organisation du travail



Santé mentale et psychologique



Population, société et SST

REMERCIEMENTS

Les auteurs de ce rapport remercient tous les apprentis qui ont participé à l'étude, de même que l'école des métiers qui a rendu l'étude possible. Les auteurs remercient l'équipe de recherche qui a participé à la collecte des données et aux analyses, incluant celles de laboratoire : Caroline Couture, Alan Fleck, Edith Giasson, Patrick Ryan, Kynda Tinawi, Ross Thuot, Isabelle Valois. Les auteurs remercient également Sonia Ambroise et Véronique Jacob pour leur expertise technique lors de la prise des mesures respiratoires.

SOMMAIRE

De très nombreux travailleurs sont exposés quotidiennement à des niveaux de particules dans l'air ambiant qui dépassent largement les concentrations auxquelles la population générale est exposée. Néanmoins, très peu d'études ont porté sur l'influence de l'exposition quotidienne des travailleurs aux particules respirables sur la santé respiratoire. La majorité des études se sont intéressées aux effets des expositions prolongées sur le développement de maladies respiratoires. Pourtant, les associations entre l'exposition journalière aux particules respirables et l'inflammation pulmonaire et la fonction respiratoire sont bien documentées pour la population générale. Les effets des particules respirables pourraient différer pour les travailleurs parce que les niveaux d'exposition sont plus élevés et que les particules pourraient inclure des composants plus ou moins oxydants pour les voies respiratoires. Le projet visait à décrire l'exposition journalière des travailleurs de divers milieux aux particules respirables et oxydantes et à documenter l'influence de ces particules sur l'inflammation pulmonaire et la fonction respiratoire des travailleurs.

Afin de répondre à cet objectif, l'exposition et l'inflammation respiratoire quotidienne d'une cinquantaine d'apprentis d'une école des métiers de la construction ont été mesurées de façon répétée pendant cinq jours consécutifs. Une revue systématique de la littérature scientifique a également été effectuée pour documenter et comparer l'influence de l'exposition journalière aux particules respirables sur la fonction respiratoire des travailleurs et des adultes de la population générale.

Le potentiel oxydatif des particules dans l'air ambiant des divers milieux de travail était différent. Pour une même concentration de particules respirables, celles de soudage étaient plus oxydantes que celles de briquetage et de la menuiserie. Chez les apprentis, une augmentation de l'exposition aux particules respirables et oxydantes était associée à une augmentation de l'inflammation respiratoire. Les concentrations de particules respirables et oxydantes des milieux de travail dépassaient largement celles de l'environnement général. Cependant, selon la littérature scientifique, l'exposition de la population générale à des concentrations de particules similaires à celles des travailleurs influencerait beaucoup plus la santé respiratoire de la population générale. En effet, pour une même exposition aux particules respirables, la baisse de la fonction respiratoire des travailleurs serait dix fois moindre que celle de la population générale. Plusieurs raisons peuvent expliquer cette différence incluant le fait que les particules dans l'air de l'environnement général et en milieu de travail contiennent des composants différents et que les travailleurs des écoles d'apprentis ne sont pas représentatifs des populations étudiées dans les autres études, ils sont possiblement en meilleure santé que les adultes de la population générale.

Les résultats de ce projet suggèrent que les concentrations de particules oxydantes varient selon le milieu de travail et que l'exposition quotidienne aux particules respirables et oxydantes influence l'inflammation et la fonction respiratoire. Le contrôle quotidien de l'exposition aux particules respirables, notamment à celles plus oxydantes, est important pour limiter l'inflammation pulmonaire quotidienne et les effets sanitaires possibles qui pourraient être occasionnés par une inflammation pulmonaire répétée.

Le présent rapport comprend le résumé des articles publiés qui abordent les objectifs spécifiques de l'étude : 1) évaluer l'exposition journalière, d'apprentis de divers milieux de travail aux particules respirables et à leur potentiel oxydatif et charge oxydative, au cours de 5 jours consécutifs d'activité (da Silveira Fleck et al., 2022) ; 2) estimer l'association entre l'exposition journalière aux particules respirables et à leur potentiel oxydatif (PO) et charge oxydative (CO) et l'inflammation pulmonaire d'apprentis de divers milieux de travail (Tinawi et al., 2026) et 3) comparer la relation entre l'exposition journalière aux particules respirables et des paramètres de la fonction respiratoire chez les travailleurs et les adultes de la population générale en bonne santé (da Silveira Fleck et al., 2021).

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1. RÉSUMÉS DES ARTICLES	3
1.1 Assessment of the oxidative potential and oxidative burden from occupational exposures to particulate matter	3
1.2 Lung inflammation from daily exposure to airborne oxidative particulate matter in a trade school	4
1.3 Environmental and occupational short-term exposure to airborne particles and FEV1 and FVC in healthy adults: a systematic review and meta-analysis.....	6
2. DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION.....	7
BIBLIOGRAPHIE	10

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Acronyme	Définition
CO	Charge oxydative (<i>Oxidative Burden</i>)
CVF	Capacité vitale forcée
FeNO	Oxyde nitrique exhalé (<i>Fractional exhaled Nitric Oxide</i>)
FEV1	« <i>Forced Expiratory Volume in 1 second</i> », ou VEMS en français (Volume Expiratoire Maximal par Seconde)
FVC	« <i>Forced Vital Capacity</i> » ou CVF en français (Capacité Vitale Forcée)
IQR	Étendue interquartile (<i>Inter-Quartile Range</i>)
PM2,5	Particules fines, c.-à-d. dont le diamètre médian est <2,5 µm
PM4	Particules respirables, dont le diamètre médian est <4 µm
PO	Potentiel oxydatif
PUF	Particules ultrafines, c.-à-d. dont le diamètre est <0,1 µm
VEMS	Volume expiratoire maximal en une seconde

INTRODUCTION

L'exposition journalière (court terme) de la population générale aux particules fines (diamètre médian $<2,5\mu\text{m}$) et ultrafines ($<0,1\mu\text{m}$) dans l'air ambiant a été associée au stress oxydatif, à l'inflammation pulmonaire, à la diminution de la fonction respiratoire, à des symptômes respiratoires, et notamment à l'exacerbation de maladies respiratoires chroniques comme l'asthme et autres maladies obstructives (Environmental Protection Agency [EPA], 2009).

Malgré le nombre important de travailleurs exposés à des concentrations élevées de particules respirables (diamètre médian $<4\mu\text{m}$), incluant les particules fines et ultrafines (PUF), dont les fumées de moteurs diesel et les fumées de soudage (CAREX Canada [n.d.]), les effets respiratoires des expositions journalières aux particules ont été peu étudiés en milieu de travail contrairement aux effets d'expositions chroniques. Il est cependant connu que l'exposition prolongée aux particules dans l'air en milieu de travail est associée à une part non négligeable des maladies respiratoires comme l'asthme et les maladies obstructives chroniques (GBD 2016 Occupational Chronic Respiratory Risk Factors Collaborators, 2020). Tout comme dans l'environnement général, les expositions journalières pourraient induire des effets physiologiques (ex. inflammation pulmonaire et baisse de la fonction respiratoire) chez certains travailleurs. Ces effets subits de façon répétée et sur de longues périodes pourraient même contribuer au développement de maladies respiratoires chroniques.

De plus, la composition des particules en milieu de travail, de même que leur toxicité, est susceptible de différer de celles du mélange auquel la population est exposée dans l'environnement général, mais leurs effets n'ont jamais été comparés. En fait, l'évaluation de l'exposition professionnelle est généralement basée sur la concentration massique des particules ou de composants individuels des particules (ex. carbone élémentaire, métaux spécifiques). La charge oxydative (CO) des particules est une approche émergente pour intégrer le potentiel toxique et la masse des divers composants des particules dans l'air ambiant (Ayes *et al.*, 2008). Elle est basée sur la mesure du potentiel oxydatif (PO) des particules qui est multiplié par la concentration massique dans l'air de ces dernières. Malheureusement, cette mesure est encore peu utilisée pour évaluer l'exposition professionnelle.

Le projet visait principalement à étudier la relation entre la variation journalière de l'exposition de travailleurs aux particules respirables (PM₄) et à leur CO et la variation journalière de paramètres de la fonction respiratoire et de l'inflammation pulmonaire dans divers environnements de travail

Trois objectifs spécifiques ont été poursuivis, chacun associé à une publication scientifique. Les objectifs spécifiques et publications associées sont :

1. Évaluer l'exposition journalière, d'apprentis de divers milieux de travail aux particules respirables et à leur potentiel oxydatif et charge oxydative, au cours de 5 jours consécutifs d'activité (da Silveira Fleck *et al.*, 2022).
2. Estimer l'association entre l'exposition journalière aux particules respirables et à leur potentiel oxydatif [PO] et charge oxydative [CO] et l'inflammation pulmonaire d'apprentis de divers milieux de travail (Tinawi *et al.*, 2026).
3. Comparer la relation entre l'exposition journalière aux particules respirables et des paramètres de la fonction respiratoire chez les travailleurs et les adultes de la population générale en bonne (da Silveira Fleck *et al.*, 2021).

1. RÉSUMÉS DES ARTICLES

Dans les sections suivantes contient le résumé des articles publiés qui abordent les objectifs spécifiques de l'étude : 1) évaluer l'exposition journalière, d'apprentis de divers milieux de travail aux particules respirables et à leur potentiel oxydatif et charge oxydative, au cours de 5 jours consécutifs d'activité (da Silveira Fleck *et al.*, 2022) ; 2) estimer l'association entre l'exposition journalière aux particules respirables et à leur potentiel oxydatif (PO) et charge oxydative (CO) et l'inflammation pulmonaire d'apprentis de divers milieux de travail (Tinawi *et al.*, 2026) et 3) comparer la relation entre l'exposition journalière aux particules respirables et des paramètres de la fonction respiratoire chez les travailleurs et les adultes de la population générale en bonne santé (da Silveira Fleck *et al.*, 2021).

1.1 Assessment of the oxidative potential and oxidative burden from occupational exposures to particulate matter

da Silveira Fleck, A., Debia, M., Ryan, P. E., Couture, C., Traub, A., Evans, G. J., . . . Smargiassi A. (2022). Assessment of the oxidative potential and oxidative burden from occupational exposures to particulate matter. *Annals of Work Exposures and Health*, 66(3):379-391. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxab086>

La mesure de la charge oxydative des particules (CO, i.e. *Oxydative Burden*) est une approche émergente pour caractériser le potentiel toxique des particules de l'air ambiant, car elle intègre la concentration massique et le potentiel oxydatif (PO) des composants chimiques des particules. Bien qu'elle ait été utilisée pour caractériser les particules dans l'air ambiant de l'environnement général, elle a été très peu utilisée en milieu de travail.

Dans l'étude de Fleck *et al.* (2022), l'exposition aux particules respirables et le PO et la CO de ces particules ont été mesurés et comparés pour 28 apprentis de deux milieux de travail d'une école des métiers de la construction pendant 5 jours consécutifs sur une période de trois semaines pour un maximum de 5 mesures par apprenti. Des échantillonneurs munis de cyclones et des équipements de mesures à lecture directe ont été utilisés pour estimer les concentrations de particules respirables de diamètre de moins de 4 µm (PM4), de moins de 2,5 µm (PM2,5) et les particules ultrafines (PUF, dont le diamètre est de moins de 100 nm). Le potentiel oxydatif (PO) des PM4 et PM2,5 a été évalué par le test basé sur la dégradation de l'acide ascorbique en utilisant un fluide synthétique de revêtement des voies respiratoires. La charge oxydative (CO) des particules collectées a été déterminée en multipliant les valeurs du PO par les concentrations massiques de particules. L'influence de la stratégie d'échantillonnage (c.-à-d. mesures personnelles et en site fixe) sur les niveaux de PM4 a également été évaluée.

L'exposition journalière des soudeurs aux particules respirables était beaucoup plus élevée que celle des maçons. La médiane (25^e et 75^e percentiles) de l'exposition aux concentrations massiques de PM4 était de 900 (672–1730) µg/m³ pour les 13 apprentis soudeurs et de 432 (345–530) µg/m³ pour les 15 apprentis maçons. La médiane des concentrations numériques d'exposition aux PUF était respectivement de 128 000 (78 000–169 000) particules/cm³ et de 2800 (1700–4400) particules/cm³ pour ces deux groupes. Le PO et la CO des PM4 à laquelle les soudeurs étaient exposés étaient également plus élevés. La médiane (25^e et 75^e percentiles) du PO des PM4 était de 3,3 (2,3 - 4,6) pmol/min/µg pour les soudeurs et de 1,4 (1,0 – 1,8) pmol/min/µg pour les maçons ; les médianes de la CO d'exposition étaient respectivement de 1750 (893 – 4560) pmol/min·m³ et de 486 (341 – 695) pmol/min·m³ pour ces deux groupes. Cette charge ne variait pas selon la fraction de particules échantillonnée (PM4 vs PM2,5). Toutefois, la CO était plus élevée pour les mesures personnelles des soudeurs (zone respiratoire) que pour les mesures d'ambiance (en site fixe), en raison des concentrations supérieures de particules.

Les résultats de cette étude montrent que des différences importantes dans le PO et la CO peuvent être observées entre les milieux de travail. Les niveaux observés étaient également beaucoup plus élevés que ceux mesurés dans l'environnement général. Il semble pertinent de mesurer la CO pour caractériser l'exposition de travailleurs et l'association avec des effets respiratoires en milieu de travail afin de documenter la toxicité potentielle des particules de divers milieux.

1.2 Lung inflammation from daily exposure to airborne oxidative particulate matter in a trade school

Tinawi, A., Plante, C., da Silveira Fleck, A., Giasson, E., Valois, I., Couture, C., . . . Smargiassi, A. (2026). Lung inflammation from daily exposure to airborne oxidative particulate matter in a trade school. *Annals of Work Exposures and Health*, 70(2), article wxag009. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxag009>

Les travailleurs sont exposés quotidiennement à des particules dans l'air qui sont de compositions variées. Néanmoins, l'association entre l'exposition journalière à ces particules et l'inflammation pulmonaire en milieu professionnel a été peu explorée. De plus, la différence possible de la toxicité des particules de concentrations massiques similaires, mais de compositions différentes n'a pas été considérée.

L'étude de Tinawi *et al.* visait à estimer les associations entre l'inflammation pulmonaire et l'exposition professionnelle journalière aux particules respirables (PM4), à leur charge oxydative (CO), de même qu'aux particules de diamètre de moins de 2,5 µm (PM2,5) et aux particules ultrafines (PUF) au sein de trois groupes d'apprentis (maçons, charpentiers, soudeurs) dans une école des métiers de la construction.

Un devis avec des mesures répétées pendant cinq jours chez 56 apprentis a été utilisé. L'inflammation pulmonaire a été estimée par la mesure de l'oxyde nitrique exhalé (FeNO) après chaque quart de travail. Les PM4 ont été collectées à l'aide de cyclones dans la zone respiratoire pour estimer l'exposition journalière personnelle des apprentis ; les PM4 ont également été collectées en poste fixe. De plus, les concentrations massiques de PM2,5 et les concentrations numériques de PUF ont été estimées en postes fixes avec des appareils à lecture directe (DustTrak DRX et P-trak, TSI Inc.). Le potentiel oxydatif (PO) et la CO des PM4 ont été estimés avec un test basé sur la dégradation de l'acide ascorbique. Des modèles de régressions mixtes ont été utilisés pour estimer les associations entre le FeNO et les expositions journalières aux PM4 et à leur CO, de même qu'avec les concentrations journalières de PM2,5 et de PUF.

Le nombre de mesures d'exposition et de FeNO disponibles pour les analyses était de 210. Après le quart de travail, le FeNO variait entre 5,0 et 91,5 ppb. Les concentrations médianes d'exposition personnelle aux PM4 étaient de 361 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (étendue interquartile IQR : 437 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). En poste fixe, les concentrations médianes de PM4 et PM2.5 étaient de 260 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IQR : 323 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et 104 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IQR : 155 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). L'exposition aux particules oxydantes était plus élevée pour les soudeurs. La médiane (25e et 75e percentiles) du PO des PM4 était de 2,4 (1,5 – 3,3) $\text{pmol}/\text{min}/\mu\text{g}$ pour les soudeurs, de 1,3 (0,9 – 1,5) $\text{pmol}/\text{min}/\mu\text{g}$ pour les maçons et de 0,3 (0,1 – 0,4) $\text{pmol}/\text{min}/\mu\text{g}$ pour les menuisiers. Pour la CO des PM4, les valeurs médianes pour ces trois groupes étaient respectivement de 1092 (457 – 3495) $\text{pmol}/\text{min}\cdot\text{m}^3$, 528 (393 – 754) $\text{pmol}/\text{min}\cdot\text{m}^3$ et 29 (11 – 47) $\text{pmol}/\text{min}\cdot\text{m}^3$.

Les associations entre le FeNO et les mesures d'expositions personnelles et en poste fixe étaient toutes positives. Cependant celles avec la CO étaient moins variables. Par exemple, en poste fixe, l'estimation de l'association avec la CO était de 0,45 ppb de FeNO (intervalle de confiance à 95 % : -0,11 -1,01) par augmentation d'une étendue interquartile (IQR). Elle était de 2,22 ppb par IQR (IC95 % : 0,24 - 4,20) avec le PO et de 0,99 par IQR (IC95 % : -0,70 — 2,69) avec les PM4.

Les résultats de cette étude suggèrent que l'exposition journalière à des particules oxydantes au travail pourrait être associée à une augmentation de l'inflammation pulmonaire. Effectuée chez des apprentis d'une école des métiers de la construction, elle met en évidence le risque possible d'expositions répétées survenant très tôt sur le marché du travail.

1.3 Environmental and occupational short-term exposure to airborne particles and FEV1 and FVC in healthy adults: a systematic review and meta-analysis

da Silveira Fleck, A., Sadoine, M. L., Buteau, S., Suarathana, E., Debia, M. et Smargiassi, A. (2021). Environmental and occupational short-term exposure to airborne particles and FEV1 and FVC in healthy adults: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 18(20), article10571.

Plusieurs études ont documenté l'influence de l'exposition journalière aux particules fines dans l'air ambiant de l'environnement général sur la fonction respiratoire de populations vulnérables telles les personnes âgées ou celles souffrant de maladies respiratoires chroniques. Cependant, cette relation n'est pas bien documentée chez les adultes en bonne santé, et notamment chez les travailleurs exposés aux particules de façon quotidienne à des concentrations, souvent beaucoup plus élevées que dans l'environnement général.

L'étude de Fleck *et al.* (2021) est une revue systématique de la littérature qui visait à comparer l'influence de l'exposition professionnelle et environnementale journalière aux particules respirables sur la fonction respiratoire des adultes en bonne santé. Des méta-analyses des estimations de l'association entre l'exposition journalière aux particules respirables de diamètre de moins de 4 µm (PM4) et de diamètre de moins de 2,5 µm (PM2,5) et des paramètres de la fonction respiratoire ont été effectuées. Le volume expiratoire maximal en une seconde (VEMS) et la capacité vitale forcée (CVF) sont les paramètres de la fonction respiratoire qui ont été étudiés.

Trente-trois études ont été incluses dans la méta-analyse ; 14 études additionnelles ont été synthétisées de manière qualitative. Selon les études portant sur la population d'adultes exposée dans l'environnement général, une augmentation de 10 µg/m³ de PM 2,5 était associée à une réduction du VEMS de 7,63 mL (Intervalle de confiance à 95 % : 4,63 à 10,62 mL). Une augmentation de 10 µg/m³ de PM4 en milieu professionnel était associée à une diminution du VEMS de 0,87 mL (Intervalle de confiance à 95 % : 0,37 à 1,36 mL). Des résultats similaires ont été observés avec la CVF.

L'étude suggère que les expositions professionnelles et environnementales à court terme aux particules fines sont associées à des réductions du VEMS et de la CVF chez les adultes en bonne santé. Cependant, pour une même concentration d'exposition, cette réduction serait beaucoup plus prononcée pour les expositions environnementales des adultes en bonne santé. Plusieurs facteurs pourraient expliquer les différences observées entre les populations et milieux étudiés, dont la composition, la concentration et la durée d'exposition aux particules de même que le biais du travailleur en bonne santé.

2. DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION

Dans cette section, les principaux résultats sont rappelés et comparés à ceux de la littérature actuelle. Ensuite, certaines limites des travaux sont évoquées, avant de présenter la portée des résultats et la conclusion.

L'étude de Fleck *et al.* (2022) est l'une des rares ayant évalué le potentiel oxydatif (PO) et la charge oxydative (CO) des particules respirables en milieu de travail. Un PO et une CO plus importants ont été observés, notamment pour les particules auxquels les apprentis soudeurs étaient exposés. La CO des particules auxquelles les soudeurs étaient exposés était trois fois celle des maçons. Il est difficile de comparer ces résultats à ceux des quelques autres études effectuées en milieu de travail en raison des différentes méthodes utilisées. En effet, dans les études précédentes, des tests utilisant le glutathion ou le dichlorodihydrofluorescein ont été utilisés (Graczyk *et al.*, 2016; Sauvain *et al.*, 2015) tandis que nous avons utilisé le test de dégradation de l'acide ascorbique en milieu acellulaire. Néanmoins, les mesures de PO de l'étude de Fleck *et al.* (2022) sont comparables à celles effectuées dans l'environnement général et basées sur la même méthode d'analyse (Jeong *et al.*, 2020).

L'étude de Tinawi *et al.* est aussi la première à rapporter l'association entre le FeNO et la toxicité des particules estimée à l'aide du PO et de la CO. Cette étude se distingue également des études précédentes sur l'association entre l'exposition professionnelle aux particules respirables et le FeNO car les associations sont pour des expositions de courtes durées et utilisent un devis longitudinal, contrairement à la majorité des études publiées à ce jour qui utilise un devis transversal (Meo *et al.*, 2014; Vinnikov *et al.*, 2022;). Les analyses transversales ne permettent pas de déterminer si les associations sont dues à des expositions récentes ou à des expositions prolongées. Grâce au devis utilisé, les résultats de Tinawi *et al.* améliorent notre compréhension des mécanismes physiologiques associés aux effets de l'exposition aux particules respirables. Ils suggèrent que l'exposition quotidienne aux PM₄ et leur charge oxydative, ainsi que celles des PM_{2,5}, sont associées à une augmentation du FeNO. Bien que les changements de FeNO par augmentation d'un interquartile des expositions soient faibles, les résultats indiquent que l'exposition aux particules présentes sur le lieu de travail, en particulier celles qui sont oxydatives, pourrait induire une réponse inflammatoire.

Les résultats de Tinawi *et al.* contrastent avec ceux des quelques études précédentes qui ont porté sur les associations avec les expositions de courtes durées aux particules respirables en milieu de travail. En effet, ces études ont rapporté une diminution du FeNO ou aucune association (Fell *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2003). La divergence avec les résultats précédents suggère que la composition des particules pourrait jouer un rôle spécifique dans la réponse inflammatoire. L'augmentation de FeNO observée par Tinawi *et al.*, avec l'exposition journalière, pourrait être associée à une réponse allergique. En effet, il est possible que les associations observées soient dues à l'exposition des

soudeurs à des métaux allergéniques, tels que le nickel et le chrome (Wyman et Hines, 2018). Même s'il est impossible de vérifier ceci, les résultats de Tinawi *et al.* suggèrent que la mesure de la CO des particules respirables est une mesure prometteuse pour estimer l'exposition des travailleurs, car les associations observées avec FeNO étaient moins variables avec la CO (concentration massique x PO) qu'avec la concentration massique de particules.

L'étude da Silveira Fleck *et al.* (2021) est également originale, car elle compare, pour la première fois, l'influence de l'exposition professionnelle et environnementale aux particules respirables sur la fonction respiratoire des adultes en bonne santé. Pour une exposition similaire, l'exposition journalière aux particules respirables serait associée à une réduction beaucoup moins prononcée de la fonction respiratoire chez les travailleurs que chez les adultes de la population générale. L'association observée chez les travailleurs était aussi moins variable que celle rapportée pour la population générale, malgré que des particules très distinctes aient été étudiées (particules de ciment, de coton, de moteurs diesel et de bois). Ceci suggère une cohérence dans l'association sans égard à la composition des particules. Cette observation se distingue des résultats sur l'augmentation de l'inflammation pulmonaire observée avec la charge oxydative des particules respirables de Tinawi *et al.* (2026). Des études additionnelles sont nécessaires pour clarifier les effets respiratoires des particules de composition et potentiel oxydatif différents.

Malgré l'originalité des travaux du projet, ils contiennent plusieurs limites. Premièrement, les comparaisons inter-milieux sont limitées, car seuls trois milieux différents ont été étudiés avec une population jeune d'apprentis ; des études supplémentaires mesurant le potentiel oxydatif et la charge oxydative des particules sont nécessaires pour mieux comprendre la toxicité des particules auxquelles les travailleurs sont exposés. Néanmoins les contrastes observés entre les milieux étudiés suggèrent que les composants des particules des divers milieux pourraient influencer la santé respiratoire.

Cependant, nous n'avons pas déterminé les composants des particules de tous les échantillons collectés et les composants présentant un fort potentiel oxydatif sont inconnus. Il est toutefois probable que certains métaux contribuent au potentiel oxydatif plus élevé des particules auxquels les soudeurs étaient exposés. Des études soulignent d'ailleurs un effet des particules métalliques sur la mesure du PO (Godri *et al.*, 2010 ; Visentin *et al.*, 2016).

Nous avons également utilisé une seule technique de mesure pour estimer le PO des particules. Toutefois, certains composants organiques des particules pourraient ne pas réagir avec l'acide ascorbique du test que nous avons utilisé. Des estimations avec d'autres méthodes seraient nécessaires pour mieux documenter le PO des particules auxquelles les travailleurs de divers milieux sont exposés.

La co-exposition des travailleurs à des polluants gazeux et à des polluants particuliers peut interférer dans les associations entre les particules respirables, leur charge oxydative et le FeNO. Le monoxyde de carbone et le dioxyde d'azote ont été mesurés lors des activités de soudage et détectés pour la menuiserie. La présence de ces contaminants pourrait expliquer en partie les associations observées.

De plus, malgré que le devis avec mesures répétées soit utile pour comprendre l'influence des expositions quotidiennes sur l'inflammation pulmonaire, cette association demeure difficile à évaluer, car une inflammation résiduelle des jours précédents pourrait être présente chez les travailleurs. Ainsi, la conduite d'études additionnelles est essentielle pour confirmer les résultats de Tinawi *et al.*

Un faible nombre d'études sur les associations entre l'exposition journalière aux particules respirables et la fonction pulmonaire, recensées de façon systématique, a été considéré dans les méta-analyses. Ceci s'explique par le fait que différentes unités de mesure (p. ex. changement du paramètre de fonction respiratoire en mL, en %, en % log, en % ou log % par rapport à la valeur prédite) ont été rapportées par les études. En raison du faible nombre d'études rapportant des mesures similaires, les facteurs expliquant l'hétérogénéité des estimations d'association, telle la stratégie de mesure de l'exposition (ex. mesures personnelles ou en poste fixe), les devis d'études (ex. études de panel ou comparant les travailleurs avant et après le quart de travail) et les sources d'exposition n'ont pu être étudiés. Une standardisation des unités de mesure des paramètres de la fonction respiratoire s'avère importante pour les études futures.

Malgré ces limites, les résultats du projet améliorent notre compréhension de l'exposition des travailleurs aux particules respirables et de leurs effets sur la santé respiratoire. Les contrastes importants de PO des particules auxquelles les travailleurs des trois milieux étaient exposés et l'association plus précise observée entre la CO et l'inflammation pulmonaire illustrent l'intérêt de mesurer le PO et la CO des particules pour compléter l'estimation de l'exposition. Ces mesures de PO et de CO améliorent ainsi l'évaluation classique de l'exposition professionnelle faite uniquement avec des concentrations massiques en considérant le potentiel de stress oxydant des contaminants.

En conclusion, les analyses d'association indiquent que l'augmentation d'une exposition de quelques heures aux particules respirables en milieu de travail est associée à l'augmentation de l'inflammation pulmonaire et à la diminution de la fonction respiratoire au niveau d'exposition actuelle. Les résultats indiquent que le contrôle quotidien de l'exposition aux particules respirables, notamment à celles plus oxydantes, est important pour limiter l'inflammation pulmonaire quotidienne et les effets sanitaires possibles qui pourraient être occasionnés par une inflammation pulmonaire répétée. Des campagnes de sensibilisation visant les méthodes de captation à la source, les méthodes de travail visant à limiter l'émission de contaminants et la formation sur la protection respiratoire pourraient cibler des milieux présentant des charges de particules oxydatives plus élevées et potentiellement plus toxiques.

BIBLIOGRAPHIE

- Ayres, J. G., Borm, P., Cassee, F. R., Castranova, V., Donaldson, K., Ghio, A., . . .
Froines, J. (2008). Evaluating the toxicity of airborne particulate matter and
nanoparticles by measuring oxidative stress potential: A workshop report and
consensus statement. *Inhalation Toxicology*, 20(1), 75-99.
<https://doi.org/10.1080/08958370701665517>
- CAREX Canada. (n.d.). *eWork online*. CAREX Canada.
<https://www.carexcanada.ca/ework/>
- da Silveira Fleck, A., Debia, M., Ryan, P. E., Couture, C., Traub, A., Evans, G. J., . . .
Smargiassi, A. (2022). Assessment of the oxidative potential and oxidative burden
from occupational exposures to particulate matter. *Annals of Work Exposures and
Health*, 66(3), 379-391. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxab086>
- da Silveira Fleck, A., Sadoine, M. L., Buteau, S., Suarthana, E., Debia, M. et Smargiassi,
A. (2021). Environmental and occupational short-term exposure to airborne
particles and FEV1 and FVC in healthy adults: A systematic review and meta-
analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*,
18(20), article 10571. <https://doi.org/10.3390/ijerph182010571>
- Environmental Protection Agency. (2009). *Integrated science assessment for particulate
matter*. EPA.
- Fell, A. K. M., Notø, H., Skogstad, M., Nordby, K.-C., Eduard, W., Svendsen, M. V., . . .
Kongerud, J. (2011). A cross-shift study of lung function, exhaled nitric oxide, and
inflammatory markers in blood in Norwegian cement production workers.
Occupational & Environmental Medicine, 68, 799-805.
<https://doi.org/10.1136/oem.2010.057729>
- GBD 2016 Occupational Chronic Respiratory Risk Factors Collaborators. (2020). Global
and regional burden of chronic respiratory disease in 2016 arising from non-
infectious airborne occupational exposures: A systematic analysis for the Global
Burden of Disease Study 2016. *Occupational & Environmental Medicine*, 77, 142-
150. <https://doi.org/10.1136/oemed-2020-106627>
- Godri, K. J., Green, D. C., Fuller, G. W., Dall'Osto, M., Beddows, D. C., Kelly, F. J., . . .
Mudway, I. S. (2010). Particulate oxidative burden associated with firework activity.
Environmental Science & Technology, 44(21), 8295-8301.
<https://doi.org/10.1021/es1016284>
- Graczyk, H., Lewinski, N., Zhao, J., Concha-Lozano, N. et Riediker, M. (2016).
Characterization of tungsten inert gas (TIG) welding fume generated by apprentice

- welders. *Annals of Occupational Hygiene*, 60(2), 205-219.
<https://doi.org/10.1093/annhyg/mev074>
- Jeong, C.-H., Traub, A., Huang, A., Hilker, N., Wang, J. M., Herod, D., . . . Evans, G. J. (2020). Long-term analysis of PM2.5 from 2004 to 2017 in Toronto: Composition, sources, and oxidative potential. *Environmental Pollution*, 260 Pt. B, article 114652. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114652>
- Kim, J. Y., Wand, M. P., Hauser, R., Mukherjee, S., Herrick, R. F. et Christiani, D. C. (2003). Association of expired nitric oxide with occupational particulate exposure. *Environmental Health Perspectives*, 111(5), 676-680.
- Meo, S. A., Alsaaran, Z. F. et Alshehri, M. K. (2014). Effect of exposure to cement dust on fractional exhaled nitric oxide (FeNO) in non-smoking cement mill workers. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences*, 18(10), 1458-1464.
- Sauvain, J., Deslarzes, S., Storti, F. et Riediker, M. (2015). Oxidative potential of particles in different occupational environments: A pilot study. *Annals of Occupational Hygiene*, 59(7), 882-894. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mev024>
- Tinawi, A., Plante, C., da Silveira Fleck, A., Giasson, E., Valois, I., Couture, C., . . . Smargiassi, A. (2026). Lung inflammation from daily exposure to airborne oxidative particulate matter in a trade school. *Annals of Work Exposures and Health*, 70(2), article wxag009. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxag009>
- Vinnikov, D., Tulekov, Z. et Blanc, P. D. (2022). Fractional exhaled NO in a metalworking occupational cohort. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 95(3), 701-708. <https://doi.org/10.1007/s00420-021-01801-z>
- Visentin, M., Pagnoni, A., Sarti, E. et Pietrogrande, M. C. (2016). Urban PM2.5 oxidative potential: Importance of chemical species and comparison of two spectrophotometric cell-free assays. *Environmental Pollution*, 219, 72-79.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.047>
- Wyman, A. E. et Hines, S. E. (2018). Update on metal-induced occupational lung disease. *Current Opinion in Allergy and Clinical Immunology*, 18(2), 73-79.
<https://doi.org/10.1097/ACI.0000000000000420>