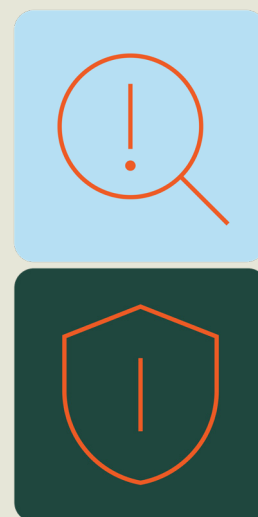


Évaluation et caractérisation de l'exposition aux fumées et leurs composantes métalliques lors d'activités de soudage au Québec

Rapport de recherche synthèse

Michèle Bouchard¹, Jairo Buitrago Cortes¹, Naïma El Majidi¹,
Jonathan Côté¹, Denis Dieme¹, Marc Mantha¹,
Philippe Sarazin², Capucine Ouellet², Loïc Wingert²

RS-1215-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.

Mission

Dans l'esprit de la *Loi sur la santé et la sécurité du travail* (LSST) et de la *Loi sur les accidents du travail et les maladies professionnelles* (LATMP), la mission de l'IRSST est de : Contribuer à la santé et à la sécurité des travailleuses et travailleurs par la recherche, l'expertise de ses laboratoires, ainsi que la diffusion et le transfert des connaissances, et ce, dans une perspective de prévention et de retour durables au travail.

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, 2025
ISBN 978-2-89797-325-4 (PDF)

<https://doi.org/10.70010/SWBK9077>

© Institut de recherche Robert-Sauvé en santé
et en sécurité du travail, 2025

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



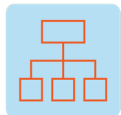
Identification des dangers, estimation et évaluation des risques



Élimination des dangers et maîtrise des risques



Métrologie appliquée à la SST



Organisation du travail



Santé mentale et psychologique



Population, société et SST

REMERCIEMENTS

Nous remercions toutes les personnes ayant participé à cette étude ainsi que les trois écoles d'apprentis soudeurs qui ont ouvert leur porte pour la réalisation de cette étude.

Nous remercions nos stagiaires pour l'aide terrain dans ce projet.

SOMMAIRE

Problématique et objectifs : Les fumées de soudage sont classées comme cancérogènes chez l'humain et sont associées à un risque accru de plusieurs autres effets sur la santé des soudeurs. L'objectif général de cette recherche était d'établir la nature et le niveau d'exposition aux composantes métalliques lors d'activités de soudage chez des apprentis soudeurs au Québec, en effectuant des mesures dans différentes matrices biologiques et dans l'air lors d'un suivi longitudinal.

Méthode : Cette recherche a été réalisée dans des écoles d'apprentis soudeurs de la région de Montréal, où les techniques de soudage les plus courantes sont utilisées. Elle a impliqué un suivi de l'exposition aux fumées et ses constituants métalliques chez 116 individus lors d'activités de soudage impliquant différents procédés : soudage à l'arc avec électrode enrobée (SMAW), soudage à l'arc sous gaz avec fil plein (GMAW) et soudage à l'arc avec fil fourré (FCAW). La mesure sériée de multiéléments métalliques a été effectuée dans des matrices biologiques multiples (urine, ongles, cheveux) afin d'évaluer les éléments métalliques les plus absorbés dans l'organisme et les matrices biologiques les plus pertinentes pour le suivi des travailleurs, de même que des facteurs influençant les doses absorbées. L'échantillonnage des fumées de soudage a également été réalisé dans la zone respiratoire de travailleurs lors de journées typiques.

Résultats : Le suivi des niveaux biologiques avant le début du programme, puis au début et à la fin des modules successifs SMAW, GMAW et FCAW a montré que les concentrations de fer (Fe), de manganèse (Mn), de nickel (Ni) et de chrome (Cr) augmentaient de façon constante au fil du temps dans les ongles des mains et des pieds et les cheveux, tout au long du programme de soudage. Les concentrations d'arsenic (As) ont progressivement augmenté dans les ongles des mains et les cheveux, mais pas dans les ongles des pieds. Les concentrations de cobalt (Co) dans les ongles des mains et des pieds ont aussi augmenté au fil du temps pendant le programme de soudage (mais pas dans les cheveux). Les niveaux de Mn, de Fe et de Ni dans l'urine étaient plus élevés à la fin du module SMAW par rapport au début de ce module, mais ne montraient pas d'augmentation pour les autres modules suivants, soit le GMAW et FCAW. L'augmentation de la durée d'exposition au cours du programme de soudage (variable « temps ») était le principal facteur prédictif des niveaux de métaux les plus absorbés, en particulier du Fe, du Mn, du Ni et du Cr. L'âge, l'origine ethnique et le revenu annuel du ménage ont eu un effet sur les niveaux de métaux et ont été considérés comme des facteurs de confusion.

Conclusion : Cette étude est la première au Québec et au Canada à avoir utilisé simultanément plusieurs matrices biologiques pour évaluer l'exposition à divers métaux chez des apprentis tout au long de leur programme de formation en soudage. Elle a démontré que même l'exposition aux fumées de soudage dans un environnement

d'apprentissage contrôlé peut entraîner une augmentation significative des doses absorbées de plusieurs métaux et que les concentrations de métaux mesurées simultanément dans l'urine, les cheveux et les ongles sont des biomarqueurs pertinents de l'exposition aux fumées de soudage dans certaines conditions.

Le présent rapport résume le contenu de trois articles qui ont détaillé les résultats en lien avec l'objectif de cette étude.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	1
1.1 Problématique de santé et sécurité au travail, pertinence et importance du sujet.....	1
1.2 État des connaissances scientifiques ou techniques sur le sujet.....	3
1.2.1 Les procédés et techniques de soudage	3
1.2.2 L'exposition aux gaz et aux particules métalliques	4
1.2.3 Évaluation des niveaux d'exposition aux fumées de soudage et leurs composantes métalliques	5
1.2.4 Facteurs pouvant influencer les évaluations de l'exposition.....	7
1.2.5 Suivi de l'exposition à partir de mesures biologiques dans des matrices multiples	8
1.3 Objectifs.....	10
2. RÉSUMÉS DES ARTICLES	13
2.1 Résumé de l'article 1	13
2.2 Résumé de l'article 2	16
2.3 Résumé de l'article 3	18
3. DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION.....	21
3.1 Portée du projet de recherche.....	21
3.1.1 Ampleur et nature de l'exposition aux fumées et leurs composantes métalliques lors de procédés traditionnels de soudage.....	21
3.1.2 Corrélations entre les matrices et entre les métaux	25
3.1.3 Différences dans l'abondance relative des métaux selon les matrices.....	25
3.1.4 Évaluation des mesures dans l'air et des liens avec les niveaux biologiques	26
3.1.5 Principaux facteurs influençant les teneurs biologiques en métaux	27
3.2 Limites de l'étude	29
3.3 Retombées de l'étude	30
3.4 Recommandations en termes de mesures de prévention	30
BIBLIOGRAPHIE	32

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Procédés de soudage utilisés dans les écoles d'apprentis soudeurs du Québec.....	4
---	---

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Séquence des prélèvements biologiques chez les apprentis soudeurs tout au long du programme de formation en soudage et les différents procédés ciblés (SMAW, GMAW et FCAW) Écoles d'apprentis soudeurs	12
-----------	--	----

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Acronyme	Définition
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
Al	Aluminium
APR	Appareils de protection respiratoire
As	Arsenic
Ba	Baryum
Be	Béryllium
BEI®	<i>Biological exposure indices</i> (indices biologiques de l'exposition)
Cr ou Cr ^{IV}	Chrome ou Chrome hexavalent
Co	Cobalt
COPD	<i>Chronic obstructive pulmonary disease</i> (maladie pulmonaire chronique obstructive)
Cu	Cuivre
ECMS	Enquête canadienne sur les mesures de la santé (<i>Canadian Health Measures Survey</i> (CHMS))
FCAW	<i>Flux Cored Arc Welding</i> (soudage semi-automatique à l'arc avec fil fourré)
Fe	Fer
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i> (soudage semi-automatique à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein)
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i> (soudage manuel à l'arc avec électrode de tungstène sous atmosphère gazeuse)
IARC	International Agency for Research on Cancer (Centre international de Recherche sur le Cancer)
IC ou IC 95	Intervalle de confiance ou intervalle de confiance à 95 %
LEV	Systèmes de ventilation locale
Mn	Manganèse
NHANES	<i>National Health and Nutrition Examination Survey</i>
Ni	Nickel
PUF	Particules ultrafines
Pb	Plomb
RSST	<i>Règlement sur la santé et la sécurité du travail du Québec</i>

Sb	Antimoine
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i> (soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée)
TLV-TWA®	<i>Threshold limit value – Time weighted average</i> (valeur limite d'exposition pondérée sur 8 heures)
V	Vanadium
VEA	Valeur d'exposition admissible
VLEP	Valeur limite d'exposition professionnelle
Zn	Zinc

1. INTRODUCTION

1.1 Problématique de santé et sécurité au travail, pertinence et importance du sujet

Le métier de soudeur est un secteur d'activité important au Québec et plus largement au Canada. Il implique un grand nombre de travailleurs avec une demande croissante. Selon les dernières statistiques, le nombre de travailleurs soudeurs québécois s'élevait à environ 21 250 salariés en 2021 (Emploi et Développement social Canada, 2024). Au Canada, ce nombre a été estimé à environ 79 600 travailleurs soudeurs en 2021, 93 % de ces travailleurs étant des hommes (Emploi et Développement social Canada, 2024). Les trois secteurs d'activités qui comptent le plus grand nombre de travailleurs exposés sont les entrepreneurs en matériel de construction, les machines et équipements commerciaux et industriels, ainsi que la réparation et l'entretien d'automobiles. Les trois principaux groupes professionnels exposés aux fumées de soudage sont les soudeurs et les opérateurs de machines connexes, les aides de soutien des métiers et de manœuvres en construction, les techniciens en entretien automobile, les mécaniciens de camions et d'autobus et les réparateurs de machines, ainsi que les mécaniciens de chantier et les mécaniciens industriels (CAREX Canada, 2023).

Le métier de soudeur est considéré à risque, puisque les fumées de soudage ont été classées comme cancérogènes chez l'humain (groupe 1) par le Centre international de Recherche sur le Cancer (CIRC ou International Agency for Research on Cancer en anglais) (IARC, 2024). Bien que basée principalement sur les soudeurs du milieu de l'acier inoxydable, cette classification ne se limite pas à ce type de milieu. Plusieurs études ont montré une association entre l'exposition aux fumées de soudage et le cancer du poumon (Loomis *et al.*, 2022 ; MacLeod *et al.*, 2017). Selon la Société canadienne du cancer (CCS), « environ 310 cancers du poumon sont attribuables à l'exposition aux fumées de soudage chaque année au Canada, ce qui représente 1,3 % de cancers du poumon diagnostiqués annuellement » (CAREX Canada, 2023).

Par ailleurs, l'exposition aux fumées de soudage dans différents milieux a été associée à des maladies ou pathologies respiratoires, notamment le développement de pneumonies (Palmer *et al.*, 2009, 2003), de l'asthme (Hannu *et al.*, 2005; Wittczak *et al.*, 2012), de bronchite et de respiration sifflante (Lillienberg *et al.*, 2008), de pneumoconiose dans les alumineries (Iijima *et al.*, 2017), de la fièvre des fondeurs (Antonini *et al.*, 2003; Langley, 1991; Liss, 1985; Szűcs-Somlyó *et al.*, 2023) ainsi qu'à une diminution de la fonction pulmonaire (Antonini, 2003; Lehnert *et al.*, 2015). Certaines études chez les soudeurs ont aussi montré un risque accru de développer une maladie pulmonaire chronique obstructive (*Chronic obstructive pulmonary disease* (COPD)), bien que la relation causale ne soit pas établie clairement (Koh *et al.*, 2015; Riccelli *et al.*, 2018).

Des effets neurotoxiques associés à l'inhalation de fumées de soudage et au manganèse (Mn) contenu dans celles-ci ont été rapportés chez l'animal (Antonini, O'Callaghan, *et al.*, 2006, 2009). L'exposition aux fumées de soudage ou aux métaux qu'elles contiennent a également été associée à des troubles neurologiques et neurocomportementaux chez les travailleurs, dont des cas de manganisme (Antonini, Santamaria, *et al.*, 2006; Asildağ *et al.*, 2024; Bailey *et al.*, 2018; Baker, Criswell, *et al.*, 2015; Bowler *et al.*, 2003; Bowler, Nakagawa, *et al.*, 2007; Bowler, Roels, *et al.*, 2007; Ellingsen *et al.*, 2015; Flynn, 2009; Hassani *et al.*, 2016; Rahmani *et al.*, 2016; Ross *et al.*, 2013).

Des cas de syndromes parkinsoniens ont aussi été rapportés dans plusieurs études de cas chez des soudeurs (Criswell *et al.*, 2011; Sato *et al.*, 2000; Sen *et al.*, 2011), ainsi qu'une prévalence plus élevée de parkinsonisme chez les soudeurs par rapport à un groupe témoin de la population générale (Racette *et al.*, 2005, 2012). Néanmoins, sauf dans l'étude de Racette *et al.* (2017), la plupart des études de cohortes n'ont pas confirmé d'association entre l'exposition aux fumées de soudage et le syndrome parkinsonien (Baker, Criswell, *et al.*, 2015a; Criswell *et al.*, 2018; Fryzek *et al.*, 2005; Kenborg *et al.*, 2012; Marsh et Gula, 2006; Mortimer *et al.*, 2012; van Der Mark *et al.*, 2015). De plus, certaines études ont montré un risque d'effets cardiovasculaires chez les soudeurs ainsi qu'une augmentation du stress oxydant (Badding *et al.*, 2014; Hossain *et al.*, 2015; Li, Hedmer, Kåredal, *et al.*, 2015; Li, Hedmer, Wojdacz, *et al.*, 2015; Mocevic *et al.*, 2015).

Par ailleurs, une réaction inflammatoire a été rapportée chez des rats exposés à des fumées de soudage (Antonini *et al.*, 2007; Zeidler-Erdely *et al.*, 2012). Chez des soudeurs indiens (*Metal-Arc welders*), Moitra *et al.* (2018) ont montré une mobilisation des macrophages et une dysfonction respiratoire; d'autres auteurs ont aussi observé une réaction inflammatoire chez les soudeurs (Dierschke *et al.*, 2017; Zeidler-Erdely *et al.*, 2012). Des effets cytotoxiques et génotoxiques ont en outre été notés (Antonini *et al.*, 2009; Knudsen *et al.*, 1992; Wultsch *et al.*, 2014). L'exposition aux fumées de soudage et les effets sur la santé associés sont donc une préoccupation chez les soudeurs.

Parmi les composantes métalliques préoccupantes pour la santé des travailleurs, on compte le Mn, le chrome (Cr) et le nickel (Ni), notamment. Le Mn est un élément essentiel agissant comme cofacteur pour plusieurs métalloprotéines enzymatiques; ses niveaux cellulaires sont régulés par des transporteurs et protéines régulatrices assurant l'homéostasie, mais, à fortes doses, il peut être neurotoxique (Chen *et al.*, 2018; Witholt *et al.*, 2000). Le Cr et le Ni, sous certaines formes, se sont avérés cancérigènes selon des études animales et épidémiologiques chez des travailleurs (chrome hexavalent (Cr^{VI}); oxyde et sous-sulfure de Ni) (National Institutes of Health [NIH], 1996a, b, c). Les composés du Ni ainsi que le Cr^{VI} présents dans les fumées de soudage ont aussi été classés comme cancérigènes reconnus chez l'humain (groupe 1), par le CIRC; le CIRC a par ailleurs classé le Ni métallique comme cancérigène possible pour l'homme (groupe 2B) (IARC, 1990, 2012). Les métaux comme le Ni et le Cr^{VI} sont aussi connus pour causer

des stress oxydatifs au niveau cellulaire et une réponse inflammatoire (Jaishankar *et al.*, 2014; NIH, 1996a, b, c; Oller *et al.*, 1997).

L'exposition aux nanoparticules d'oxydes métalliques a également été associée à des réactions inflammatoires chez les soudeurs. L'étude d'Andujar *et al.* (2014) est la première à avoir identifié des nanoparticules d'oxydes métalliques dans les poumons de soudeurs (oxyde de fer (Fe), Mn et Cr essentiellement) et à avoir rapporté un lien entre l'exposition à ces nanoparticules d'oxydes métalliques reliées au soudage et des inflammations pulmonaires. Par ailleurs, l'étude de Prémé *et al.* (2016) a montré le développement de fibrose péribronchiolaire, périvasculaire et alvéolaire chez des souris exposées de façon répétée à des nanoparticules provenant des fumées de soudage. Plus récemment, Audureau *et al.* (2018) ont aussi montré des modifications de l'expression génique après exposition de macrophages humains à ces nanoparticules.

Il est donc important de bien évaluer et de contrôler l'exposition aux fumées de soudage et leurs composantes métalliques principales en milieu de travail. Or, peu d'études québécoises ont été publiées pour évaluer les niveaux d'exposition aux fumées de soudage et leurs composés métalliques lors d'activités de soudage au Québec (Debia *et al.*, 2014; El-Zein, 2003; Smargiassi *et al.*, 2000). Par ailleurs, le nombre de travailleurs étudiés était limité.

1.2 État des connaissances scientifiques ou techniques sur le sujet

1.2.1 Les procédés et techniques de soudage

L'activité de soudage consiste à assembler des métaux de même nature, avec ou sans matériau de remplissage, par diverses technologies. Le matériau de remplissage, également appelé consommable, est généralement une électrode ou un fil revêtu qui contribue au métal. Pour permettre la fusion des métaux, il est nécessaire de fournir de l'énergie; selon l'énergie fournie, trois grandes catégories de soudage ont été développées : i) le soudage à l'arc électrique, où la chaleur est générée par un arc électrique, entre une électrode et la pièce à souder; ii) le soudage par résistance, utilisant un courant électrique sans produire d'arc; iii) le soudage au gaz ou procédé oxygaz, utilisant l'oxygène et un gaz combustible pour produire une flamme (Godin, 2014). Les technologies les plus courantes, entrant dans la catégorie de soudage à l'arc électrique, sont résumées dans le tableau 1 (Blandin *et al.*, 2018; Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail [CCHST], 2017; Godin, 2014). Ce sont les procédés de soudage appris dans les écoles de soudage-montage du Québec (ex. : le Centre Anjou, l'Institut Technique Aviron de Montréal et le centre de formation en métallurgie de Laval).

Tableau 1. Procédés de soudage utilisés dans les écoles d'apprentis soudeurs du Québec

Sigle du procédé	Désignation anglaise	Désignation française
SMAW ^a	<i>Shielded Metal Arc Welding</i>	Soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée
GTAW ^b	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>	Soudage manuel à l'arc avec électrode de tungstène sous atmosphère gazeuse
GMAW ^c	<i>Gas Metal Arc Welding</i>	Soudage semi-automatique à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein
FCAW ^d	<i>Flux Cored Arc Welding</i>	Soudage semi-automatique à l'arc avec fil fourré

^a Procédé de soudage manuel où un métal d'apport est fusionné aux pièces à souder à l'aide d'un courant électrique et où la fusion est protégée par l'enrobage de la baguette qui remonte à la surface de la soudure pendant l'opération; ce procédé est couramment utilisé dans les chantiers de construction, car il est peu affecté par les courants d'air; il est également connu sous le nom de MMA (*Metal Manual Arc*) = soudage manuel à la baguette.

^b Communément appelé TIG (*Tungsten Inert Gas*); procédé de soudage avec application manuelle du métal par le soudeur, mais où un courant fort passe par une électrode de tungstène pour former un bain de fusion; il est utilisé pour souder des parois minces.

^c Procédé semi-automatique très rapide où un courant électrique passe par une électrode d'apport pour la fusionner aux pièces à souder, mais ne pouvant pas être utilisé dans les courants d'air; sous-types : MAG (*Metal Active Gas*) ou MIG (*Metal Inert Gas*) = soudage à l'arc en atmosphère active ou inerte avec électrode fusible.

^d Procédé semi-automatique similaire à GMAW, mais l'électrode contient un « flux » qui remonte à la surface de la soudure comme le SMAW; le bain de fusion est par ailleurs protégé par un gaz inerte; ce procédé est très couramment utilisé, puisque l'exécution du soudage se fait rapidement.

1.2.2 L'exposition aux gaz et aux particules métalliques

Les fumées de soudage exposent les travailleurs à plusieurs contaminants incluant de nombreux métaux. Les fumées générées sont un mélange complexe et variable de gaz et de particules, selon le type de procédé de soudage utilisé. Compte tenu de la plage de taille respirable des particules (particules de moins de 10 µm), celles-ci peuvent atteindre les poumons profonds (alvéoles). La composition des fumées de soudage et la taille des particules sont déterminées par un certain nombre de facteurs, notamment le procédé de

soudage, la composition métallique de base et de l'électrode consommable, la présence de gaz de protection et la température utilisée.

Les émanations de soudage d'acier doux contiennent principalement du Fe, mais également une certaine quantité de métaux ajoutés à l'acier (additifs) pour améliorer les propriétés de ce matériau (Cr, Ni, Mn, vanadium (V), cobalt (Co), cuivre (Cu), etc.) (Ellingsen *et al.*, 2017). Les aciers inoxydables contiennent de plus grandes quantités de Cr ou de Ni et moins de Fe (Keane *et al.*, 2009). Les alliages de Ni ont beaucoup plus de Ni dans les fumées et moins de Fe. Tous les aciers contiennent par ailleurs du Mn.

Des valeurs d'exposition admissible (VEA) sont disponibles pour les fumées de soudage et leurs principales composantes métalliques dans le *Règlement sur la santé et la sécurité du travail* (RSST, RLRQ, c. S-2.1, r. 13) ainsi que les valeurs guides de l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH, 2024). Les VEA pour les fumées et les métaux du RSST correspondent aux poussières dites « totales » alors que les valeurs recommandées par l'ACGIH pour les métaux prennent en compte la fraction mesurée (inhalable, respirable). Aucune valeur n'est actuellement recommandée par l'ACGIH pour les fumées de soudage. Des indices biologiques d'exposition (*Biological Exposure Indices* en anglais ou BEIs[®]) ont aussi été proposés par l'ACGIH (2024) pour le cadmium (Cd) urinaire et sanguin (5 µg/g créatinine et 5 µg/L, respectivement), le Co urinaire (15 µg/L), le Cr total urinaire (0,7 µg/L), le Ni urinaire (5 µg/L) et le Pb sanguin (200 µg/L), alors qu'aucun BEI[®] n'est disponible pour l'aluminium (Al), le béryllium (Be), le Fe, le Mn, le Cu et le zinc (Zn).

1.2.3 Évaluation des niveaux d'exposition aux fumées de soudage et leurs composantes métalliques

Peu d'études québécoises ont été publiées pour évaluer les concentrations d'exposition aux fumées de soudage et leurs composantes métalliques dans l'air lors d'activités de soudage. On peut tout de même citer une étude ayant évalué les concentrations de particules ultrafines (PUF) présentes dans les fumées (Debia *et al.*, 2014) et deux études ayant évalué les concentrations d'exposition dans l'air à certains métaux chez des soudeurs au Québec (El-Zein, 2003; Smargiassi *et al.*, 2000). Dans une étude québécoise réalisée auprès d'apprentis-soudeurs, dans des établissements de formation professionnelle en soudage de la région de Montréal, Debia *et al.* (2014) ont montré une exposition élevée des apprentis-soudeurs à des PUF. Dans une autre étude également réalisée auprès d'apprentis-soudeurs au Québec, des valeurs de concentrations de métaux dans les fumées de soudage dépassant les valeurs limites dans l'air, établies par l'ACGIH, ainsi que des effets respiratoires ont été observés (El-Zein, 2003). Smargiassi *et al.* (2000) ont quant à eux déterminé les concentrations de Mn (total et respirable) dans l'air de la zone respiratoire de travailleurs d'une manufacture effectuant des opérations de soudage lors de l'assemblage des pièces de machinerie lourde d'excavation. Ces auteurs

ont aussi rapporté des concentrations dépassant la valeur limite de seuil TLV-TWA® sur 8 heures de l'ACGIH pour 70 % des niveaux d'exposition mesurés.

Quelques études dans d'autres régions du Canada ont également été réalisées (Arrandale *et al.*, 2015; Dueck *et al.*, 2021; Korczynski, 2000; Quémerais *et al.*, 2018). En particulier, Korczynski (2000) a réalisé des échantillonnages personnels d'air dans la zone respiratoire de travailleurs de huit industries de soudage au Manitoba; les concentrations de Mn et de Fe provenant des fumées de soudage ont été mesurées et dépassaient fréquemment les valeurs établies par l'ACGIH pour ces composés. Des études réalisées dans d'autres pays ont confirmé que les concentrations de fumées et de leurs composantes métalliques dans l'air pouvaient être élevées durant le travail de soudage (Baker, Simpson, *et al.*, 2015; Bocca *et al.*, 2023; Čargonja *et al.*, 2023; Ellingsen *et al.*, 2017; Lu *et al.*, 2005; Mehrifar *et al.*, 2020; Pesch *et al.*, 2018; Reiss *et al.*, 2016; Rossbach *et al.*, 2006; Ward *et al.*, 2017; Weiss *et al.*, 2013).

En complément des mesures de concentrations dans l'air, la surveillance biologique de l'exposition (autrement dit biosurveillance), qui est la mesure directe d'un biomarqueur d'exposition (un contaminant ou ses métabolites) dans une matrice biologique, est maintenant largement utilisée pour estimer l'exposition interne (doses absorbées) à des composés chimiques (Angerer *et al.*, 2011; Faure *et al.*, 2020; Hays et Aylward, 2009). Pour évaluer les doses réellement absorbées de métaux chez des soudeurs, plusieurs études transversales de surveillance biologique de l'exposition aux métaux ont été réalisées aux États-Unis (Baker, Simpson, *et al.*, 2015 ; Reiss *et al.*, 2016), au Canada (Arrandale *et al.*, 2015; Quémerais *et al.*, 2018), en Allemagne, Belgique, États-Unis, France, Russie et Chine chez des soudeurs en exercice (Ellingsen *et al.*, 2017; Grashow *et al.*, 2014; Hoet *et al.*, 2012; Iarmarcovai *et al.*, 2007; Persoons *et al.*, 2014; Pesch *et al.*, 2012, 2018; Ward *et al.*, 2017; Weiss *et al.*, 2013). Ces études ont montré une relation entre l'exposition aux fumées de soudage et la présence des métaux dans des matrices biologiques comme le sang, les ongles, les cheveux et l'urine (Arrandale *et al.*, 2015; Ellingsen *et al.*, 2017; Reiss *et al.*, 2016; Ward *et al.*, 2017). Néanmoins, la plupart des études disponibles ont ciblé un ou quelques métaux en particulier (Baker, Simpson, *et al.*, 2015; Ellingsen *et al.*, 2017; Hoet *et al.*, 2012; Lu *et al.*, 2005; Persoons *et al.*, 2014; Pesch *et al.*, 2018; Quémerais *et al.*, 2018; Reiss *et al.*, 2016; Rossbach *et al.*, 2006; Ward *et al.*, 2017; Weiss *et al.*, 2013). Seules quelques études ont ciblé un plus grand nombre de métaux (de 5 à 8 métaux) (Arrandale *et al.*, 2015; Grashow *et al.*, 2014; Iarmarcovai *et al.*, 2007).

Dans la plupart des études chez les soudeurs, l'urine était la matrice biologique la plus utilisée pour évaluer l'exposition aux métaux présents dans les fumées de soudage (avec des mesures du Ni, Cr, Mn surtout, mais également Al, Cd, Co, Cu, Pb, antimoine (Sb), Zn) (Arrandale *et al.*, 2015; Baker, Criswell, *et al.*, 2015; Ellingsen *et al.*, 2017; Hoet *et al.*, 2012; Iarmarcovai *et al.*, 2007; Persoons *et al.*, 2014; Pesch *et al.*, 2018; Quémerais *et al.*, 2018; Rossbach *et al.*, 2006; Weiss *et al.*, 2013). Néanmoins, certaines études chez les

soudeurs identifient les ongles comme matrice utile pour le suivi de l'exposition professionnelle au Mn, Cd et Pb présents dans les fumées métalliques (Bakri *et al.*, 2017; Grashow *et al.*, 2014; Ward *et al.*, 2017). Les cheveux ont également été utilisés comme matrice biologique pour l'évaluation de l'exposition chez des travailleurs (Ahlawat et Shukla, 2016; Kazi *et al.*, 2015; Mehra et Juneja, 2005; Momen *et al.*, 2015; Reiss *et al.*, 2016). Chez des soudeurs plus précisément, des relations ont été observées entre les concentrations de Mn dans l'air et dans les cheveux (Reiss *et al.*, 2016). Il est à noter que bien que l'urine ait surtout été utilisée pour le suivi biologique de l'exposition aux composés métalliques dans les études chez les soudeurs spécifiquement, de plus en plus d'études de surveillance biologique de l'exposition dans d'autres groupes de la population (générale et travailleurs) montrent l'intérêt des cheveux et des ongles pour intégrer l'exposition passée à différents métaux sur une certaine période (Ahlawat et Shukla, 2016; Bakri *et al.*, 2017; Evrenoglou *et al.*, 2017; Hays *et al.*, 2010; He, 2011; Katz, 2019; Kazi *et al.*, 2015; Mehra et Juneja, 2005; Momen *et al.*, 2015; Normandin *et al.*, 2014). Des études menées en collaboration avec notre équipe ont déjà montré l'utilité de ces matrices pour évaluer l'exposition aux métaux et métalloïdes dans la population générale (Caron-Beaudoin *et al.*, 2019; Nasser-Eddine *et al.*, 2022; Normandin *et al.*, 2014; Ratelle *et al.*, 2018).

En somme, des études de surveillance biologique de l'exposition chez les soudeurs ont été réalisées dans différents pays et ont montré une exposition significative à certains métaux chez les soudeurs en comparaison avec des groupes témoins, sur la base de mesures dans diverses matrices biologiques (Arrandale *et al.*, 2015; Ellingsen *et al.*, 2017; Persoons *et al.*, 2014; Rossbach *et al.*, 2006; Ward *et al.*, 2017). La mesure dans des matrices biologiques multiples semble une avenue intéressante pour le suivi de l'exposition aux composés métalliques. Néanmoins, au Québec, aucune étude de suivi biologique de l'exposition aux métaux chez les soudeurs, un groupe de travailleurs potentiellement à risque, n'a été réalisée selon un recensement des grandes banques de données (Medline, Current contents, Toxline, Pubmed, Google Scholars).

1.2.4 Facteurs pouvant influencer les évaluations de l'exposition

Un bilan des connaissances, réalisé par l'équipe de recherche de Philippe Sarazin à l'IRSST (Sarazin *et al.*, 2020), a permis de documenter l'état des connaissances depuis 2000 sur l'influence des procédés et certains paramètres de soudage sur les concentrations d'exposition des travailleurs aux fumées générées lors des opérations de soudage. Quatre procédés de soudage traditionnels (SMAW, GMAW, FCAW, GTAW) et une dizaine de paramètres de soudage ont été évalués dans cette étude (p. ex. nature du gaz de protection, composition et diamètre de l'électrode, mode de transfert, différents paramètres électriques). Ce bilan des connaissances a montré que le type d'électrode est un des paramètres de soudage les plus importants à évaluer, l'influence des autres paramètres étant globalement bien documentée. Il est toutefois à noter qu'en changeant le type d'électrode, c'est forcément le procédé de soudage qui est changé. C'est donc

essentiellement l'influence de procédés de soudage (procédés traditionnels et nouveaux procédés) qui est alors évaluée.

Néanmoins, la revue de la littérature a permis de constater qu'il n'est pas toujours évident d'estimer les doses absorbées de fumées et leurs composantes métalliques chez les soudeurs à partir des mesures de concentrations dans l'air. Certaines études ont montré une corrélation entre les concentrations respirables de certains métaux et les niveaux biologiques, alors que la relation était moins claire pour d'autres métaux. En particulier, Hoet *et al.* (2012) ont rapporté que les niveaux plasmatiques de Mn corrélaient avec les niveaux dans l'air, mais seulement aux concentrations supérieures à 10 µg/m³. Weiss *et al.* (2013) ont également montré que : i) les concentrations de Cr et de Ni respirables étaient de bons prédicteurs des niveaux de Cr et Ni urinaires et ii) les niveaux de ces métaux dans les fumées de soudage respirables et dans l'urine étaient corrélés significativement. Néanmoins, pour le Cr précisément, Pesch *et al.* (2018) ont observé que la forme hexavalente (Cr^{VI}) dans les fumées de soudage respirables était peu corrélée au chrome urinaire total.

De plus, certaines études de métrologie et de surveillance biologique ont montré que les concentrations de métaux dans les fumées de soudage, selon le matériau et le procédé de soudage, étaient très variables, soit notamment le cas du Cr dans l'étude de Pesch *et al.* (2018). Persoons *et al.* (2014) ont aussi montré une forte influence de la durée de soudage sur les niveaux biologiques observés, de même que du confinement et de la charge physique de travail. Ceci est en accord avec les résultats de l'étude de Grashow *et al.* (2014) qui a montré que les niveaux de métaux analysés (Mn, Pb, Cd) dans les ongles d'orteils reflétaient les activités de travail. Iarmarcovai *et al.* (2007) ont de plus montré que les concentrations urinaires et sanguines de métaux étaient plus élevées chez les soudeurs travaillant dans des zones sans équipement de protection collective comparativement à ceux travaillant dans une zone avec un système d'extraction des fumées. Les doses absorbées de métaux peuvent donc varier significativement selon la technique de soudage et les activités de travail, incluant les mesures de protection collective et la charge de travail.

1.2.5 Suivi de l'exposition à partir de mesures biologiques dans des matrices multiples

Les doses absorbées de composés chimiques comme les constituants métalliques de fumées peuvent varier significativement dans le temps, de même que les niveaux dans l'air des fumées et leurs composantes. Or, aucune des études menées chez les soudeurs ne s'est attardée à établir le suivi de l'exposition réelle, à partir de mesures biologiques dans des matrices multiples, qui reflètent des périodes d'exposition différentes.

À la suite d'une exposition par inhalation en milieu de travail, les particules métalliques respirables ayant pénétré dans les voies respiratoires, dépendant de leur taille et de leur

solubilité, peuvent former des ions et être dissoutes ou encore être phagocytées par des macrophages; une partie peut être internalisée vers la circulation sanguine, par des processus d'endocytose et de pinocytose notamment, ou vers la circulation lymphatique (Oberdörster *et al.*, 1995, 2001; Oller *et al.*, 1997). Par ailleurs, la fraction d'un métal qui atteint la circulation systémique peut se lier à des composantes endogènes (ex. : liaison du Cd aux métallothionéines localisées dans la membrane de l'appareil de Golgi), entrer dans la composition de protéines ou prendre la place d'autres composantes (ex. : l' Al^{3+} remplace le Mg^{2+} et Fe^{3+} cellulaire; le Cd remplace le calcium osseux), contribuant à la charge corporelle et donc à maintenir des niveaux biologiques à long terme (Chen *et al.*, 2018; Goyer *et al.*, 2016). Par exemple, le Mn absorbé s'accumule surtout dans les mitochondries et les noyaux cellulaires, dans les lysosomes et endosomes ainsi que l'appareil de Golgi ; les niveaux les plus élevés de Mn absorbé sont, par contre, retrouvés dans les os (Chen *et al.*, 2018).

Une mesure d'éléments métalliques dans le sang reflèterait ainsi la portion non stockée dans les tissus et organes provenant d'une exposition récente ou de la part remobilisée dans la circulation sanguine à partir des composantes tissulaires de stockage, lorsque la mobilisation des portions stockées est induite (ex : utilisation d'une substance qui chélate) ou lors du renouvellement des protéines (Chen *et al.*, 2018; Scimeca *et al.*, 2017). Dans le cas des métaux essentiels, cette matrice reflète les niveaux en homéostasie à faibles doses ou les niveaux toxiques lorsque les doses dépassent la fenêtre d'homéostasie (Chen *et al.*, 2018). Les métaux urinaires reflètent la fraction libre de métaux dans le sang (non liée ou non incorporée aux protéines) et, dans le cas des éléments essentiels, comme le Mn, le Zn et le Cu, la portion qui provient des voies régulées.

Bien que l'urine soit largement utilisée pour le suivi biologique de l'exposition aux composés métalliques, les ongles et cheveux ont l'avantage d'intégrer l'exposition sur une certaine période de temps. D'ailleurs, tel que mentionné précédemment, les niveaux dans les cheveux et les ongles humains sont de plus en plus utilisés dans des études de surveillance biologique pour évaluer l'exposition passée à différents métaux (Ahlawat et Shukla, 2016; Bakri *et al.*, 2017, 2019; Evrenoglou *et al.*, 2017; Hays *et al.*, 2010; He, 2011; Katz *et al.*, 2019; Kazi *et al.*, 2015; Mehra et Juneja, 2005; Momen *et al.*, 2015; Normandin *et al.*, 2014). Le cheveu pousse en moyenne d'un centimètre par mois, avec un intervalle de 0,6 à 3,4 cm/mois (Harkey, 1993; Wilhelm et Idel, 1996). Les concentrations au niveau de la racine du cheveu reflètent les proportions transférées à partir du sang (Carrier *et al.*, 2001; Noisel *et al.*, 2014). Ainsi, les concentrations de métaux dans le premier centimètre de cheveu à partir de la racine devraient correspondre à l'exposition moyenne du dernier mois (Cooper, 2015). Des mesures de métaux dans des centimètres consécutifs de cheveux permettent ainsi de reconstruire les expositions moyennes dans les mois qui ont précédé le prélèvement capillaire. Comparativement aux cheveux, les ongles représentent une exposition dans un passé plus lointain, car ils poussent plus lentement (soit en moyenne 1 cm ou plus par mois ou pour le cheveu par rapport à 3 mm par mois pour les ongles de mains et 1,2 mm par mois pour les ongles de

pieds) (Cobo-Golpe *et al.*, 2024; Cobo-Golpe *et al.*, 2023; Yaemsiri *et al.*, 2010). Ainsi, la coupe des derniers millimètres des ongles devrait refléter l'exposition passée sur des périodes allant de quatre à cinq mois pour les ongles de mains et de six à 12 mois pour les ongles de pieds précédant le prélèvement de l'échantillon (Altan Ferhatoğlu *et al.*, 2018; Laohaudomchok *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2019). Les concentrations au niveau de la racine de l'ongle sont, comme pour les cheveux, le reflet des proportions transférées à partir du sang (Carrier *et al.*, 2001; Noisel *et al.*, 2014). Ainsi, une coupe des derniers millimètres d'ongles devrait refléter une exposition intégrée survenue à des périodes pouvant aller de trois à 12 mois avant le prélèvement de l'échantillon, selon que les ongles de doigts de main ou d'orteils sont prélevés ou encore selon l'ongle (comme le gros orteil par rapport aux autres orteils) (Altan Ferhatoğlu *et al.*, 2018; Fleckman *et al.*, 1985; Wu *et al.*, 2012; Yaesmiri *et al.*, 2010). Comme les ongles d'orteils sont moins sujets à de la contamination exogène, ils sont souvent considérés comme une matrice biologique plus appropriée pour évaluer l'exposition aux éléments métalliques que les ongles de mains ou les cheveux.

En complément, les niveaux mesurés dans l'air, pendant un quart de travail, au niveau de la zone respiratoire reflètent les concentrations journalières d'exposition et donc l'exposition externe récente. Ils permettent ainsi de cerner les variations selon différents facteurs comme les procédés et les paramètres de soudage. Des prélèvements de matrices multiples chez des soudeurs permettent donc de retracer l'évolution de l'exposition et d'évaluer les variations temporelles dans les niveaux.

1.3 Objectifs

L'objectif général de cette recherche était d'établir la nature et le niveau d'exposition aux composantes métalliques lors d'activités de soudage au Québec, et d'évaluer l'influence des procédés, en effectuant des mesures dans différentes matrices biologiques et dans l'air. Les objectifs spécifiques de ce travail étaient :

1. D'estimer les doses internes de métaux et métalloïdes chez un groupe d'apprentis soudeurs québécois exerçant des activités de soudage selon des procédés traditionnels, par un suivi biologique de multiéléments dans des matrices multiples;
2. De déterminer les éléments métalliques les plus absorbés dans l'organisme chez ce groupe d'apprentis soudeurs et les corrélations entre ces différents éléments et entre les matrices biologiques;
3. D'estimer les niveaux de fumées de soudage dans l'air en termes de concentrations de particules et de composition métallique;
4. De déterminer des facteurs qui influencent les concentrations de métaux dans l'organisme et la relation entre les concentrations de contaminants mesurés dans l'air et dans les matrices biologiques.

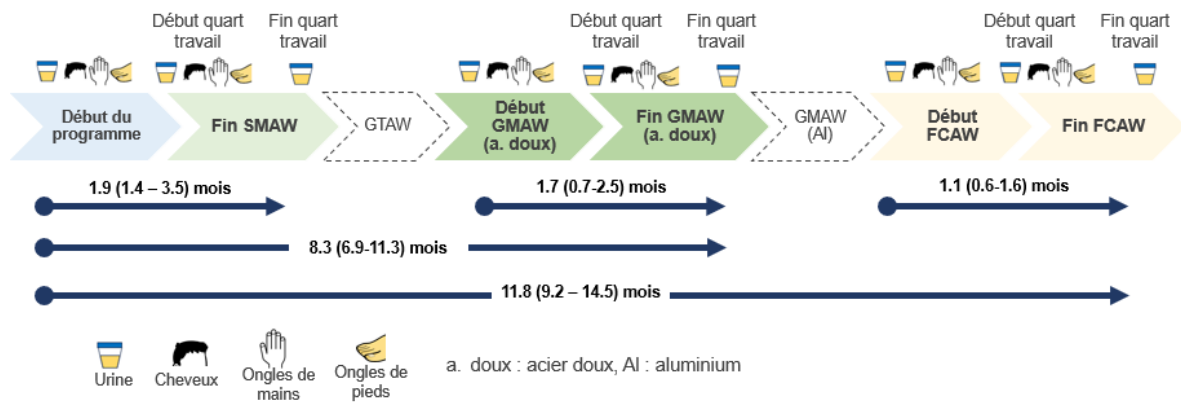
Un suivi biologique longitudinale de l'exposition aux composantes métalliques a été effectué pendant toute la durée du programme de formation en soudage. Dans les écoles

d'apprentis évaluées, la formation se déroulait entièrement en classes (pas sur des lieux de stage en milieu industriel). Les procédés étaient enseignés dans l'ordre suivant : SMAW, GTAW, GMAW (acier doux et Al), FCAW, stage. Les procédés ciblés pour le suivi étaient le procédé SMAW suivi du procédé GMAW puis FCAW. Le temps entre le début du programme et la fin de la pratique du procédé SMAW était en moyenne de 1,9 mois avec une étendue de 1,4 à 3,5 mois. Le temps entre le début du programme et la fin de la pratique du procédé GMAW était en moyenne de 8,3 mois avec étendue de 6,9 à 11,3 mois. Le temps entre le début et la fin de la pratique du procédé GMAW était en moyenne de 1,7 mois avec un intervalle de 0,7 à 2,5 mois. Finalement, le temps entre le début du programme et la fin de la pratique du procédé FCAW était en moyenne de 11,8 mois avec une étendue de 9,2 à 14,5 mois. Le temps entre le début et la fin de la pratique du procédé FCAW était en moyenne de 1,1 mois avec une étendue de 0,6 à 1,6 mois.

Au total, 116 participants ont été recrutés au cours de cette période; par contre, le nombre de participants évalués au moment de la rédaction des articles correspondant à chaque période d'échantillonnage biologique était variable, soit 86 participants au début et à la fin du SMAW, 85 participants au début et à la fin du module suivant GMAW puis 116 participants au module FCAW final évalué. Ces apprentis soudeurs ont été recrutés dans trois écoles différentes de Montréal, Québec, Canada.

Les articles 1, 2 et 3 rapportent respectivement les éléments les plus absorbées : i) lors de collectes biologiques et mesures dans l'air effectuées au début du programme et au début et à la fin du procédé SMAW; ii) au début et à la fin du procédé GMAW; iii) au début et à la fin du procédé FCAW. L'article 3 évalue aussi l'impact de différents facteurs sur les niveaux biologiques observés lors du suivi longitudinal de l'exposition des apprentis. Des mesures dans l'air ont été réalisées en parallèle, en particulier à la fin des procédés SMAW, GMAW et FCAW pour évaluer l'ampleur des niveaux de fumées de soudage et leurs composantes métalliques. Les niveaux de métaux dans l'air lors d'activités de soudage utilisant les procédés SMAW, GMAW et FCAW font partie d'un travail complémentaire effectué par l'équipe de l'IRSST et ont aidé ici à l'interprétation des données biologiques.

Figure 1. Séquence des prélèvements biologiques chez les apprentis soudeurs tout au long du programme de formation en soudage et les différents procédés ciblés (SMAW, GMAW et FCAW) Écoles d'apprentis soudeurs



2. RÉSUMÉS DES ARTICLES

2.1 Résumé de l'article 1

Titre : Biosurveillance de l'exposition à de multiples composantes métalliques dans l'urine, les cheveux et les ongles d'apprentis soudeurs exerçant des activités de soudage manuel à l'arc avec électrode enrobée (SMAW)

Référence

Buitrago Cortes, J., Sarazin, P., Dieme, D., Côté, J., Ouellet, C., El Majidi, N. et Bouchard, M. (2023). Biomonitoring of exposure to multiple metal components in urine, hair and nails of apprentice welders performing Shielded Metal Arc Welding (SMAW). *Environmental Research*, 239(2), article 117361. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117361>

Résumé

L'article 1 présente les données d'exposition aux fumées de soudage et à leurs composantes métalliques lors d'une première évaluation de 86 apprentis soudeurs recrutés dans trois écoles différentes de Montréal, Québec, Canada. La nature et le niveau d'exposition aux métaux ont été mesurés dans des échantillons d'urines, de cheveux, d'ongles de mains et de pieds collectés avant le début du programme de formation puis au début et à la fin du module pratique SMAW. Ceci correspond à un intervalle de temps de 1,9 mois en moyenne (étendue de 1,4 à 3,5 mois) entre l'échantillonnage témoin et celui effectué à la fin du procédé SMAW. Un total de 21 éléments ont été mesurés dans ces échantillons biologiques. Les concentrations de fumées de soudage et de 12 métaux ont également été déterminées dans des échantillons d'air respirable prélevés au cours d'une journée de travail typique dans un sous-groupe de 19 apprentis.

Les résultats ont montré que, dans l'ensemble, les concentrations de Fe, de Mn et de Ni dans l'urine ainsi que de Mn dans les cheveux, qui reflètent une exposition relativement récente, étaient plus élevées dans les échantillons prélevés à la fin du module SMAW par rapport aux valeurs observées avant le début du programme de formation ainsi qu'avant le début du module SMAW, alors qu'il n'y avait pas de différence significative pour les autres éléments ou pour les concentrations dans les ongles. Les concentrations moyennes géométriques (5^e – 95^e centiles) mesurées avant le début du programme et à la fin du SMAW (après le quart de travail) était respectivement de : 0,11 (0,03-0,74) et 0,31 (0,032-2,84) µg/g créat. pour le Mn ($p < 0,01$); 7,0 (3,2-21) et 9,4 (3,1 – 51) µg/g créat. pour le Fe ($p < 0,01$); 0,74 (0,29-2,1) et 0,87 (0,35-3,1) µg/g créat. pour le Ni ($p = 0,05$). Pour les cheveux, les valeurs correspondantes de concentrations moyennes géométriques (5^e – 95^e centiles) pour le Mn, soit le seul élément montrant une

augmentation significative dans les cheveux, étaient respectivement de : 0,21 (0,05-1,1) et 0,37 (0,014-6,4) µg/g ($p < 0,001$).

La distribution observée des concentrations de métaux (µg/g créat. ou µg/L) dans l'urine des apprentis soudeurs échantillonnés avant le début du SMAW était similaire aux dernières valeurs rapportées dans les grandes enquêtes nationales, dont l'Enquête canadienne sur les mesures de la santé (ECMS), cycles 2 et 6 (Santé Canada, 2013, 2021), ainsi que dans le *National Health and Nutrition Examination Survey* (NHANES) américain de 2015 à 2018 (Centers for Disease Control and Prevention [CDC], 2022), l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) (LeBlanc *et al.*, 2004) et l'étude française IMEPOGE (Nisse *et al.*, 2017). Les concentrations de métaux observées dans les cheveux (µg/g) avant le début du SMAW étaient également similaires aux données disponibles rapportées dans l'ECMS cycle 5 (Santé Canada, 2019). Les concentrations de métaux dans les ongles des pieds et des mains (µg/g), pour lesquelles il n'y a pas de valeurs de référence de grandes enquêtes nationales, étaient similaires aux valeurs rapportées dans les études publiées par Nasser-Eddine *et al.* (2022) pour les ongles des pieds, Momen *et al.* (2015) pour les ongles des mains, et Goullé *et al.* (2009) pour les ongles des pieds et des mains.

Les corrélations entre les concentrations des métaux les plus abondants (Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb et Zn) dans les différentes matrices ont également été évaluées et ont montré des associations assez fortes entre les concentrations de métaux dans les ongles des pieds et des mains (r_P atteignant 0,87 pour Zn). Des corrélations modérées à fortes ont également été trouvées entre la plupart des concentrations de métaux dans les cheveux et les ongles des pieds (r_P atteignant 0,79 pour le Zn). Des corrélations modérées à fortes entre la plupart des concentrations de métaux dans les cheveux et les ongles de mains ont de plus été observées (r_P atteignant 0,76 pour le Zn).

Par ailleurs, les analyses des corrélations entre les concentrations des éléments les plus abondants (Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb et Zn) dans l'urine, les cheveux, les ongles des mains ou des pieds ont montré une association linéaire faible à modérément élevée pour plusieurs éléments dans l'urine (r_P allant jusqu'à 0,56 entre le Cr et Mn urinaires). Des corrélations plus fortes entre les concentrations de métaux ont été trouvées dans les cheveux (r_P atteignant 0,82 entre le Mn et le Fe), dans les ongles des mains (r_P atteignant 0,87 entre le Mn et le Fe) et dans les ongles des pieds (r_P atteignant 0,85 entre le Mn et le Fe). Le Mn et le Fe étaient donc les deux éléments avec les corrélations les plus élevées dans toutes les matrices biologiques (urine, cheveux, ongles des mains et des pieds).

Bien que chaque participant était son propre témoin lors du suivi biologique, il n'y avait pas de différences significatives dans les concentrations de métaux dans l'urine et les cheveux entre les groupes d'âge, ou en fonction de l'origine ethnique, du niveau d'éducation, du revenu annuel du ménage, du tabagisme, de la consommation d'alcool, de la prise de médicaments et de suppléments, lors de l'évaluation des métaux montrant

une augmentation des niveaux biologiques dans les matrices collectées à la fin du module SMAW (Fe, Mn et Ni, en particulier). Cependant, alors que l'origine ethnique n'a pas influencé les concentrations urinaires de métaux, les concentrations de Mn et de Fe dans les cheveux du groupe ethnique noir étaient significativement plus élevées que dans les autres groupes avant le début du programme et à la fin du module SMAW. En outre, l'indice de masse corporelle (IMC) n'a montré que de faibles corrélations avec les concentrations de métaux dans l'urine et les cheveux.

Pour ce qui est des mesures dans l'air, huit des 12 métaux analysés ont été quantifiés dans au moins 90 % des échantillons prélevés dans la zone respiratoire (Co, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Zn) (toutes les valeurs non quantifiées ont été obtenues dans une école de formation spécifique). Si l'on considère spécifiquement les métaux qui ont montré une augmentation significative des niveaux biologiques pendant le module SMAW, c'est-à-dire Mn, Fe et Ni, leurs concentrations respirables médianes, leurs 5^e et 95^e centiles étaient respectivement de 29 (4,6-1200), 120 (27-3100) et 0,31 (<limite de quantification (LOQ)-0,92) µg/m³. Aucune corrélation n'a été trouvée entre les concentrations dans l'air (intégrées sur une période de pratique du soudage) et les concentrations de métaux dans l'urine collectée à la fin du SMAW (-0,098 < r_s < -0,253; p > 0,05).

Pour les fumées de soudage, la concentration médiane mesurée pendant la période d'échantillonnage était d'environ un dixième de la valeur limite d'exposition professionnelle (VLEP) au Québec de 5 mg/m³ (particules totales) pour 8 heures, avec trois échantillons sur 19 dépassant la VLEP (même si les concentrations respirables ne sont pas directement comparables à celles totales). Pour la plupart des métaux, les concentrations respirables mesurées au cours de la période d'échantillonnage étaient bien inférieures à la valeur limite TLV-TWA[®] de l'ACGIH, à l'exception du Mn pour lequel la concentration médiane était de 29 µg/m³ (par rapport à la TLV-TWA[®] respirable de 20 µg/m³) et 13 échantillons sur 19 dépassaient la valeur limite. Pour le Fe, les concentrations mesurées pendant la période d'échantillonnage étaient généralement faibles par rapport à la TLV-TWA[®] de l'ACGIH pour les particules respirables de 5 mg/m³, à l'exception de deux échantillons (3,6 et 3,0 mg/m³). Bien que les concentrations de contaminants aient été mesurées pendant une période de moins de 8 heures et que les VLEP soient des valeurs de référence pour la durée d'un quart de travail, les concentrations élevées de Mn (et de Fe dans une moindre mesure) lors des évaluations de l'exposition indiquent qu'il existe un risque élevé de dépassement de la VLEP pendant une période TWA de 8 heures, même si les apprentis soudeurs ne travaillent pas aussi intensivement que pendant les périodes d'échantillonnage de cette étude.

Cette étude a montré que même une exposition de courte durée aux fumées de soudage dans des environnements contrôlés, telle qu'observée chez les apprentis soudeurs lors de mesures effectuées à la procédure SMAW, augmentait les niveaux biologiques de certains métaux. Cette étude a également confirmé l'utilité des mesures dans des matrices multiples pour évaluer l'exposition interne aux métaux. Par ailleurs, parmi les facteurs

personnels évalués, seule l'origine ethnique était liée à la variabilité inter-sujets des niveaux de métaux mesurés dans les cheveux à la fois au début et à la fin du SMAW.

2.2 Résumé de l'article 2

Titre : Étude de suivi de la biosurveillance de l'exposition aux métaux chez des apprentis soudeurs de Montréal (Québec) lors d'activités de soudage à l'arc sous protection gazeuse avec fil plein (GMAW)

Référence :

Buitrago Cortes, J., Sarazin, P., Dieme, D., Côté, J., Ouellet, C., El Majidi, N. et Bouchard, M. (2024). Follow-up biomonitoring study of metal exposure in apprentice welders in Montreal, Quebec, during Gas Metal Arc Welding (GMAW). *Biological Trace Element Research*. <https://doi.org/10.1007/s12011-024-04354-7>

Résumé

L'article 2 présente les données d'un premier suivi longitudinal de l'exposition aux fumées de soudage et à leurs composantes métalliques lors de la pratique du procédé GMAW chez 85 apprentis soudeurs recrutés dans trois écoles différentes de Montréal, Québec, Canada. Ces participants étaient les mêmes que ceux évalués au début et à la fin du module SMAW précédent (Buitrago Cortes *et al.*, 2023). Le temps entre le début du programme de formation et la fin de l'utilisation du procédé GMAW était en moyenne de 8,3 mois (étendue de 6,9 à 11,3 mois). De façon similaire à l'évaluation initiale (Buitrago Cortes *et al.*, 2023), la nature et le niveau d'exposition aux métaux ont été mesurés dans des échantillons d'urines, de cheveux, d'ongles de mains et de pieds collectés avant le début de la formation puis au début et à la fin du module pratique GMAW. Ceci correspond à un intervalle de temps de 1,7 mois en moyenne (étendue de 0,7 à 2,5 mois) entre l'échantillonnage effectué au début et à la fin du procédé GMAW. Un total de 21 éléments ont été mesurés dans ces échantillons biologiques. Les concentrations de fumées de soudage et de 12 métaux ont également été déterminées dans des échantillons d'air respirable prélevés au cours d'une journée de typique de pratique du procédé GMAW dans un sous-groupe de 21 apprentis.

Les résultats ont montré une augmentation constante des concentrations de Fe, de Mn, de Ni puis à un niveau moindre de Cr, de Co et d'As dans la majorité des matrices, lors de la comparaison de la distribution des concentrations de métaux dans les échantillons d'urine, de cheveux, d'ongles des mains et des pieds collectés avant le début de la formation, au début du GMAW et à la fin du GMAW. Plus précisément, en se basant principalement sur les niveaux urinaires et capillaires, représentant une exposition plus récente, une augmentation apparente des concentrations de Fe, de Mn, de Ni, de Cr et d'As liée spécifiquement au procédé GMAW a été observée. Pour les ongles des mains et des pieds, représentant une exposition intégrée des mois plus tôt, une augmentation en

fonction du temps de certaines concentrations de métaux a été observée, en particulier le Fe, le Mn et, dans une moindre mesure, le Ni et Co.

En accord avec ces valeurs biologiques, les résultats dans l'air à la fin du procédé GMAW ont montré des concentrations élevées de fumées de soudage respirables, de Fe et de Mn, avec des médianes respectives (5^e – 95^e centiles) de 0,37 (<LOQ-3,5) mg/m³, 230 (44-1900) et 21 (2,9-300) µg/m³. Les concentrations médianes pour la plupart des métaux sont restées inférieures à la TLV-TWA® de l'ACGIH, à l'exception du Mn, dont la concentration médiane était de 21 µg/m³, dépassant légèrement le TLV-TWA® de 20 µg/m³. La valeur du 95^e centile de concentrations de Mn de 300 µg/m³ observée dans notre étude indique une exposition élevée au Mn pendant les pratiques de soudage GMAW.

Bien que chaque participant était son propre témoin lors du suivi biologique, pour les métaux présentant une augmentation des concentrations biologiques (urine, cheveux, ongles des mains et des pieds) à la fin du module GMAW (c.-à-d. Fe, Mn, Ni, Cr, Co, As), il n'y avait pas d'effet significatif des facteurs personnels et démographiques évalués, à l'exception de l'origine ethnique. Alors que l'origine ethnique n'a pas influencé les concentrations de métaux dans l'urine, les ongles des mains et des pieds, les concentrations de Fe, de Mn, de Ni et de Cr dans les cheveux du groupe ethnique noir étaient significativement plus élevées que celles des autres groupes avant le début du programme de formation ainsi qu'au début et à la fin du module GMAW. En outre, les concentrations de Co dans les cheveux du groupe ethnique noir étaient significativement plus élevées que celles des autres groupes à la fin du module GMAW. Des différences dans les concentrations biologiques entre les trois écoles évaluées ont également été relevées, alors qu'il n'y avait pas d'effet des activités de loisirs impliquant une exposition potentielle aux métaux.

Les résultats ont confirmé que même une exposition de courte durée aux fumées de soudage dans un environnement d'apprentissage entraînait une augmentation significative des doses absorbées de certains métaux, en particulier pour le Fe et le Mn. Les métaux retrouvés en concentrations plus élevées dans les urines et les cheveux sont compatibles avec la composition du métal et de l'électrode pour le processus GMAW et l'utilisation d'acier doux comme matériau de base. Cette étude de suivi a confirmé l'intérêt et l'utilité de la mesure de plusieurs éléments dans plusieurs matrices pour évaluer l'exposition interne aux fumées de soudage et son applicabilité à l'exposition professionnelle aux métaux.

2.3 Résumé de l'article 3

Titre : Facteurs influençant les concentrations de métaux dans les cheveux et les ongles lors du suivi longitudinal d'apprentis soudeurs

Référence

Buitrago Cortes, J., Sarazin, P., Dieme, D., El Majidi, N. et Bouchard, M. (2024). Factors influencing metal concentrations in hair and nails during longitudinal follow-up of apprentice welders. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 87(24), 1030-1049. <https://doi.org/10.1080/15287394.2024.2410283>

Résumé

L'article 3 présente les résultats complets du suivi longitudinal de l'exposition aux éléments métalliques chez des apprentis soudeurs québécois suivis au cours de leur programme de formation en soudage et des facteurs influençant l'augmentation observée des niveaux biologiques de certains métaux. Pour cette partie de l'étude, 116 participants ont été évalués, dont les participants ayant été évalués à une étape antérieure. Les concentrations de 21 métaux ont été analysées dans des échantillons de cheveux, d'ongles de mains et d'ongles d'orteils prélevés chez les participants à six moments différents au cours de leur cursus de soudage : avant le début de la formation, au début et à la fin des procédés successifs SMAW, GMAW et FCAW. Le temps entre le début du programme et la fin de la pratique du procédé FCAW était en moyenne de 11,8 mois (étendue de 9,2 à 14,5 mois). Le temps entre le début et la fin de la pratique du procédé FCAW était en moyenne de 1,1 mois (étendue de 0,6 à 1,6 mois).

Les caractéristiques personnelles et sociodémographiques, les habitudes de vie et d'autres facteurs de confusion potentiels ont été documentés par questionnaire. Des modèles linéaires à effets mixtes multivariés ont été utilisés pour évaluer les principaux prédicteurs des concentrations de métaux dans chaque matrice biologique, y compris l'augmentation de la durée d'exposition tout au long du cursus (définie comme la variable « temps » à mesures répétées).

Le suivi des niveaux biologiques avant le début du programme, puis au début et à la fin des procédés successifs SMAW, GMAW et FCAW a montré que les concentrations de Fe, de Mn, de Ni et de Cr augmentaient de façon constante au fil du temps dans les ongles des mains, des pieds et des cheveux tout au long du programme de soudage. Les concentrations de Co, baryum (Ba), et V ont également augmenté de manière significative au fil du temps dans les ongles des mains et des pieds (mais pas dans les cheveux), tandis que les concentrations d'As ont progressivement augmenté dans les ongles des mains et les cheveux (mais pas dans les ongles des pieds). Cependant, les concentrations de V dans toutes les matrices et les niveaux de Ba dans les ongles se situaient dans l'intervalle des valeurs de référence populationnelles disponibles (Goullé et

al., 2009; Santé Canada, 2019; Slotnick *et al.*, 2005; Tinkov *et al.*, 2021). Les concentrations des autres principaux éléments évalués (Al, Cd, Cu, Pb, Zn) dans les ongles des mains et des pieds et dans les cheveux n'ont pas changé en fonction du temps.

Par ailleurs, l'abondance relative (concentrations) des métaux présentant une augmentation en fonction du temps (Fe, Mn, Ni, Cr et, dans une moindre mesure, As, Ba, Co et V) dans les ongles des pieds et des mains au cours du programme de soudage était la suivante : Fe > Ni > Mn > Cr > Ba > As > V > Co. Dans les cheveux, l'ordre était le suivant : Fe > Mn > Ba > Cr > Ni > As > V > Co. En outre, à tous les moments de l'échantillonnage au cours du suivi, les concentrations de Co, Cr, Fe, Mn, Ni et V suivaient systématiquement l'ordre suivant : ongles des mains > ongles des pieds > cheveux. Pour l'As et le Ba, le gradient de concentrations relatives pour toutes les mesures répétées dans le temps était le suivant : ongles des pieds > ongles des mains > cheveux.

Lors de l'analyse multivariée, les variables « temps », « école » (représentant les trois différentes écoles de soudage évaluées), « âge » et « revenu annuel du ménage » étaient les variables contribuant le plus aux modèles et ont été retenues dans les modèles finaux pour évaluer les associations avec les niveaux de métaux dans les cheveux et dans les ongles des mains et des pieds. La variable « origine ethnique » a également été incluse dans les modèles multivariés finaux pour les niveaux de métaux dans les cheveux. Les autres variables (IMC, éducation, tabagisme et consommation d'alcool) n'ont pas contribué de manière significative aux modèles multivariés et n'ont pas été prises en compte dans les modèles multivariés finaux.

Plus précisément, les modèles multivariés ont montré que la variable « temps » à mesure répétée était le principal facteur prédictif des niveaux de métaux dans les cheveux, les ongles des mains et les ongles des pieds. La plus forte augmentation des concentrations en fonction du temps dans toutes les matrices a été observée pour le Mn et le Fe, suivie du Ni dans les ongles des pieds, et l'As et le Cr dans les cheveux. Par exemple, pour le Fe dans les cheveux, l'ampleur du changement ($\text{Exp}(\beta)$ (intervalle de confiance (IC) à 95 %)) entre la fin de la pratique du procédé FCAW et le début du programme (référence) était de 1,93 (1,53 - 2,43) ($p < 0,001$).

Des différences significatives ont été observées entre la variable « école » et les niveaux de métaux dans les matrices biologiques. L'une des trois écoles évaluées (« école 3 ») présentait des niveaux de métaux significativement plus élevés dans les cheveux et les ongles, en particulier pour le Cr, le Mn, le Fe et le Ni dans les cheveux, et le Cr, le Mn, le Fe et le Co dans les ongles. L'ampleur du changement ($\text{Exp}(\beta)$ (IC 95 %)) pour le Fe dans les cheveux entre l'« école 1 » et l'« école 3 » (référence) était de 0,50 (0,34 - 0,74) ($p < 0,001$). En outre, l'« école 3 » présentait des niveaux de Ni plus élevés dans les ongles des mains et des niveaux de Ni et de Fe plus élevés dans les ongles des pieds comparativement à l'« école 1 ».

L'âge était associé aux concentrations de métaux dans les cheveux et les ongles des pieds, mais pas aux concentrations dans les ongles des mains. Plus précisément, les niveaux de Cr, Mn et Fe augmentaient dans les cheveux avec l'âge, tandis que l'âge n'a pas montré d'effet marqué sur les valeurs des ongles des mains, et était associé à un effet inverse sur les niveaux de Co, de Cr, de Fe et de Mn dans les ongles des pieds. Les variables socio-économiques telles que le « revenu annuel du ménage » n'ont montré qu'une association significative avec les niveaux d'As dans les cheveux et les ongles. Le groupe ethnique noir présentait des niveaux de métaux significativement plus élevés dans les cheveux, principalement pour le Cr, le Fe, le Mn et le Ni, par rapport aux autres groupes ethniques. En outre, de faibles coefficients de corrélation de Spearman ont également été trouvés ($-0,224 < r_s < 0,232$) entre les variables « âge », « revenu annuel du ménage » et « origine ethnique », ce qui indique un impact limité de la colinéarité sur les résultats finaux des modèles multivariés.

En somme, cette analyse a confirmé l'impact de la durée d'exposition tout au long du programme de formation (définie comme la variable "temps" à mesures répétées) dans l'augmentation des niveaux biologiques de métaux chez les apprentis soudeurs suivis, ainsi que l'influence de l'école dans les niveaux observés. Les espaces réduits et les activités simultanées, telles que l'oxycoupage et le soudage dans la même salle, ont été suspectés de contribuer à des niveaux de métaux plus élevés. L'âge, le revenu annuel du ménage et l'origine ethnique ont eu un effet sur les niveaux de métaux et ont été considérés comme des facteurs de confusion dans les modèles. Les variations observées dans les niveaux de métaux entre les cheveux et les ongles des apprentis soudeurs ont également souligné la pertinence et l'importance d'effectuer une biosurveillance multi-matrice et multi-éléments pour évaluer les variations temporelles dans les concentrations biologiques de métaux au cours du programme de formation en soudage.

3. DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION

3.1 Portée du projet de recherche

La présente étude est l'une des rares études de biosurveillance à rapporter l'évolution des niveaux dans le temps d'éléments multiples dans plusieurs matrices échantillonnées simultanément pour évaluer l'exposition interne aux composants métalliques des fumées de soudage. L'accent a été mis sur la biosurveillance, mais les concentrations dans l'air ont également été documentées pour confirmer l'origine des niveaux de métaux plus élevés dans les matrices biologiques. Cette approche a permis de déterminer les éléments métalliques présents en plus fortes concentrations dans les matrices biologiques et dans l'air pour différents procédés de soudage couramment utilisés (SMAW, GMAW et FCAW), soit globalement le Fe, le Mn, le Ni, le Cr et le Co. Les participants ont été recrutés dans des écoles d'apprentis soudeurs, parce qu'il s'agit d'un environnement d'apprentissage où il est plus facile d'estimer la contribution d'un procédé de soudage spécifique aux niveaux biologiques de métaux. Bien que ce soit une exposition à plus court terme comparativement aux soudeurs en exercice, l'étude a montré qu'il y a un risque relié au soudage dans ces environnements fermés. L'étude a été conçue comme une étude de suivi dans laquelle chaque participant était son propre témoin lors des mesures répétées (effectuées avant le début du programme et au début et à la fin des procédés SMAW, GMAW et FCAW), afin de limiter l'effet des facteurs de confusion liés aux caractéristiques personnelles. Par ailleurs, les analyses de corrélations simples ont permis d'évaluer les relations dans les niveaux de métaux entre les matrices et les corrélations pour une matrice donnée entre les métaux les plus abondants.

Finalement, les analyses multivariées ont permis d'analyser l'évolution des niveaux de composantes métalliques dans les matrices biologiques au cours de la formation par rapport aux niveaux de base en début de cursus tout en tenant compte de variables potentiellement confondantes. Cela a donc permis de confirmer que les activités de soudage tout au long du programme de formation sont associées à une augmentation de l'exposition interne aux composantes métalliques, et de déterminer des facteurs qui influencent l'exposition et les quantités réelles absorbées dans l'organisme.

3.1.1 Ampleur et nature de l'exposition aux fumées et leurs composantes métalliques lors de procédés traditionnels de soudage

Les résultats de l'article 1 montrent que le procédé SMAW a contribué à augmenter les niveaux de Mn, de Fe et de Ni dans l'urine et de Mn dans les cheveux des individus au fil du temps. En outre, les valeurs d'interquartiles (IQR) plus élevées pour ces métaux dans l'urine et les cheveux trouvées à la fin de la pratique de soudage SMAW indiquent des concentrations plus dispersées et donc une absorption de ces éléments au cours de la pratique du procédé SMAW. Bien qu'il n'y avait pas de différence significative dans les

concentrations de Cr dans l'urine avant le début et à la fin de la formation SMAW, les valeurs d'IQR étaient plus élevées à la fin de la pratique du procédé SMAW par rapport aux valeurs témoins obtenues avant le début du programme, ce qui suggère aussi une absorption de cet élément au cours de la formation SMAW pour certains participants. En outre, les valeurs d'IQR calculées à partir des concentrations de Fe dans les cheveux étaient plus élevées à la fin de la pratique SMAW comparativement aux niveaux témoins, même s'il n'y avait pas de différence significative dans les concentrations de ce métal avant le début et à la fin de la pratique du procédé SMAW. Les concentrations des autres éléments évalués dans les échantillons biologiques collectés à la fin du procédé SMAW, en particulier celles de l'Al, du Cu, du Zn, du Cd et du Pb, sont restées d'intervalle de référence, ce qui est normal étant donné qu'ils ne sont pas des composantes de la baguette de soudage utilisée dans le procédé SMAW selon la fiche technique du fabricant (Air Liquide, 2018; Hobart Filler Metals, 2024). L'Al et le Cu font plutôt partie de l'alliage métallique des baguettes utilisées dans le procédé GMAW.

Les différentes matrices reflètent des fenêtres temporelles différentes par rapport au moment de l'exposition, ce qui pourrait expliquer certaines des différences observées dans les niveaux biologiques entre les matrices. Comme mentionné précédemment, dans le premier centimètre de cheveux prélevés à partir de la racine à la fin de chaque module, les niveaux de métaux reflètent l'exposition au cours du dernier mois, étant donné que les cheveux poussent en moyenne d'environ un centimètre par mois (avec une fourchette de 0,6 à 3,4 cm/mois). Les niveaux de métaux dans les coupes des derniers millimètres d'ongles des mains et des pieds, également échantillonnés à la fin d'un module, reflètent l'exposition en moyenne 3-5 et 7-12 mois plus tôt, respectivement, étant donné le taux de croissance des ongles (en moyenne 3 mm/mois pour les ongles des mains et 1,2 mm/mois pour les ongles des pieds). La matrice des cheveux semble plus appropriée que celle des ongles pour évaluer l'influence de l'exposition à court terme. Les niveaux urinaires, sont quant à eux influencés par une exposition récente, mais les éléments essentiels comme le Fe, Mn et Co sont sujets à une homéostasie, limitant les variations dans le sang et donc l'urine (Chen *et al.*, 2018; Madkour, 2020).

Notamment, les concentrations de métaux dans les ongles des mains et des pieds ont également été mesurées dans des échantillons collectés à la fin du procédé SMAW. Toutefois, étant donné le taux de croissance des ongles, la période écoulée entre le début et la fin du module pratique SMAW (en moyenne 1,7 mois (fourchette de 1,2-2,3 mois)) n'était pas suffisante pour que la coupe du bout des ongles reflète l'exposition liée au processus SMAW. Par exemple, le délai entre l'exposition aux fumées de soudage et l'observation des concentrations de Mn liées à l'exposition dans les ongles des orteils a été signalé comme étant de 7 à 12 mois (Ward *et al.*, 2017). Ces mesures dans les ongles à la fin de la pratique du procédé SMAW ont servi à confirmer que les valeurs métalliques restaient dans les niveaux de base, mais ont également fourni des données manquantes sur les niveaux de référence de métaux dans les ongles, qui apparaissent comme une

matrice utile pour reconstruire l'exposition passée chez les personnes exposées de manière subchronique ou chronique.

Les résultats de l'article 2 montrent aussi que le procédé GMAW a contribué à augmenter les niveaux biologiques de certains métaux au fil du temps, en particulier le Fe, le Mn et le Ni tout comme pour les mesures précédentes à la fin du procédé SMAW, mais également le Cr, le Co et l'As. En se basant principalement sur les niveaux capillaires, représentant une exposition plus récente, une augmentation apparente des concentrations de Fe, de Mn, de Ni, de Cr et d'As liée spécifiquement au procédé GMAW a été constatée. Pour les ongles des mains et des pieds, représentant une exposition intégrée des mois plus tôt, une augmentation en fonction du temps de certaines concentrations de métaux a été observée, à savoir le Fe, le Mn, le Ni et, dans une moindre mesure, le Co. Par conséquent, compte tenu du taux de croissance des ongles, l'augmentation des concentrations de métaux dans les ongles des pieds et des mains reflète très probablement l'exposition pendant le programme de formation plutôt que d'être spécifique au procédé GMAW. Dans l'urine, seule une augmentation transitoire des niveaux de Fe a été observée entre les niveaux avant et après le travail, ce qui reflète très probablement l'exposition quotidienne à ce métal essentiel.

Par ailleurs, à la fin du procédé GMAW, un plus grand nombre de métaux ont montré des niveaux biologiques accrus par rapport aux niveaux observés à la fin du premier module de formation SMAW. Plus précisément, en comparant les concentrations de métaux dans les échantillons biologiques prélevés à la fin du module SMAW et plus tard à la fin du module GMAW chez nos apprentis soudeurs évalués, une augmentation des niveaux de Fe a été observée dans les échantillons d'urine et une augmentation des niveaux de Fe, de Mn, de Ni, de Cr et d'As était apparente dans les échantillons de cheveux. À l'exception de l'As, les métaux trouvés en concentrations plus élevées dans l'urine et les cheveux à la fin du processus GMAW (c'est-à-dire Fe, Mn, Ni, Cr dans les cheveux et Fe dans l'urine), reflétant une exposition plus récente que celle des ongles, sont compatibles avec la composition du métal et de l'électrode pour le processus GMAW et l'utilisation d'acier doux comme matériau de base. En effet, la classe de référence de l'électrode utilisée dans les écoles évaluées était ER70S-6 et correspond à la classification standard canadienne (CSA) W48 ; la composition métallique principale des fils solides varie de 1,42 à 1,5 % Mn, 0,018 à 0,03 % Cr, 0,01 à 0,02 % Ni, et 0,3 à 0,11 % Cu (avec pas plus de 0,005 % Mo et V) d'après la fiche de données de sécurité (Exocor, 2015). Bien que l'As ne soit pas signalé dans les fiches de données, les niveaux plus élevés d'As dans les cheveux sont compatibles avec les concentrations d'As précédemment signalées dans la zone respiratoire des soudeurs effectuant du soudage avec le procédé GMAW (Dueck *et al.*, 2021; Hariri *et al.*, 2018). La présence d'As pourrait être reliée à une contamination du métal de base (acier recyclé).

Le procédé SMAW a également été associé à une augmentation des niveaux de Mn dans l'urine des apprentis lorsque l'on compare les concentrations avant et après une journée

de travail typique à la fin du module SMAW ; un tel impact n'a pas été observé pour le Mn entre les échantillons prélevés avant et après le travail à la fin du module GMAW. Seules les concentrations de Fe étaient plus élevées dans les échantillons d'urine prélevés à la fin du module SMAW comparativement aux échantillons prélevés à la fin du module GMAW. Les concentrations urinaires plus élevées de Mn observées à la fin du SMAW sont compatibles avec les concentrations atmosphériques plus élevées de Mn observés dans la zone respiratoire par rapport au procédé GMAW (moyenne géométrique et 5^e -95^e centiles) dans notre étude. Néanmoins, les teneurs en Mn étaient légèrement plus élevées dans les électrodes utilisées dans le procédé GMAW dans les écoles évaluées (70S-6 : 1,42 % à 1,50 %) comparativement aux électrodes utilisées dans le procédé SMAW (E7018 : 0,89 % à 0,99 %) (Exocor, 2015; Hobart Filler Metals, 2024).

Si on ajoute les données obtenues à la fin du FCAW, encore une fois, les métaux ayant montré une augmentation cohérente des niveaux biologiques en fonction du temps, soit le Fe, le Mn, le Ni et le Cr dans les matrices kératinisées en particulier, sont des métaux également présents dans les fumées de soudage (Abdullahi et Sani, 2020; Ramzani *et al.*, 2022; Weiss *et al.*, 2013). Comme mentionné précédemment, ces métaux sont des constituants des matériaux en acier doux et des électrodes utilisées dans les écoles de formation en soudage (Dueck, 2017; Floros, 2018; Spiegel-Ciobanu *et al.*, 2020). En fait, Fe est le principal composant de la base métallique et le Cr, le Mn et le Ni sont des constituants des électrodes utilisées pendant le programme de formation en soudage. Contrairement aux matrices kératinisées, à la fin du procédé FCAW, les niveaux urinaires de métaux n'augmentaient pas de façon significative.

En somme, tout au long du suivi longitudinal dans notre étude, l'augmentation la plus forte des concentrations de métaux biologiques en fonction du temps a été observée pour les niveaux de Fe et de Mn dans toutes les matrices, ce qui suggère une exposition qui sort des intervalles de concentrations observées dans les conditions d'homéostasie pour ces éléments essentiels chez les apprentis soudeurs. Une augmentation en fonction du temps des niveaux de Co dans les ongles a également été observée. Bien que ces éléments essentiels, comme le Fe, le Mn et le Co, soient soumis à des voies régulées (Chen *et al.*, 2018; Madkour, 2020), l'exposition aux fumées de soudage pourrait mener à une certaine perturbation de leur homéostasie, entraînant une augmentation des taux sanguins/sériques (Ellingsen *et al.*, 2015; Heitland et Köster, 2021; Lu *et al.*, 2005; Ramzani *et al.*, 2022) et donc du transfert vers les matrices kératinisées. L'impact moins visible à long terme, et plutôt transitoire, sur les niveaux urinaires pourrait s'expliquer en partie par le fait que ces éléments essentiels sont excrétés principalement dans la bile; la fraction excrétée dans l'urine peut aussi être facilement réabsorbée dans le sang (Gregus et Klaassen, 1986; Ishihara et Matsushiro, 1986). Une certaine augmentation des concentrations de Ni et de Cr avec le temps a également été observée dans les matrices kératinisées. Ces éléments Fe, Mn, Ni, Cr et Co en particulier devraient faire l'objet d'un suivi plus serré lors d'activités de soudage.

3.1.2 Corrélations entre les matrices et entre les métaux

La mesure simultanée des concentrations de plusieurs éléments dans des matrices biologiques multiples échantillonnées a permis d'évaluer les corrélations matrice-matrice pour des métaux donnés ainsi que les corrélations métal-métal dans une même matrice. Peu d'études chez les soudeurs ont évalué les associations entre les concentrations de métaux dans différentes matrices biologiques. Seules des études récentes ont rapporté les concentrations de 12 éléments dans les ongles et les cheveux de soudeurs professionnels échantillonnés au même moment (Čargonja *et al.*, 2021, 2023). Malgré les différentes vitesses de croissance des matrices kératinisées (en moyenne 1 cm par mois pour les cheveux comparativement à 3 mm/mois pour les ongles des mains et 1,2 mm/mois pour les ongles des pieds) (Wilhelm et Idel, 1996; Yaemsiri *et al.*, 2010) et les différentes demi-vies d'élimination des métaux, les travaux actuels ont montré des corrélations positives modérées à fortes dans les concentrations de plusieurs métaux évalués dans les différentes matrices kératinisées (cheveux, ongles des pieds et ongles des mains) et entre les métaux mesurés dans les mêmes matrices kératinisées. En revanche, dans notre étude, de faibles corrélations métal-métal ont été trouvées dans l'urine, et les concentrations urinaires d'un métal donné étaient faiblement corrélées avec les concentrations dans les cheveux (et comme prévu avec les concentrations dans les ongles). Les paires d'éléments les plus corrélées dans toutes les matrices biologiques (urine, cheveux, ongles des mains et des pieds) étaient le Fe et Mn, le Mn et Cr, et le Fe et Cr.

3.1.3 Différences dans l'abondance relative des métaux selon les matrices

Nos résultats ont également montré des différences dans l'abondance relative des métaux entre les cheveux et les ongles de notre cohorte et cela peut être associé à des différences dans les protéines de kératine formant ces matrices (Marshall, 1983; Ormerod et de Berker, 2019). Il existe deux types de kératines, les α - et β kératines; les α -kératines sont riches en résidus cystéine et contiennent beaucoup de ponts disulfures capables de chélater les métaux. Les concentrations de métaux plus élevées dans les ongles par rapport aux cheveux pourraient s'expliquer par le fait que la teneur en α -kératine est plus élevée dans les ongles (22 % dans les ongles et 10-14 % dans les cheveux) (Mandal *et al.*, 2003). En outre, les concentrations plus élevées de métaux dans les ongles des mains par rapport aux ongles des pieds pourraient s'expliquer par une incorporation différentielle dans la matrice germinale (où les ongles se forment) et l'épaisseur de la plaque de l'ongle (Baswan *et al.*, 2017). Les métaux sont incorporés dans la matrice germinale lors de la prolifération des kératinocytes et dans la couche très vascularisée de la plaque unguéale (Cobo-Golpe *et al.*, 2024; Cobo-Golpe *et al.*, 2023; Jaramillo Ortiz *et al.*, 2022).

3.1.4 Évaluation des mesures dans l'air et des liens avec les niveaux biologiques

Dans notre étude, des mesures dans l'air ont aussi été effectuées pour confirmer les niveaux biologiques observés. Les résultats montrent que la plupart des 12 éléments métalliques évalués étaient mesurables dans les échantillons d'air collectés dans la zone respiratoire des apprentis soudeurs dans les écoles de formation visitées. Les concentrations de fumées de soudage et leurs composantes métalliques dans l'air avaient tendance à être plus élevées dans l'une des écoles. La durée de l'échantillonnage n'a pas duré un quart de travail complet (médiane de 4 heures) car le soudage n'est pas effectué en continu pendant tout le quart de travail, principalement en raison des séances de formation théorique avec l'enseignant. Bien que les concentrations de contaminants aient été mesurées pendant une période de moins de 8 heures et que les VLEP soient des valeurs de référence pour la durée d'un quart de travail de 8 heures, les concentrations élevées de Mn (et de Fe dans une moindre mesure) pendant les évaluations de l'exposition indiquent qu'il existe un risque élevé de dépassement de la VLEP pendant une période de 8 heures, même si les apprentis soudeurs ne travaillent pas de manière aussi intensive que pendant les périodes d'échantillonnage de la présente étude. Des concentrations plus élevées de Mn et de Fe ont aussi été observées dans des études antérieures en milieu de travail (Dueck *et al.*, 2021; Insley *et al.*, 2019; Korczynski, 2000; Pesch *et al.*, 2012) et peuvent s'expliquer par leur présence dans les matériaux de base et d'électrode utilisés dans les écoles de formation, comme évoqué précédemment.

Les variations observées dans les concentrations de fumées de soudage et leurs composantes métalliques dans l'air échantillonné dans la zone respiratoire de différents apprentis soudeurs peuvent être dues au positionnement du système de ventilation locale dans chaque cabine. Les hottes ne sont efficaces pour capturer les fumées de soudage que si elles sont placées à environ un diamètre de hotte de la source (CCHS, 2017 ; Godin, 2014), alors que la plupart des hottes étaient placées à environ deux ou trois diamètres de la source. Les positions de soudage (à plat, horizontale, verticale et au-dessus de la tête) et les compétences des soudeurs sont d'autres facteurs qui peuvent contribuer aux variations observées. Par ailleurs, lors de l'observation d'une journée de pratique typique, seuls quatre participants portaient une protection respiratoire avec filtres. Il s'agit donc certainement d'une mesure de protection qui devrait être ajoutée pour réduire l'exposition dans les écoles d'apprentis soudeurs.

Bien que les mesures dans l'air aient été rapportées dans cette étude, il convient de noter que les mesures des concentrations biologiques de métaux dans l'urine, les cheveux et les ongles visent à évaluer les doses absorbées chez les participants, et représentent des niveaux biologiques intégrés dans le temps, qui dépendent des concentrations continues dans l'air, du taux d'inhalation des individus exposés, de la fraction absorbée (f_{abs_inh}) sur plusieurs jours et même plusieurs semaines ($\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{m}^3/\text{jour} \times \text{nombre de jours} \times f_{abs_inh}$). Les mesures biologiques ne sont donc pas nécessairement liées directement à un seul échantillonnage ponctuel de l'air et aux concentrations au cours d'une pratique du

procédé (tel qu'effectué dans notre étude). D'ailleurs, aucune corrélation n'a été observée entre les concentrations de métaux dans l'air et les niveaux urinaires mesurés dans notre étude. Néanmoins, certains auteurs ont montré des corrélations entre les concentrations atmosphériques et urinaires de certains métaux (Cr, Ni, Mn) chez des soudeurs professionnels exposés de manière chronique (Ellingsen *et al.*, 2015; Pesch *et al.*, 2018; Stanislawska *et al.*, 2020; Weiss *et al.*, 2013).

3.1.5 Principaux facteurs influençant les teneurs biologiques en métaux

Les résultats de l'article 3, qui était consacré essentiellement à l'influence de divers facteurs sur les niveaux biologiques de métaux dans les matrices kératinisées à différents moments pendant le programme de soudage (avant le début du programme, puis au début et à la fin des pratiques des procédés SMAW, GMAW, FCAW), montrent que la variable "temps" à mesures répétées était le prédicteur prédominant de l'augmentation des niveaux de métaux (Fe et Mn surtout, mais également Ni, Cr, Co, et As) dans les cheveux, les ongles des mains et des pieds par rapport à d'autres facteurs (variables personnelles et sociodémographiques). Les métaux qui ont montré une augmentation cohérente en fonction du temps dans les matrices kératinisées, soit les niveaux biologiques de Fe et de Mn surtout mais également de Ni et de Cr, sont des métaux également présents dans les fumées de soudage (Abdullahi et Sani, 2020; Ramzani *et al.*, 2022; Weiss *et al.*, 2013). Comme mentionné précédemment, ces métaux sont des constituants des matériaux en acier doux et des électrodes utilisées dans les écoles de formation en soudage (Dueck, 2017; Floros, 2018; Spiegel-Ciobanu *et al.*, 2020). En fait, Fe est le principal composant de la base métallique et le Mn, le Ni et le Cr sont des constituants des électrodes utilisées pendant le programme de formation en soudage. L'impact des facteurs sur les niveaux urinaires de métaux n'a pas été évalué puisque les concentrations de l'ensemble des métaux dans l'urine sont restées dans l'intervalle des niveaux de base avant le début du programme.

La variable « école » était également un prédicteur significatif de la variabilité dans les concentrations des métaux observés dans les matrices biologiques kératinisées des apprentis soudeurs examinés dans le cadre de la présente étude. Bien que les trois écoles évaluées étaient munies de salles de soudage, de meulage et d'oxycoupage similaires, « l'école 2 » avait des espaces séparés pour l'oxycoupage à l'extérieur des salles de soudage, tandis que l'oxycoupage était situé dans le coin de la salle de soudage de « l'école 1 ». En revanche, l'oxycoupage était situé au centre de la salle de soudage dans « l'école 3 ». L'utilisation des cabines de soudage variait également d'une école à l'autre; « l'école 1 » et « l'école 2 » disposaient de cabines différentes pour chaque technique de soudage, alors que toutes les techniques de soudage étaient effectuées dans la même cabine dans « l'école 3 ». Les différents niveaux de métaux observés entre les participants de ces écoles pourraient être attribués à ces différences d'aménagement de l'environnement de travail. Les espaces réduits et les activités simultanées (oxycoupage et soudage) dans la même salle de soudage de « l'école 3 » pourraient

expliquer les niveaux de métaux plus élevés détectés chez leurs participants. Chez les soudeurs professionnels, les espaces confinés ont été associés à des niveaux urinaires plus élevés de Cr et de Mn (Persoons *et al.*, 2014; Weiss *et al.*, 2013).

Par ailleurs, dans notre cohorte d'apprentis soudeurs, l'âge a influencé les niveaux de métaux dans les cheveux et a donc été introduit comme facteur de confusion dans nos modèles d'analyses multivariées évaluant les associations entre divers facteurs et les niveaux de métaux dans les cheveux. L'âge a été associé à une augmentation des niveaux de métaux dans les cheveux des soudeurs de carrière, probablement en raison des années cumulées d'expérience en soudage (Kazi *et al.*, 2021; Khaliq *et al.*, 2006; Lotah *et al.*, 2022) confirmant le lien entre l'exposition à long terme aux métaux dans l'air des milieux professionnels utilisant le soudage et des niveaux biologiques plus élevés chez les travailleurs.

Les niveaux de métaux dans les cheveux de notre cohorte d'apprentis soudeurs différaient également entre les groupes ethniques, avec des niveaux plus élevés de Cr, Fe, Mn et Ni chez les participants noirs; la variable « origine ethnique » a donc été considérée comme un facteur de confusion dans notre analyse multivariée. Ces différences dans les concentrations de métaux pourraient être attribuées au mode de vie et aux conditions environnementales. Barbosa *et al.* (2005) ont noté que les facteurs géographiques, raciaux/ethniques et écologiques peuvent avoir un impact sur la distribution des concentrations de Pb dans les cheveux au sein d'une population donnée. Les changements structurels dans les cheveux peuvent également expliquer ces différences (Adav *et al.*, 2023). Oliver *et al.* (2020) ont identifié des différences dans la structure kératinisée des cheveux parmi trois groupes ethniques (asiatiques, africains et caucasiens). Bien que cette dernière étude ait révélé que les protéines et les acides aminés composant la kératine étaient similaires dans les trois groupes ethniques, les auteurs ont rapporté que des facteurs tels que la teneur en lipides peuvent influencer la structure du cheveu.

Les données obtenues dans notre cohorte d'apprentis soudeurs ont aussi montré qu'un revenu annuel du ménage plus élevé était associé à des niveaux plus élevés d'As dans les cheveux et les ongles ; la variable « revenu annuel du ménage » a donc été considérée comme un facteur de confusion supplémentaire dans notre analyse multivariée. En règle générale, un statut socio-économique inférieur est lié à des niveaux plus élevés de métaux dans les matrices biologiques, comme l'ont montré certaines études sur les populations arabo-américaines et nigérianes (Slotnick *et al.*, 2005; Specht *et al.*, 2020). Cependant, les niveaux d'As plus élevés chez nos participants plus aisés pourraient être dus à une exposition environnementale qui n'a pas été explorée dans cette étude (Coelho *et al.*, 2014; Nasser-Eddine *et al.*, 2022; Wongsasuluk *et al.*, 2018). Par exemple, bien que les écoles évaluées dans notre étude soient principalement situées dans des zones résidentielles ou commerciales, des facteurs environnementaux

potentiels tels que le fait de vivre, de travailler ou d'étudier à proximité de zones polluées ou industrialisées pourraient également contribuer à l'exposition interne aux métaux.

Bien que l'âge, l'origine ethnique et le revenu annuel du ménage aient été introduits comme facteurs de confusion dans notre analyse multivariée, ils n'étaient pas les principaux prédicteurs de l'augmentation, en fonction du temps, des niveaux de métaux évalués dans les matrices kératinisées. Néanmoins, il est important de comprendre leur influence pour interpréter la variabilité des concentrations biologiques de métaux. Par ailleurs, l'absence d'association entre le tabagisme ou la consommation d'alcool et les concentrations de métaux dans les matrices biologiques pourrait s'expliquer par la faible exposition aux métaux due à ces habitudes. Parmi les 39 des 116 participants qui ont déclaré fumer, seuls 27 fumaient plus de 5 cigarettes par jour, et parmi les 44 participants qui ont déclaré consommer de l'alcool, seuls 10 consommaient plus de 10 boissons alcoolisées par semaine.

3.2 Limites de l'étude

Dans cette étude, les variations observées dans les niveaux de métaux entre l'urine, les cheveux et les ongles des apprentis pendant les pratiques de soudage soulignent la pertinence et l'importance de la biosurveillance multi-matrice d'éléments multiples. Néanmoins, une des limites de cette étude est l'absence de prélèvement sanguin en raison de contraintes de faisabilité et d'acceptabilité, bien que les concentrations d'éléments essentiels dans le sang et le sérum soient soumises à une forte homéostasie et que leurs mesures soient discutables pour l'évaluation de l'exposition professionnelle à long terme (Lu *et al.*, 2005; Lucchini *et al.*, 2022). La contamination externe des cheveux et des ongles a également été signalée dans certaines études (Cobo-Golpe *et al.*, 2024; Copo-Golpe *et al.*, 2023; Cooper, 2015), mais des procédures validées rigoureuses de lavage des échantillons (avec du Triton X-100 et de l'acétone) ont été suivies dans notre étude (Caron-Beaudoin *et al.*, 2019).

Dans notre étude, bien que les techniques de soudage et la composition métallique des électrodes et de la base métallique aient été assez similaires tout au long du programme de soudage dans toutes les écoles évaluées, la vérification de certaines conditions de soudage spécifiques, telles que la position du système LEV, l'utilisation d'appareils de protection respiratoire et les heures de soudage effectives pratiquées par chaque participant, s'est avérée difficile au cours des 11,8 mois de l'étude et compte tenu du nombre de participants impliqués. En outre, cette étude a estimé les doses absorbées à partir des niveaux de métal dans les cheveux, les ongles des mains et des pieds, qui intègrent la contribution de toutes les voies d'exposition (pas seulement l'exposition aérienne) et des pratiques de formation combinées, y compris le meulage et l'oxycoupage, en plus des tâches de soudage proprement dites. Il est donc complexe d'identifier les tâches spécifiques qui contribuent le plus aux niveaux de doses absorbées.

Par ailleurs, il n'a pas été possible d'effectuer des mesures en continu dans la zone respiratoire au cours du suivi longitudinal de nos participants. Les concentrations dans l'air mesurées le dernier jour de chaque module n'étaient toutefois pas corrélées aux niveaux biologiques.

3.3 Retombées de l'étude

En somme, cette recherche a fourni une démarche pour mieux évaluer l'exposition réelle aux fumées de soudage et ses composantes métalliques dans le milieu de la soudure et a montré l'importance du suivi biologique de l'exposition pour évaluer les doses réelles absorbées. Le projet a aussi permis d'identifier des situations associées à des expositions plus importantes (temps d'exposition, école et aménagement des locaux, absence de port d'appareils de protection respiratoire).

Ce protocole pourra également servir de base pour évaluer l'exposition réelle aux fumées et aux métaux et métalloïdes dans d'autres milieux de soudage que celui des apprentis d'écoles professionnelles, mais également dans d'autres milieux de travail, afin de dresser un portrait plus large de l'ampleur de l'exposition à ces éléments en milieu professionnel au Québec. En effet, de nombreux milieux de travail sont concernés par les risques pour la santé associés à l'exposition aux fumées de soudage et leurs composantes métalliques, considérées comme prioritaires, étant donné leurs effets cancérogènes, inflammatoires ou neurotoxiques. C'est le cas notamment du milieu des mines et d'extraction de la matière première, des industries de fabrication des produits métalliques, des industries de premières transformations des métaux, incluant les industries de la fonte et de l'affinage, les industries de produits électroniques et électriques et l'industrie de l'automobile.

3.4 Recommandations en termes de mesures de prévention

D'autres pratiques de gestion ont également été suggérées par certains auteurs, telles que le flux de travail, la limitation du temps de soudage et l'évaluation continue des concentrations d'air sur le lieu de travail (Mehrifar et al., 2020). En lien avec les observations dans les écoles d'apprentis et les niveaux plus élevés dans certaines écoles, pour mieux prévenir les effets sur la santé de ces travailleurs, l'utilisation plus efficace des systèmes de ventilation locale (LEV) serait à considérer. La vérification périodique du bon fonctionnement des systèmes d'extraction des fumées est également une mesure de protection collective essentielle. Selon les études publiées sur les soudeurs, une ventilation efficace, la position de la ventilation locale (LEV), le temps de soudage et la position des pièces à souder (horizontale ou verticale), l'utilisation correcte des filtres à air ou même l'utilisation d'appareils de protection respiratoire (APR) sont des mesures préventives potentielles susceptibles de réduire l'exposition des soudeurs aux fumées de soudage (Dueck *et al.*, 2021; Iarmarcovai *et al.*, 2007; Mehrifar *et al.*, 2020; Persoons *et al.*, 2014; Pesch *et al.*, 2012).

Puisque peu des apprentis soudeurs évalués portaient des appareils de protection respiratoire pendant la pratique de soudage, l'utilisation d'APR est certainement une mesure de protection qui pourrait être systématiquement mise en place pour réduire l'exposition. En effet, l'utilisation d'appareils de protection respiratoire n'était pas obligatoire dans les écoles et il n'y avait pas de recommandations concernant l'utilisation correcte ou les spécifications des filtres. Lors de l'observation des pratiques de soudage (SMAW, GMAW et FCAW), seuls 11 participants (9 %) portaient un appareil de protection respiratoire (filtres N95 ou P100). D'autres pratiques de gestion ont également été suggérées par certains auteurs, telles que le flux de travail, la limitation du temps de soudage et l'évaluation continue des concentrations d'air sur le lieu de travail (Mehrifar *et al.*, 2020).

BIBLIOGRAPHIE

- Abdullahi, I. L. et Sani, A. (2020). Welding fumes composition and their effects on blood heavy metals in albino rats. *Toxicology Reports*, 7, 1495-1501.
<https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2020.10.021>
- Adav, S. S., Leung, C. Y. et Ng, K. W. (2023). Profiling of hair proteome revealed individual demographics. *Forensic Science International: Genetics*, 66, article 102914.
<https://doi.org/10.1016/j.fsigen.2023.102914>
- Air Liquide. (2018). *Product specifications and data sheet: Blueshield LA7018-A1*. Air Liquide.
https://certs-msds.airliquide.ca/Documents/SupportDoc/Blueshield_LA_7018-A1_3_2mm_EN_7.pdf
- Ahlawat, P. et Shukla, V. (2016). Biological monitoring of lead and cadmium in blood, hair and nail of autoworkers. *International Journal of Basic and Applied Biology*, 3(2), 142-145.
https://krishisanskriti.org/vol_image/11Jun201611065148%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20PromillaAhlawat%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20%20142-145.pdf
- Altan Ferhatoğlu, Z., Göktay, F., Yaşar, Ş. et Aytekin, S. (2018). Morphology, growth rate, and thickness of the nail plate during the pregnancy. *International Journal of Dermatology*, 57(10), 1253-1258. <https://doi.org/10.1111/ijd.14152>
- Andujar, P., Simon-Deckers, A., Galateau-Sallé, F., Fayard, B., Beaune, G., Clin, B., . . . Lanone, S. (2014). Role of metal oxide nanoparticles in histopathological changes observed in the lung of welders. *Particle Fibre and Toxicology*, 11, article 23.
<https://doi.org/10.1186/1743-8977-11-23>
- Angerer, J., Aylward, L. L., Hays, S. M., Heinzow, B. et Wilhelm, M. (2011). Human biomonitoring assessment values: Approaches and data requirements. *International Journal of Hygiene and Environ Health*, 214(5), 348-360.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2011.06.002>
- Antonini, J. M., Lewis, A. B., Roberts, J. R. et Whaley, D. A. (2003). Pulmonary effects of welding fumes: Review of worker and experimental animal studies. *American Journal of Industrial Medicine*, 43(4), 350-360. <https://doi.org/10.1002/ajim.10194>
- Antonini, J. M., O'Callaghan, J. P. et Miller, D. B. (2006). Development of an animal model to study the potential neurotoxic effects associated with welding fume inhalation. *Neurotoxicology*, 27(5), 745-751. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2006.01.009>
- Antonini, J. M., Santamaria, A. B., Jenkins, N. T., Albini, E. et Lucchini, R. (2006). Fate of manganese associated with the inhalation of welding fumes: Potential neurological effects. *Neurotoxicology*, 27(3), 304-310. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2005.09.001>
- Antonini, J. M., Sriram, K., Benkovic, S. A., Roberts, J. R., Stone, S., Chen, B. T., . . . Miller, D. B. (2009). Mild steel welding fume causes manganese accumulation and subtle

- neuroinflammatory changes but not overt neuronal damage in discrete brain regions of rats after short-term inhalation exposure. *Neurotoxicology*, 30(6), 915-925. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2009.09.006>
- Antonini, J. M., Stone, S., Roberts, J. R., Chen, B., Schwegler-Berry, D., Afshari, A. A. et Frazer, D. G. (2007). Effect of short-term stainless-steel welding fume inhalation exposure on lung inflammation, injury, and defense responses in rats. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 223(3), 234-245. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2007.06.020>
- Arrandale, V. H., Beach, J., Cembrowski, G. S. et Cherry, N. M. (2015). Urinary metal concentrations among female welders. *The Annals of Occupational Hygiene*, 59(1), 52-61. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meu079>
- Asildağ, M. A., Sari, G., Koyuncu, A. et Şimşek, C. (2024). Manganism due to occupational welding fume exposure: A case report. *Industrial Health*, 62(5), 334-337. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2023-0171> .
- Audureau, E., Simon-Deckers, A., Franco-Montoya, M. L., Annangi, B., Kermanizadeh, A., Boczkowski, J. et Lanone, S. (2018). Substantial modification of the gene expression profile following exposure of macrophages to welding-related nanoparticles. *Science Reports*, 8(1), article 8554. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26988-z>
- Badding, M. A., Fix, N. R., Antonini, J. M. et Leonard, S. S. (2014). A comparison of cytotoxicity and oxidative stress from welding fumes generated with a new nickel-, copper-based consumable versus mild and stainless steel-based welding in RAW 264.7 mouse macrophages. *PLoS One*, 9(6), article e101310. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101310>
- Bailey, L. A., Kerper, L. E. et Goodman, J. E. (2018). Derivation of an occupational exposure level for manganese in welding fumes. *Neurotoxicology*, 64, 166-176. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2017.06.009>
- Baker, M. G., Criswell, S. R., Racette, B. A., Simpson, C. D., Sheppard, L., Checkoway, H. et Seixas, N. S. (2015). Neurological outcomes associated with low-level manganese exposure in an inception cohort of asymptomatic welding trainees. *Scandinavian Journal of Work and Environ Health*, 41(1), 94-101. <https://doi.org/10.5271/sjweh.3466>
- Baker, M. G., Simpson, C. D., Sheppard, L., Stover, B., Morton, J., Cocker, J. et Seixas, N. S. (2015). Variance components of short-term biomarkers of manganese exposure in an inception cohort of welding trainees. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 29, 123-129. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2014.05.004>
- Bakri, S. F. Z., Hariri, A., Ma'arop, N. F. et Hussin, N. S. A. W. (2017). Toenail as non-invasive biomarker in metal toxicity measurement of welding fumes exposure: A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 165, article 012019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/165/1/012019>

- Bakri, S. F. Z., Hariri, A. et Ismail, M. (2019). Metal fumes toxicity and its association with lung health problems among welders in automotive industry. *Journal of Physics: Conference Series*, 1150, article 012001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1150/1/012001>
- Barbosa, F., Tanus-Santos, J. E., Gerlach, R. F. et Parsons, P. J. (2005). A critical review of biomarkers used for monitoring human exposure to lead: Advantages, limitations, and future needs. *Environmental Health Perspectives*, 113(12), 1669-1674. <https://doi.org/10.1289/ehp.7917>
- Baswan, S., Kasting, G. B., Li, S. K., Wickett, R., Adams, B., Eurich, S. et Schamper, R. (2017). Understanding the formidable nail barrier: A review of the nail microstructure, composition and diseases. *Mycoses* 60(5), 284-295. <https://doi.org/10.1111/myc.12592>
- Blandin, M., Pachura, S., Magot, D. et Staudt, J.-P. (2018). Un outil d'aide à l'évaluation du risque chimique par inhalation pour l'activité de soudage. *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, 79(2), 147-159. <https://doi.org/10.1016/j.admp.2017.10.005>
- Bocca, B., Leso, V., Battistini, B., Caimi, S., Senofonte, M., Fedele, M., . . . et Iavicoli, I. (2023). Human biomonitoring and personal air monitoring: An integrated approach to assess exposure of stainless-steel welders to metal-oxide nanoparticles. *Environmental Research*, 216(Pt 3), article 114736. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114736>
- Bowler, R. M., Gysens, S., Diamond, E., Booty, A., Hartney, C. et Roels, H. A. (2003). Neuropsychological sequelae of exposure to welding fumes in a group of occupationally exposed men. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 206(6), 517-529. <https://doi.org/10.1078/1438-4639-00249>
- Bowler, R. M., Nakagawa, S., Drezgic, M., Roels, H. A., Park, R. M., Diamond, E., . . . Koller, W. (2007). Sequelae of fume exposure in confined space welding: A neurological and neuropsychological case series. *Neurotoxicology*, 28(2), 298-311. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2006.11.001>
- Bowler, R. M., Roels, H. A., Nakagawa, S., Drezgic, M., Diamond, E., Park, R., . . . Doty, R. L. (2007). Dose-effect relationships between manganese exposure and neurological, neuropsychological and pulmonary function in confined space bridge welders. *Occupational and Environmental Medicine*, 64(3), 167-77. <https://doi.org/10.1136/oem.2006.028761>
- Buitrago Cortes, J., Sarazin, P., Dieme, D., Côté, J., Ouellet, C., El Majidi, N. et Bouchard, M. (2023). Biomonitoring of exposure to multiple metal components in urine, hair and nails of apprentice welders performing Shielded Metal Arc Welding (SMAW). *Environmental Research*, 239(2), article 117361. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117361>
- Buitrago Cortes, J., Sarazin, P., Dieme, D., Côté, J., Ouellet, C., El Majidi, N. et Bouchard, M. (2024). Follow-up biomonitoring study of metal exposure in apprentice welders in Montreal, Quebec, during Gas Metal Arc Welding (GMAW). *Biological Trace Element Research*. <https://doi.org/10.1007/s12011-024-04354-7>

- Buitrago Cortes, J., Sarazin, P., Dieme, D., El Majidi, N. et Bouchard, M. (2024). Factors influencing metal concentrations in hair and nails during longitudinal follow-up of apprentice welders. *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 87(24), 1030-1049. <https://doi.org/10.1080/15287394.2024.2410283>
- Čargonja, M., Mekterović, D., Žurga, P., Ravlić-Gulan, J., Radović, I. B. et Zauhar, G. (2021). Elemental analysis of particulate matter in a metal workshop and of biological samples from exposed workers. *X-Ray Spectrometry*, 50(1), 68-79. <https://doi.org/10.1002/xrs.3197>
- Čargonja, M., Mekterović, D., Žurga, P., Ravlić-Gulan, J., Radović, I.B. et Žauhar, G. (2023). Deposition of heavy metals in biological tissues of workers in metal workshops. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(13), 36794-36806. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24746-3>
- CAREX Canada. (2023). *Welding fumes profile*. School of Population and Public Health, University of British Columbia. <https://www.carexcanada.ca/profile/welding-fumes/>
- Caron-Beaudoin, É., Bouchard, M., Wendling, G., Barroso, A., Bouchard, M. F., Ayotte, P., . . . Verner, M. A. (2019). Urinary and hair concentrations of trace metals in pregnant women from Northeastern British Columbia, Canada: A pilot study. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 29(5), 613-623. <https://doi.org/10.1038/s41370-019-0144-3>
- Carrier, G., Bouchard, M., Brunet, R. C. et Caza, M. (2001). A toxicokinetic model for predicting the tissue distribution and elimination of organic and inorganic mercury following exposure to methyl mercury in animals and humans. II. Application and validation of the model in humans. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 171(1), 50-60. <https://doi.org/10.1006/taap.2000.9113>
- Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail. (2017). *Soudage : procédés de soudage et dangers associés*. CCHST. http://www.cchst.ca/oshanswers/safety_haz/welding/overview.html
- Centers for Disease Control and Prevention. (2022). *National report on human exposure to environmental chemicals*. CDC. <https://www.cdc.gov/exposurereport/index.html>
- Chen, P., Bornhorst, J. B. et Aschner, M. (2018). Manganese metabolism in humans. *Frontiers in Biosciences-Landmark*, 23(9), 1655-1679. <https://doi.org/10.2741/4665>
- Cobo-Golpe, M., de-Castro-Ríos, A. et Lendoiro, E. (2024). Current status of keratinized matrices in toxicology: Comparison of hair and nails. *Drug Testing and Analysis*. <https://doi.org/10.1002/dta.3748>
- Cobo-Golpe, M., Lendoiro, E. et de-Castro-Ríos, A. (2023). Hair versus nails: Is there a place for other keratin matrices? Dans P. Kintz, A. Salomone et M. Vincenti (dir.), *Perspectives and challenges of hair analysis* (vol. 47, p. 244-275). RSC. <https://doi.org/10.1039/BK9781837671946-00244>

- Coelho, P., Costa, S., Costa, C., Silva, S., Walter, A., Ranville, J., . . . Teixeira, J. P. (2014). Biomonitoring of several toxic metal(loid)s in different biological matrices from environmentally and occupationally exposed populations from Panasqueira mine area, Portugal. *Environmental Geochemistry and Health*, 36(2), 255-269. <https://doi.org/10.1007/s10653-013-9562-7>
- Cooper, G. A. A. (2015). Anatomy and physiology of hair, and principles for its collection. Dans P. Kintz, A. Salomone et M. Vincenti (dir.), *Hair analysis in clinical and forensic toxicology* (p. 1-22). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801700-5.00001-7>
- Criswell, S. R., Nielsen, S. S., Warden, M., Perlmutter, J. S., Moerlein, S. M., Flores, H. P., . . . et Racette, B. A. (2018). [¹⁸F]FDOPA positron emission tomography in manganese-exposed workers. *Neurotoxicology*, 64, 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2017.07.004>
- Criswell, S. R., Perlmutter, J. S., Videen, T. O., Moerlein, S. M., Flores, H. P., Birke, A. M. et Racette, B. A. (2011). Reduced uptake of [¹⁸F]FDOPA PET in asymptomatic welders with occupational manganese exposure. *Neurology*, 76(15), 1296-1301. <https://doi.org/10.1212/WNL.0b013e3182152830>
- 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-D9. <https://doi.org/10.1080/15459624.2013.836280>
- Dierschke, K., Isaxon, C., Andersson, U. B. K., Assarsson, E., Axmon, A., Stockfelt, L., . . . et Nielsen, 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. <https://doi.org/10.1007/s00420-017-1209-z>
- Dueck, M. E., Rafiee, A., Mino, J., Nair, S. G., Kamravaei, S., Pei, L. et Quémérais, B. (2021). Welding fume exposure and health risk assessment in a cohort of apprentice welders. *Annals of Work Exposures and Health*, 65(7), 775-788. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxab016>
- Ellingsen, D. G., Chashchin, M., Bast-Pettersen, R., Zibarev, E., Thomassen, Y. et Chashchin, V. (2015). A follow-up study of neurobehavioral functions in welders exposed to manganese. *Neurotoxicology*, 47, 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2014.12.012>
- Ellingsen, D. G., Chashchin, M., Berlinger, B., Fedorov, V., Chashchin, V. et Thomassen, Y. (2017). Biological monitoring of welders' exposure to chromium, molybdenum, tungsten and vanadium. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 41, 99-106. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2017.03.002>
- El-Zein, M. (2003). *Respiratory and systemic health of apprentice-welders: A prospective study* (thèse de doctorat, McGill University). <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/n870zr24w>

Emploi et Développement social Canada. (2024). *Soudeur/soudeuse au Canada : perspectives d'emploi*. Gouvernement du Canada.

<https://www.guichetemplois.gc.ca/rapportmarche/perspectives-profession/23242/ca>

Evrenoglou, L., Partsinevelou, A. S. et Nicolopoulou-Stamati, P. (2017). Correlation between concentrations of heavy metals in children's scalp hair and the environment: A case study from Kifissos River in Attica, Greece. *Global NEST Journal*, 19(4), 592-600.

<https://doi.org/10.30955/gnj.002349>

Exocor. (2015). *Documentation (SDS - Executive 70S-6 CC)*. Exocor.

<https://exocor.com/msds/documentation.html>

Faure, S., Noisel, N., Werry, K., Karthikeyan, S., Aylward, L. L. et St-Amand, A. (2020). Evaluation of human biomonitoring data in a health risk based context: An updated analysis of population level data from the Canadian Health Measures Survey.

International Journal of Hygiene and Environmental Health, 223(1), 267-280.

<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.07.009>

Fleckman, P. (1985). Anatomy and physiology of the nail. *Dermatologic Clinics*, 3(3), 373-381.

[https://www.derm.theclinics.com/article/S0733-8635\(18\)30874-X/abstract](https://www.derm.theclinics.com/article/S0733-8635(18)30874-X/abstract)

Floros, N. (2018). Welding fume main compounds and structure. *Welding in the World*, 62(2), 311-316.

<https://doi.org/10.1007/s40194-018-0552-3>

Flynn, M. R. et Susi, P. (2009). Neurological risks associated with manganese exposure from welding operations: A literature review. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 212(5), 459-469.

<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2008.12.003>

Fryzek, J. P., Hansen, J., Cohen, S., Bonde, J. P., Llabias, M. T., Kolstad, H. A., . . . Olsen, J. H. (2005). A cohort study of Parkinson's disease and other neurodegenerative disorders in Danish welders. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 47(5), 466-472.

<https://doi.org/10.1097/01.jom.0000161730.25913.bf>

Godin, C. (2014). *Prévention pour le soudage et le coupage : guide (2^e éd.)*. Multiprévention.

<https://multiprevention.org/wp-content/uploads/2018/11/guide-multiprevention-soudage-coupage.pdf>

Goullé, J. P., Sausseureau, E., Mahieu, L., Bouige, D., Groenwont, S., Guerbet, M. et Lacroix, C. (2009). Application of inductively coupled plasma mass spectrometry multielement analysis in fingernail and toenail as a biomarker of metal exposure. *Journal of Analytical Toxicology*, 33(2), 92-98.

<https://doi.org/10.1093/jat/33.2.92>

Goyer, R. A., Klaassen, K. et Waalkes, M. P. (2016). *Metal toxicology: Approaches and methods*. Academic Press.

Grashow, R., Zhang, J., Fang, S. C., Weisskopf, M. G., Christiani, D. C. et Cavallari, J. M. (2014). Toenail metal concentration as a biomarker of occupational welding fume exposure. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 11(6), 397-405.

<https://doi.org/10.1080/15459624.2013.875182>

- Gregus, Z. et Klaassen, C. D. (1986). Disposition of metals in rats: A comparative study of fecal, urinary, and biliary excretion and tissue distribution of eighteen metals. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 85(1), 24-38. [https://doi.org/10.1016/0041-008x\(86\)90384-4](https://doi.org/10.1016/0041-008x(86)90384-4)
- Hannu, T., Piipari, R., Kasurinen, H., Keskinen, H., Tuppurainen, M. et Tuomi, T. (2005). Occupational asthma due to manual metal-arc welding of special stainless steels. *European Respiratory Journal*, 26(4), 736-739. <https://doi.org/10.1183/09031936.05.00130504>
- Hariri, A., Mohamad Noor, N., Paiman, N. A., Ahmad Zaidi, A. M. et Zainal Bakri, S. F. (2018). Heavy metals found in the breathing zone, toenails and lung function of welders working in an air-conditioned welding workplace. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 24(4), 646-651. <https://doi.org/10.1080/10803548.2017.1368950>
- Harkey, M. R. (1993). Anatomy and physiology of hair. *Forensic Science International*, 63(1-3), 9-18. [https://doi.org/10.1016/0379-0738\(93\)90255-9](https://doi.org/10.1016/0379-0738(93)90255-9)
- Hassani, H., Golbabaie, F., Shirkhanloo, H. et Tehrani-Doust, M. (2016). Relations of biomarkers of manganese exposure and neuropsychological effects among welders and ferroalloy smelters. *Industrial Health*, 54(1), 79-86. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2014-0250>
- Hays, S. M. et Aylward, L. L. (2009). Using biomonitoring equivalents to interpret human biomonitoring data in a public health risk context. *Journal of Applied Toxicology*, 29(4), 275-288. <https://doi.org/10.1002/jat.1410>
- Hays, S. M., Aylward, L. L., Gagné, M., Nong, A. et Krishnan, K. (2010). Biomonitoring equivalents for inorganic arsenic. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 58(1), 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2010.06.002>
- He, K. (2011). Trace elements in nails as biomarkers in clinical research. *European Journal of Clinical Investigation*, 41(1), 98-102. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2362.2010.02373.x>
- Heitland, P. et Köster, H. D. (2021). Human biomonitoring of 73 elements in blood, serum, erythrocytes and urine. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 64, article 126706. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2020.126706>
- Hobart Filler Metals. (2024). *Hobart 418*. Hobart Filler Metals. <https://www.hobartbrothers.com/products/product-details/?hbproductname=Hobart%20418>
- Hoet, P., Vanmarcke, E., Geens, T., Deumer, G., Haufroid, V. et Roels, H. A. (2012). Manganese in plasma: A promising biomarker of exposure to Mn in welders. A pilot study. *Toxicology Letters*, 213, 69-74. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2011.06.013>
- Hossain, M. B., Li, H., Hedmer, M., Tinnerberg, H., Albin, M. et Broberg, K. (2015). Exposure to welding fumes is associated with hypomethylation of the F2RL3 gene: A cardiovascular disease marker. *Occupational and Environmental Medicine*, 72(12), 845-851. <https://doi.org/10.1136/oemed-2015-102884>

- International Agency for Research on Cancer. (1990). *IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: Chromium, nickel and welding* (vol. 49). IARC.
- International Agency for Research on Cancer. (2012). *Arsenic, metals, fibres and dusts: IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans* (vol. 100 C). IARC. <https://monographs.iarc.fr/iarc-monographs-on-the-evaluation-of-carcinogenic-risks-to-humans-19/>
- International Agency for Research on Cancer. (2024). *List of classifications: Agents classified by the IARC monographs, volumes 1-137*. IARC. <https://monographs.iarc.who.int/list-of-classifications>
- Iarmarcovai, G., Sari-Minodier, I., Fassi, R., Pittilloni, A., Vigneron, B., Catani, J. et Botta, A. (2007). Caractérisation de l'exposition aux fumées de soudage en atelier dans le secteur du BTP. *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, 68(3), 233-243. [https://doi.org/10.1016/s1775-8785\(07\)88935-1](https://doi.org/10.1016/s1775-8785(07)88935-1)
- Iijima, Y., Bando, M., Yamasawa, H., Moriyama, H., Takemura, T., Niki, T. et Sugiyama, Y. (2017). A case of mixed dust pneumoconiosis with desquamative interstitial pneumonia-like reaction in an aluminum welder. *Respiratory Medicine Case Reports*, 20, 150-153. <https://doi.org/10.1016/j.rmcr.2017.02.002>
- Insley, A. L., Maskrey, J. R., Hallett, L. A., Reid, R. C. D., Hynds, E. S., Winter, C. et Panko, J. M. (2019). Occupational survey of airborne metal exposures to welders, metalworkers, and bystanders in small fabrication shops. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 16(6), 410-421. <https://doi.org/10.1080/15459624.2019.1603389>
- Ishihara, N. et Matsushiro, T. (1986). Biliary and urinary excretion of metals in humans. *Archives of Environmental Health*, 41(5), 324-30. <https://doi.org/10.1080/00039896.1986.9936705>
- Jaishankar, M., Tseten, T., Anbalagan, N., Mathew, B. B. et Beeregowda, K. N. (2014). Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2), 60-72. <https://doi.org/10.2478/intox-2014-0009>
- Jaramillo Ortiz, S., Howsam, M., van Aken, E. H., Delanghe, J. R., Boulanger, E. et Tessier, F. J. (2022). Biomarkers of disease in human nails: A comprehensive review. *Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences*, 59(2), 125-141. <https://doi.org/10.1080/10408363.2021.1991882>
- Khalique, A., Shah, M. H., Jaffar, M., Shaheen, N., Tariq, S. R. et Manzoor, S. (2006). Scalp hair metal analysis in the assessment of the occupational exposure of arc welders. *Toxicology and Environmental Chemistry*, 88(4), 697-704. <https://doi.org/10.1080/02772240600883627>
- Katz, S. A. (2019). On the use of hair analysis for assessing arsenic intoxication. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6), article 977. <https://doi.org/10.3390/ijerph16060977>

- Kazi, T. G., Baloch, S., Baig, J. A., Afridi, H. I. et Arain, M. B. (2021). Evaluate the adverse impact of metal oxide on workers of different age groups that engage with gas metal arc welding process: Health risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(7), 8652-8661. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11192-2>
- Kazi, T. G., Shah, F., Afridi, H. I. et Naeemullah. (2015). Occupational and environmental lead exposure to adolescent workers in battery recycling workshops. *Toxicology and Industrial Health*, 31(12), 1288-1295. <https://doi.org/10.1177/0748233713485883>
- Khalique, A., Shah, M. H., Jaffar, M., Shaheen, N., Tariq, S. R. et Manzoor, S. (2006). Scalp hair metal analysis in the assessment of the occupational exposure of arc welders. *Toxicological and Environmental Chemistry*, 88(4), 697-704. <https://doi.org/10.1080/02772240600883627>
- Keane, M., Stone, S., Chen, B., Slaven, J., Schwegler-Berry, D. et Antonini, J. (2009). Hexavalent chromium content in stainless steel welding fumes is dependent on the welding process and shield gas type. *Journal of Environmental Monitoring*, 11(2), 418-424. <https://doi.org/10.1039/b814063d>
- Kenborg, L., Lassen, C. F., Hansen, J. et Olsen, J. H. (2012). Parkinson's disease and other neurodegenerative disorders among welders: A Danish cohort study. *Movement Disorders*, 27(10), 1283-1289. <https://doi.org/10.1002/mds.25125>
- Knudsen, L. E., Boisen, T., Christensen, J. M., Jelnes, J. E., Jensen, G. E., Jensen, J. C., . . . Zebitz, U. (1992). Biomonitoring of genotoxic exposure among stainless steel welders. *Mutation Research/Genetic Toxicology*, 279(2), 129-143. [https://doi.org/10.1016/0165-1218\(92\)90255-X](https://doi.org/10.1016/0165-1218(92)90255-X)
- Koh, D.-H., Kim, J.-I., Kim, K.-H. et Yoo, S.-W. (2015). Welding fume exposure and chronic obstructive pulmonary disease in welders. *Occupational Medicine*, 65(1), 72-77. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqu136>
- Korczynski, R. E. (2000). Occupational health concerns in the welding industry. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 15(12), 936-945. <https://doi.org/10.1080/104732200750051175>
- Laohaudomchok, W., Lin, X., Herrick, R. F., Fang, S. C., Cavallari, J. M., Christiani, D. C. et Weisskopf, M. G. (2011). Toenail, blood, and urine as biomarkers of manganese exposure. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 53(5), 506-510. <https://doi.org/10.1097/JOM.0b013e31821854da>
- Langley, R. L. (1991). Fume fever and reactive airways dysfunction syndrome in a welder. *Southern Medical Journal*, 84(8), 1034-1036.
- LeBlanc, A., Lapointe, S., Beaudet, A., Côté, I., Dumas, P., Labrecque, F., . . . Gingras, S. (2004). *Étude sur l'établissement de valeurs de référence d'éléments traces et de métaux dans le sang, le sérum et l'urine de la population de la grande région de Québec*. INSPQ. <https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/publications/289-valeursreferencemetaux.pdf>

- Lehnert, M., Hoffmeyer, F., Gawrych, K., Lotz, A., Heinze, E., Berresheim, H., . . . Brüning, T. (2015). Effects of exposure to welding fume on lung function: Results from the German WELDOX study. Dans M. Pokorski (édit.), *Environment exposure to pollutants* (p. 1-13). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/5584_2014_65
- Li, H., Hedmer, M., Kåredal, M., Bjork, J., Stockfelt, L., Tinnerberg, H., . . . Broberg, K. (2015). A cross-sectional study of the cardiovascular effects of welding fumes. *PLoS One*, 10(7), article e0131648. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0131648>
- Li, H., Hedmer, M., Wojdacz, T., Hossain, M. B., Lindh, C. H., Tinnerberg, H., Albin, M. et Broberg, K. (2015). Oxidative stress, telomere shortening, and DNA methylation in relation to low-to-moderate occupational exposure to welding fumes. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 56(8), 684-693. <https://doi.org/10.1002/em.21958>
- Lillienberg, L., Zock, J. P., Kromhout, H., Plana, E., Jarvis, D., Torén, K. et Kogevinas, M. (2008). A population-based study on welding exposures at work and respiratory symptoms. *The Annals of Occupational Hygiene*, 52(2), 107-115. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mem063>
- Liss, G. M. (1985). *Health effects of welding and cutting fume*. G. Liss.
- Loomis, D., Dzhambov, A. M., Momen, N. C., Chartres, N., Descatha, A., Guha, N., . . . Pega, F. (2022). The effect of occupational exposure to welding fumes on trachea, bronchus and lung cancer: A systematic review and meta-analysis from the WHO/ILO joint estimates of the work-related burden of disease and injury. *Environment International*, 170, article 107565. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107565>
- Lotah, H. N. A., Agarwal, A. K. et Khanam, R. (2022). Heavy metals in hair and nails as markers of occupational hazard among welders working in United Arab Emirates. *Toxicological Research*, 38(1), 63-68. <https://doi.org/10.1007/s43188-021-00091-4>
- Lu, L., Zhang, L. L., Li, G. J., Guo, W., Liang, W. et Zheng, W. (2005). Alteration of serum concentrations of manganese, iron, ferritin, and transferrin receptor following exposure to welding fumes among career welders. *Neurotoxicology*, 26(2), 257-265. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2004.09.001>
- Lucchini, R. G., Aschner, M. et Kim, Y. (2022). Manganese. Dans G. F. Nordberg et M. Costa (édit.), *Handbook on the toxicology of metals* (5^e éd., p. 501-538). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822946-0.00019-2>
- MacLeod, J. S., Harris, M. A., Tjepkema, M., Peters, P. A. et Demers, P. A. (2017). Cancer risks among welders and occasional welders in a national population-based cohort study: Canadian Census Health and Environmental Cohort. *Safety and Health at Work*, 8(3), 258-266. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2016.12.001>
- Madkour, L. H. (2020). Manganese as the essential element in oxidative stress and metabolic diseases. Dans L. H. Madkour (édit.), *Reactive oxygen species (ros), nanoparticles, and endoplasmic reticulum (er) stress-induced cell death mechanisms* (p. 81-105). Academic Press.

- Mandal, B. K., Ogra, Y. et Suzuki, K. T. (2003). Speciation of arsenic in human nail and hair from arsenic-affected area by HPLC-inductively coupled argon plasma mass spectrometry. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 189(2), 73-83. [https://doi.org/10.1016/S0041-008X\(03\)00088-7](https://doi.org/10.1016/S0041-008X(03)00088-7)
- Marsh, G. M. et Gula, M. J. (2006). Employment as a welder and Parkinson disease among heavy equipment manufacturing workers. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 48(10), 1031-1046. <https://doi.org/10.1097/01.jom.0000232547.74802.d8>
- Marshall, R. C. (1983). Characterization of the proteins of human hair and nail by electrophoresis. *Journal of Investigative Dermatology*, 80(6), 519-524. <https://doi.org/10.1111/1523-1747.ep12535117>
- Mehra, R. et Juneja, M. (2005). Fingernails as biological indices of metal exposure. *Journal of Biosciences*, 30(2), 253-257. <https://doi.org/10.1007/BF02703706>
- Mehrifar, Y., Mohebian, Z. et Bidel, H. (2020). Exploring the risk of welders' exposure to the gases and metal fumes in a shipbuilding industry: A case study. *Journal of Health and Safety at Work*, 10(2), 129-137.
- Mocevic, E., Kristiansen, P. et Bonde, J. P. (2015). Risk of ischemic heart disease following occupational exposure to welding fumes: A systematic review with meta-analysis. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 88(3), 259-272. <https://doi.org/10.1007/s00420-014-0965-2>
- Moitra, S., Ghosh, J., Firdous, J., Bandyopadhyay, A., Mondal, M., Biswas, J. K., . . . Moitra, S. (2018). Exposure to heavy metals alters the surface topology of alveolar macrophages and induces respiratory dysfunction among Indian metal arc-welders. *Toxicology and Industrial Health*, 34(12), 908-921. <https://doi.org/10.1177/0748233718804426>
- Momen, A. A., Khalid, M. A. A., Elsheikh, M. A. A. et Ali, D. M. H. (2015). Trace elements in scalp hair and fingernails as biomarkers in clinical studies. *Journal of Health Specialties*, 3(1), article 28.
- Mortimer, J. A., Borenstein, A. R., et Nelson, L. M. (2012). Associations of welding and manganese exposure with Parkinson disease: Review and meta-analysis. *Neurology*, 79(11), 1174-1180. <https://doi.org/10.1212/WNL.0b013e3182698ced>
- Nasser-Eddine, N., Noisel, N., Dieme, D., Asmar, M. K., Issa, S. T. et Bouchard, M. (2022). Multi-matrix biomonitoring approach to assess exposure to metals and trace elements in the Lebanese population and associations with drinking water consumption. *Environmental Research*, 214(Pt 3), article 113982. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113982>
- National Institutes of Health. (1996a). *NTP technical report on the toxicology and carcinogenesis studies of nickel oxide (CAS No. 1313-99-1) in F344/N rats and B6C3F₁ mice (inhalation studies)* (NTP TR n° 451). NIH

- National Institutes of Health. (1996b). *NTP technical report on the toxicology and carcinogenesis studies of nickel subsulfide (CAS No. 12035-72-2) in F344/N rats and B6C3F₁ mice (inhalation studies)* (NTP TR n° 453). NIH.
- National Institutes of Health. (1996c). *NTP technical report on the toxicology and carcinogenesis studies of nickel sulfate hexahydrate (CAS No. 10101-97-0) in F344/N rats and B6C3F₁ mice (inhalation studies)* (NTP TR n° 454). NIH.
- Nisse, C., Tagne-Fotso, R., Howsam, M., Richeval, C., Labat, L. et Leroyer, A. (2017). Blood and urinary levels of metals and metalloids in the general adult population of Northern France: The IMEPOGE study, 2008–2010. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 220(2, Part B), 341-363.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2016.09.020>
- Noisel, N., Carrier, G. et Bouchard, M. (2014). Study of selenium intake and disposition in various matrices based on mathematical algorithms derived from pooled biomonitoring data. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 217(7), 796-804.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2014.04.005>
- Normandin, L., Ayotte, P., Levallois, P., Ibanez, Y., Courteau, M., Kennedy, G., . . . Bouchard, M. (2014). Biomarkers of arsenic exposure and effects in a Canadian rural population exposed through groundwater consumption. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 24(2), 127-134. <https://doi.org/10.1038/jes.2013.80>
- Oberdörster, G. (1995). Lung particle overload: Implications for occupational exposures to particles. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 21(1), 123-135.
<https://doi.org/10.1006/rtph.1995.1017>
- Oberdörster, G. (2001). Pulmonary effects of inhaled ultrafine particles. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 74(1), 1-8.
<https://doi.org/10.1007/s004200000185>
- Oliver, M. A., Coderch, L., Carrer, V., Barba, C. et Marti, M. (2020). Ethnic hair: Thermoanalytical and spectroscopic differences. *Skin Research and Technology*, 26(5), 617-626. <https://doi.org/10.1111/srt.12842>
- Oller, A. R., Costa, M. et Oberdörster, G. (1997). Carcinogenicity assessment of selected nickel compounds. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 143(1), 152-166.
<https://doi.org/10.1006/taap.1996.8075>
- Ormerod, E. K. C. et de Berker, D. (2019). Anatomy and physiology of the nail. Dans A. Tosti (dir.), *Nail disorders* (p. 1-11). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-54433-7.00001-5>
- Palmer, K. T., Cullinan, P., Rice, S., Brown, T. et Coggon, D. (2009). Mortality from infectious pneumonia in metal workers: A comparison with deaths from asthma in occupations exposed to respiratory sensitizers. *Thorax*, 64(11), 983-986.
<https://doi.org/10.1136/thx.2009.114280>

- Palmer, K. T., Poole, J., Ayres, J. G., Mann, J., Burge, P. S. et Coggon, D. (2003). Exposure to metal fume and infectious pneumonia. *American Journal of Epidemiology*, 157(3), 227-233. <https://doi.org/10.1093/aje/kwf188>
- Persoons, R., Arnoux, D., Monssu, T., Culie, O., Roche, G., Duffaud, B., . . . Maitre, A. (2014). Determinants of occupational exposure to metals by gas metal arc welding and risk management measures: A biomonitoring study. *Toxicology Letters*, 231(2), 135-141. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2014.09.008>
- Pesch, B., Lehnert, M., Weiss, T., Kendzia, B., Menne, E., Lotz, A., . . . Bruning, T. (2018). Exposure to hexavalent chromium in welders: Results of the WELDOX II field study. *Annals of Work Exposures and Health*, 62(3), 351-361. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxy004>
- Pesch, B., Weiss, T., Kendzia, B., Henry, J., Lehnert, M., Lotz, A., . . . Bruning, T. (2012). Levels and predictors of airborne and internal exposure to manganese and iron among welders. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 22(3), 291-298. <https://doi.org/10.1038/jes.2012.9>
- Présumé, M., Simon-Deckers, A., Tomkiewicz-Raulet, C., Le Grand, B., Tran Van Nhieu, J., Beaune, G., . . . Andujar, P. (2016). Exposure to metal oxide nanoparticles administered at occupationally relevant doses induces pulmonary effects in mice. *Nanotoxicology*, 10(10), 1535-1544. <https://doi.org/10.1080/17435390.2016.1242797>
- Quémerais, B., Cassiède, M., Nair, S., Mino, J., Dueck, M., Kamravaei, S., . . . Lacy, P. (2018, 5-9 novembre). *Metals and metabolites as markers of exposure in welder apprentices* [Communication]. Nanosafe 2018, Grenoble, France.
- Racette, B. A., Criswell, S. R., Lundin, J. I., Hobson, A., Seixas, N., Kotzbauer, P. T., . . . Sheppard, L. (2012). Increased risk of parkinsonism associated with welding exposure. *Neurotoxicology*, 33(5), 1356-1361. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2012.08.011>
- Racette, B. A., Searles Nielsen, S., Criswell, S. R., Sheppard, L., Seixas, N., Warden, M. N. et Checkoway, H. (2017). Dose-dependent progression of parkinsonism in manganese-exposed welders. *Neurology*, 88(4), 344-351. <https://doi.org/10.1212/wnl.0000000000003533>
- Racette, B. A., Tabbal, S. D., Jennings, D., Good, L., Perlmutter, J. S. et Evanoff, B. (2005). Prevalence of parkinsonism and relationship to exposure in a large sample of Alabama welders. *Neurology*, 64(2), 230-235. <https://doi.org/10.1212/01.WNL.0000149511.19487.44>
- Rahmani, A., Golbabaie, F., Dehghan, S. F., Mazlomi, A. et Akbarzadeh, A. (2016). Assessment of the effect of welding fumes on welders' cognitive failure and health-related quality of life. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 22(3), 426-432. <https://doi.org/10.1080/10803548.2016.1164499>
- Ramzani, S., Khanjani, N., Mohammadyan, M., Babanezhad, E. et Yazdani-charati, J. (2022). Occupational exposure to manganese among welders: Association between airborne manganese concentration and blood manganese levels. *Health Scope*, 11(1), article e120968. <https://doi.org/10.5812/jhealthscope.120968>

Ratelle, M., Skinner, K., Laird, M. J., Majowicz, S., Brandow, D., Packull-McCormick, S. . . Laird, B. D. (2018). Implementation of human biomonitoring in the Dehcho region of the Northwest Territories, Canada (2016–2017). *Archives of Public Health*, 76(1), article 73. <https://doi.org/10.1186/s13690-018-0318-9>

Règlement sur la santé et la sécurité du travail, RLRQ, c. S-2.1, r. 13.

Reiss, B., Simpson, C. D., Baker, M. G., Stover, B., Sheppard, L. et Seixas, N. S. (2016). Hair manganese as an exposure biomarker among welders. *The Annals of Occupational Hygiene*, 60(2), 139-149. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mev064>

Riccelli, M. G., Goldoni, M., Andreoli, R., Mozzoni, P., Pinelli, S., Alinovi, R., . . . Corradi, M. (2018). Biomarkers of exposure to stainless steel tungsten inert gas welding fumes and the effect of exposure on exhaled breath condensate. *Toxicology Letters*, 292, 108-114. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2018.04.032>

Ross, J. A., Macdiarmid, J. I., Semple, S., Watt, S. J., Moir, G. et Henderson, G. (2013). Cognitive symptoms and welding fume exposure. *The Annals of Occupational Hygiene*, 57(1), 26-33. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mes042>

Roszbach, B., Buchta, M., Csanády, G. A., Filser, J. G., Hilla, W., Windorfer, K., . . . Letzel, S. (2006). Biological monitoring of welders exposed to aluminium. *Toxicology Letters*, 162(2-3), 239-245. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2005.09.018>

Santé Canada. (2013). *Second report on human biomonitoring of environmental chemicals in Canada: Results of the Canadian Health Measures Survey Cycle 2 (2009–2011)*. Santé Canada. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/environmental-workplace-health/reports-publications/environmental-contaminants/second-report-human-biomonitoring-environmental-chemicals-canada-health-canada-2013.html>

Santé Canada. (2019). *Fifth report on human biomonitoring of environmental chemicals in Canada: Results of the Canadian Health Measures Survey Cycle 5 (2016–2017)*. Santé Canada. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/environmental-workplace-health/reports-publications/environmental-contaminants/fifth-report-human-biomonitoring.html>

Santé Canada. (2021). *Sixth report on human biomonitoring of environmental chemicals in Canada: Results of the Canadian Health Measures Survey Cycle 6 (2018–2019)*. Santé Canada. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/environmental-workplace-health/reports-publications/environmental-contaminants/sixth-report-human-biomonitoring.html>

Sarazin, P., Bakhiyi, B. et Lévesque, M. (2020). *Influence des paramètres de soudage à l'arc électrique sur les concentrations de fumées et leurs composantes métalliques* (Rapport n° R-1085). IRSST. <https://pharesst.irsst.qc.ca/expertises-revues/13/>

Sato, K., Ueyama, H., Arakawa, R., Kumamoto, T. et Tsuda, T. (2000). A case of welder presenting with parkinsonism after chronic manganese exposure. *Rinsho Shinkeigaku/Clinical Neurology*, 40(11), 1110-1115.

- Scimeca, M., Feola, M., Romano, L., Rao, C., Gasbarra, E., Bonanno, E., . . . Tarantino, U. (2017). Heavy metals accumulation affects bone microarchitecture in osteoporotic patients. *Environmental Toxicology*, 32(4), 1333-1342. <https://doi.org/10.1002/tox.22327>
- Sen, S., Flynn, M. R., Du, G., Troster, A. I., An, H. et Huang, X. (2011). Manganese accumulation in the olfactory bulbs and other brain regions of asymptomatic welders. *Toxicological Sciences*, 121(1), 160-167. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfr033>
- Slotnick, M. J., Nriagu, J. O., Johnson, M. M., Linder, A. M., Savoie, K. L., Jamil, H. J. et Hammad, A. S. (2005). Profiles of trace elements in toenails of Arab-Americans in the Detroit area, Michigan. *Biological Trace Element Research*, 107(2), 113-126. <https://doi.org/10.1385/bter:107:2:113>
- Smargiassi, A., Baldwin, M., Savard, S., Kennedy, G., Mergler, D. et Zayed, J. (2000). Assessment of exposure to manganese in welding operations during the assembly of heavy excavation machinery accessories. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 15(10), 746-750. <https://doi.org/10.1080/10473220050129383>
- Specht, A. J., Dickerson, A. S., Kponee-Shovein, K. Z., Nkpaa, K. W. et Weisskopf, M. G. (2020). Toenail metal exposures in fishermen from Bodo City, Nigeria. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 104(1), 90-95. <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02750-7>
- Spiegel-Ciobanu, V. E., Costa, L. et Zschiesche, W. (2020). *Hazardous substances in welding and allied processes*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-36926-2>
- Stanislawska, M., Janasik, B., Kuras, R., Malachowska, B., Halatek, T. et Wasowicz, W. (2020). Assessment of occupational exposure to stainless steel welding fumes: A human biomonitoring study. *Toxicology Letters*, 329, 47-55. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2020.04.019>
- Szücs-Somlyó, É., Lehel, J., Májlínger, K., Lőrincz, M. et Kővágó, C. (2023). Metal-oxide inhalation induced fever: Immunotoxicological aspects of welding fumes. *Food and Chemical Toxicology*, 175, article 113722. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2023.113722>
- Tinkov, A. A., Skalnaya, M. G., Ajsuvakova, O. P., Serebryansky, E. P., Chao, J. C. J., Aschner, M. et Skalny, A. V. (2021). Selenium, Zinc, Chromium, and Vanadium Levels in Serum, Hair, and Urine Samples of Obese Adults Assessed by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry. *Biological Trace Element Research*, 199(2), 490-499. <https://doi.org/10.1007/s12011-020-02177-w>
- van der Mark, M., Vermeulen, R., Nijssen, P. C., Mulleners, W. M., Sas, A. M., van Laar, T., . . . Kromhout, H. (2015). Occupational exposure to solvents, metals and welding fumes and risk of Parkinson's disease. *Parkinsonism & Related Disorders*, 21(6), 635-639. <https://doi.org/10.1016/j.parkreldis.2015.03.025>
- Ward, E. J., Edmondson, D. A., Nour, M. M., Snyder, S., Rosenthal, F. S. et Dydak, U. (2017). Toenail manganese: A sensitive and specific biomarker of exposure to manganese in career welders. *Annals of Work Exposures and Health*, 62(1), 101-111. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxx091>

- Weiss, T., Pesch, B., Lotz, A., Gutwinski, E., Van Gelder, R., Punkenburg, E., . . . The WELDOX Group. (2013). Levels and predictors of airborne and internal exposure to chromium and nickel among welders: Results of the WELDOX study. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 216(2), 175-183. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2012.07.003>
- Wilhelm, M. et Idel, H. (1996). Hair analysis in environmental medicine. *Zentralblatt für Hygiene und Umweltmedizin/International Journal of Hygiene and Environmental Medicine*, 198(6), 485-501.
- Witholt, R., Gwiazda, R. H. et Smith, D. R. (2000). The neurobehavioral effects of subchronic manganese exposure in the presence and absence of pre-parkinsonism. *Neurotoxicology and Teratology*, 22(6), 851-861. [https://doi.org/10.1016/s0892-0362\(00\)00108-2](https://doi.org/10.1016/s0892-0362(00)00108-2)
- Wittczak, T., Dudek, W., Walusiak-Skorupa, J., Swierczynska-Machura, D., Cader, W., Kowalczyk, M. et Palczynski, C. (2012). Metal-induced asthma and chest X-ray changes in welders. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 25(3), 242-250. <https://doi.org/10.2478/S13382-012-0031-9>
- Wongsasuluk, P., Chotpantarat, S., Siriwong, W. et Robson, M. (2018). Using hair and fingernails in binary logistic regression for bio-monitoring of heavy metals/metalloid in groundwater in intensively agricultural areas, Thailand. *Environmental Research*, 162, 106-118. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.024>
- Wu, Z.-W., Xu, J.-Y., Jiao, Y., Fan, S.-J., He, K. et Qin, L.-Q. (2012). Fingernail growth rate and macroelement levels determined by ICP-OES in healthy Chinese college students. *Polish Journal of Environmental Studies* 21(4), 1067-1070.
- Wu, A. C., Allen, J. G., Coull, B., Amarasiriwardena, C., Sparrow, D., Vokonas, P., . . . Weisskopf, M. G. (2019). Correlation over time of toenail metals among participants in the VA normative aging study from 1992 to 2014. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 29(5), 663-673. <https://doi.org/10.1038/s41370-018-0095-0>
- Wultsch, G., Nersesyan, A., Kundi, M., Jakse, R., Beham, A., Wagner, K. H. et Knasmueller, S. (2014). The sensitivity of biomarkers for genotoxicity and acute cytotoxicity in nasal and buccal cells of welders. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 217(4-5), 492-498. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2013.09.005>
- Yaemsiri, S., Hou, N., Slining, M. M. et He, K. (2010). Growth rate of human fingernails and toenails in healthy American young adults. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 24(4), 420-423. <https://doi.org/10.1111/j.1468-3083.2009.03426.x>
- Zeidler-Erdely, P. C., Erdely, A. et Antonini, J. M. (2012). Immunotoxicology of arc welding fume: Worker and experimental animal studies. *Journal of Immunotoxicology*, 9(4), 411-425. <https://doi.org/10.3109/1547691X.2011.652783>