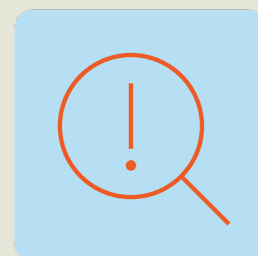


Évaluation de la performance de divers dispositifs de prélèvement d'isocyanates dans l'air lors de l'application de vernis polyuréthane en carrosserie automobile

Simon Aubin¹, Hugues Ahientio², Loïc Wingert¹, Sébastien
Gagné¹, Livain Breau², Jacques Lesage²

RS-1236-fr





NOS RECHERCHES travaillent pour vous!

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

Pour en savoir plus

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

www.pharesst.irsst.qc.ca

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

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

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2026
ISBN 978-2-89797-340-7 (PDF)

<https://doi.org/10.70010/UGRJ1162>

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



Aucune
IAG utilisée

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

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



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

Note au lectorat

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



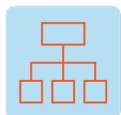
Identification des dangers, estimation et évaluation des risques



Élimination des dangers et maîtrise des risques



Métrologie appliquée à la SST



Organisation du travail



Santé mentale et psychologique



Population, société et SST



NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

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

Pour en savoir plus

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

www.pharesst.irsst.qc.ca

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

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

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2026
ISBN 978-2-89797-340-7 (PDF)

<https://doi.org/10.70010/UGRJ1162>

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



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

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



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

Note au lectorat

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



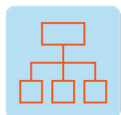
Identification des dangers, estimation et évaluation des risques



Élimination des dangers et maîtrise des risques



Métrologie appliquée à la SST



Organisation du travail



Santé mentale et psychologique



Population, société et SST



NOS RECHERCHES travaillent pour vous!

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

Pour en savoir plus

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

www.pharesst.irsst.qc.ca

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

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

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2026
ISBN 978-2-89797-340-7 (PDF)

<https://doi.org/10.70010/UGRJ1162>

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



Aucune
IAG utilisée

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

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



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

Note au lectorat

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

Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information. Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle. Cette publication est disponible en version PDF sur le dépôt institutionnel de l'IRSST (PhareSST).

Cadre de référence pour la recherche en SST



Prévention des atteintes à l'intégrité physique et psychique



Réadaptation, retour et maintien au travail



Surveillance et prospection des données en SST



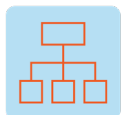
Identification des dangers, estimation et évaluation des risques



Élimination des dangers et maîtrise des risques



Métrologie appliquée à la SST



Organisation du travail



Santé mentale et psychologique



Population, société et SST

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier Pierre-Luc Cloutier, Sarah Attab, Philippe Juteau, Catherine Choinière et Charles Larocque de l'IRSST pour leur précieuse aide au laboratoire de l'IRSST. Ils remercient également Alain Blouin et Marc Langlais de l'IRSST pour la mise en place et l'installation du système de génération. Les auteurs remercient aussi Mohamed Nejib Saidi de l'IRSST pour sa contribution en dynamique des fluides numérique. Ils remercient par ailleurs Philippe Sarazin de l'IRSST pour son aide à la conception des expériences. Les auteurs remercient enfin Nicole MacDonald de (CM)² pour son aide précieuse et son expertise en analyses par microscopie électronique à balayage (MEB), ainsi que l'IRSST pour son soutien financier et technique.

SOMMAIRE

Les isocyanates sont des composés irritants et induisent des sensibilisations respiratoires et de l'asthme professionnel. La pulvérisation de revêtements polyuréthanes contenant du diisocyanate d'hexaméthylène (HDI), sous forme monomère et d'oligomères constitue une source majeure d'exposition professionnelle, notamment dans les ateliers de carrosserie automobile. L'évaluation de l'exposition par inhalation à ces composés demeure toutefois complexe en raison de leur forte réactivité chimique et de leur présence simultanée sous forme de vapeur et de particules.

La première phase de cette recherche visait à développer et valider un système de génération en laboratoire capable de reproduire de manière réaliste les conditions de pulvérisation de vernis transparents à base d'isocyanates.

La deuxième phase consistait à utiliser ce système pour comparer trois méthodes de mesure d'isocyanates de type « filtre imprégné » (ISO 17734-1 avec dénudeur et méthodes avec cassette fermée 37 mm et cassette Swinnex 13 mm) à une méthode de référence utilisant un barboteur, basée sur la norme ISO 16702. Cette étude permettait d'examiner la performance des méthodes ainsi que la répartition spatiale des isocyanates dans les dispositifs d'échantillonnage. Des analyses par microscopie électronique à balayage (MEB) ont également été réalisées afin d'observer l'accumulation de vernis sur les filtres. Les résultats ont montré que, certaines sous-sections d'échantillonneurs capturaient préférentiellement le HDI (vapeur) ou l'isocyanurate, principal oligomère (aérosol liquide). Aucune différence significative n'a été observée entre les méthodes testées et la méthode de référence, bien que la variabilité des résultats fût élevée.

La troisième phase de l'étude a porté sur l'application de cette comparaison dans un atelier de carrosserie automobile. Dans ce contexte, les aérosols générées étaient plus grossiers, et la répartition spatiale du HDI et de l'isocyanurate dans les dispositifs présentait des tendances similaires à celles observées en laboratoire. Les observations par MEB ont mis en évidence une accumulation importante de gouttelettes de vernis sur les filtres, susceptible de limiter l'efficacité des réactions chimiques nécessaires à l'analyse. Les trois méthodes testées ont mené à une sous-estimation des concentrations pour les isocyanurates, suggérant un lien entre la vitesse de réaction de l'activateur du vernis et le biais observé par rapport à la méthode de référence.

Cette étude souligne la complémentarité des essais en laboratoire et sur le terrain pour évaluer les limites des méthodes de mesure des isocyanates. Elle met en évidence l'importance du choix du dispositif d'échantillonnage, de la prise en compte de la réactivité chimique des composés afin d'obtenir des résultats fiables, et met en garde contre une dépendance exclusive aux méthodes sur filtre dans des contextes impliquant des particules réactives. Ce rapport comprend le résumé des articles publiés abordant les résultats de l'étude.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
Problématique.....	1
État des connaissances	1
Approche appliquée	3
Objectifs.....	5
1. RÉSUMÉS DES ARTICLES	6
1.1 Validation d'un système de génération de pulvérisation en laboratoire et son utilisation dans une étude comparative de méthodes d'évaluation de diisocyanate d'hexaméthylène (HDI).....	6
1.2 Comparaison approfondie de méthodes de prélèvement pour l'évaluation du diisocyanate d'hexaméthylène dans l'air dans un atelier de carrosserie automobile	7
2. DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION.....	9
2.1 Portée du projet de recherche.....	9
2.1.1 Caractérisation physique des isocyanates et leurs distributions spatiales dans le dispositif	9
2.1.2 Accumulation des émissions d'isocyanates sur le support filtrant	10
2.1.3 La réactivité et son effet sur la mesure	11
2.1.4 Études comparatives : laboratoire vs milieu de travail	12
2.2 Limites de l'étude	12
2.3 Retombées de l'étude	13
2.4 Recommandations en termes de méthodes de mesure	13
BIBLIOGRAPHIE	14

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Dispositifs d'échantillonnage étudiés dans l'étude	4
---	---

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Système de génération d'atmosphère contrôlée	4
--	---

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Acronyme	Définition
CIP10	Capteur Individuel de Poussières
DBA	Dibutylamine
FFV	Filtre en fibre de verre
HDI	Diisocyanate d'hexaméthylène
IPDI	Diisocyanate d'isophorone
MDI	Diisocyanate de diphénylméthane
MEB	Microscopie électronique à balayage
MMAD	Diamètre aérodynamique médian en masse
MP	1-(2-méthoxyphényl)pipérazine
NCO	Groupe fonctionnel isocyanate (azote-carbone-oxygène)
ppb	Partie par milliard
RSD	Coefficient de variation (écart-type relatif)
VLEP	Valeur limite d'exposition professionnelle

INTRODUCTION

Problématique

Les isocyanates sont des composés chimiques contenant le groupe fonctionnel NCO. Ils sont largement utilisés dans la fabrication de matériaux à base de polyuréthane (PU). L'une de leurs applications les plus courantes concerne les revêtements à base de PU dans les secteurs de la réparation automobile, de l'aéronautique et de la construction. Le diisocyanate d'hexaméthylène (HDI) est celui le plus fréquemment utilisé dans ce type d'application. Le diisocyanate d'isophorone (IPDI) est aussi utilisé, mais dans une moindre mesure. L'évolution des formulations à base d'isocyanates a conduit à une prédominance des homopolymères de HDI, constitués de formes condensées de HDI de masse moléculaire plus élevée, réduisant ainsi l'exposition au HDI semi-volatile, relativement plus volatil. Les homopolymères les plus fréquemment rencontrés, également appelés oligomères, dans les revêtements à base de HDI sont les biurets et les isocyanurates (Carlton et England, 2000; Huynh *et al.*, 1992; Janko *et al.*, 1992; Pronk *et al.*, 2006; Silk et Hardy, 1983).

Malgré leurs propriétés avantageuses, le HDI et ses oligomères, comme tous les isocyanates, présentent des risques importants pour la santé, notamment en tant qu'agents sensibilisants et irritants respiratoires. En effet, une exposition professionnelle prolongée au HDI et à ses oligomères peut entraîner des maladies respiratoires chroniques, telles que l'asthme professionnel et la pneumonite d'hypersensibilité (Lockey *et al.*, 2015; Roberge *et al.*, 2013; Sparer *et al.*, 2004).

Les agences réglementaires ont établi des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) afin de protéger les travailleurs. Une VLEP de 5 parties par milliard (ppb) pour le monomère de HDI est couramment retrouvée dans les réglementations en santé au travail, certaines incluant également la contribution de toutes les espèces d'isocyanates, y compris les oligomères (Bello, D. *et al.*, 2004; Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung [IFA], 2025).

En raison des différentes formes chimiques du HDI (monomère et oligomères), de leur réactivité et de leur volatilité variable (phases vapeur et particulaire), la mesure du HDI et de ses oligomères en milieu de travail, notamment lors d'applications par pulvérisation, demeure complexe (Levine *et al.*, 1995; Streicher *et al.*, 2002).

État des connaissances

L'échantillonnage et l'analyse efficaces des isocyanates reposent généralement sur une dérivation chimique *in situ* à l'aide d'une amine secondaire, permettant de stabiliser la fonction isocyanate réactive et d'améliorer la sensibilité et la sélectivité de l'analyse, généralement réalisée par chromatographie liquide couplée à un détecteur ultraviolet ou par spectrométrie de masse (Henneken *et al.*, 2007). Les méthodes utilisant des

barboteurs sont reconnues pour leur efficacité, bien que leur utilisation présente plusieurs limitations, telles que la manipulation des solvants, leur évaporation et les risques de déversement (Hext *et al.*, 2003; Marand *et al.*, 2005; Spanne *et al.*, 1999; Streicher *et al.*, 2002). Les méthodes utilisant des filtres imprégnés, souvent combinées à une extraction terrain, permettent une procédure d'échantillonnage simplifiée, bien que certaines limitations aient été observées selon les applications d'isocyanates (Karoly, 1998; Lesage *et al.*, 2007) lorsque celles-ci génèrent des aérosols hautement réactifs.

Des méthodes plus récentes incluent le dispositif Asset EZ4-NCO, qui utilise un dénudeur en amont et d'un filtre imprégné pour capter les isocyanates présents dans l'air (Marand *et al.*, 2005; Organisation internationale de normalisation [ISO], 2008a). Cette méthode évite l'extraction terrain et est conçue pour dériver efficacement les aérosols à durcissement rapide contenant des isocyanates. Dans le même objectif, des méthodes utilisant le Capteur Individuel de Poussières (CIP10) ont été développées et utilisées dans quelques études, reposant sur la centrifugation pour une dérivation immédiate (Aubin *et al.*, 2020a, 2020b; Bello, A. *et al.*, 2020; Guillemot *et al.*, 2022; Puscasu *et al.*, 2015a, 2015b).

Ces méthodes ont été largement étudiées, notamment à travers des études d'intercomparaison, afin d'évaluer leur capacité à mesurer adéquatement l'exposition aux isocyanates dans divers contextes d'application ou de procédé (Aubin *et al.*, 2020a, 2020b; England *et al.*, 2000; Hext *et al.*, 2003; Huynh *et al.*, 1992; Lesage *et al.*, 2007; Marand *et al.*, 2005; Nordqvist *et al.*, 2005; Puscasu *et al.*, 2015b; Rosenberg et Tuomi, 1984). Certaines méthodes ont montré de bonnes corrélations en laboratoire et sur le terrain, les rendant aptes à être substituées entre elles, en tenant compte de leurs limitations intrinsèques. Toutefois, de nombreuses études ont également rapporté des résultats incohérents. Ces divergences pourraient être liées à la forme physique des isocyanates émis (particules ou vapeur), à la distribution granulométrique, au niveau de concentration, aux pertes internes potentielles dans les échantillonneurs, ainsi qu'à l'accumulation de particules sur les filtres (ISO, 2008b; Streicher *et al.*, 1998, 2002). Ces paramètres dépendent souvent du type d'application en milieu de travail, ce qui complexifie davantage le choix de la méthode appropriée. En somme, il n'existe pas de méthode idéale pour tous les types d'application d'isocyanates. Il s'avère donc pertinent d'approfondir la compréhension des différentes approches de prélèvement pour sélectionner plus adéquatement la méthode selon l'application ou encore pour mettre au point une ou d'autres méthodes optimales.

Aubin et collaborateurs ont mis en place un système de génération d'atmosphères contrôlées et un protocole d'intercomparaison de différentes méthodes d'évaluation des isocyanates (Aubin *et al.*, 2021, 2023). Différentes approches d'échantillonnage — barboteur, filtre et dénudeur + filtre — ont été soumises à des particules fines de diisocyanate de diphénylméthane (MDI) pur. Bien qu'aucun biais significatif n'ait été observé entre les méthodes, de nouvelles connaissances ont été acquises, notamment

sur la distribution du MDI dans les différentes sections analysées des échantillonneurs. Ces résultats peuvent servir de base comparative pour des émissions d'isocyanates plus complexes, telles que celles générées par des procédés de pulvérisation impliquant des particules à durcissement rapide.

Approche appliquée

La présente étude approfondit les travaux antérieurs (Aubin *et al.*, 2021, 2023) en les appliquant sur des émissions plus complexes permettant une meilleure compréhension des différences potentielles entre les diverses approches d'échantillonnage. Dans un premier temps, un système de génération représentatif des procédés de pulvérisation rencontrés en milieu de travail a été utilisé pour tester différentes méthodes. Le système mis au point est présenté à la figure 1. Dans un deuxième temps, la même approche a été appliquée en milieu de travail de façon à valider les résultats ou tendances observées en laboratoire.

L'application du même protocole de comparaison à des émissions plus complexes décrit dans Aubin *et al.* (2023) a permis une meilleure compréhension des différences potentielles entre les diverses approches d'échantillonnage. L'application par pulvérisation d'un vernis transparent à base de HDI a été choisie pour cette étude en raison de son usage répandu dans divers milieux de travail, de sa nature semi-volatile et des caractéristiques de réactivité de ses particules liquides. L'étude a porté également sur la distribution spatiale des isocyanates collectés dans l'échantillonneur et sur l'analyse par microscopie électronique à balayage afin d'observer l'accumulation de gouttelettes sur les filtres.

Les méthodes d'évaluation étudiées ont été sélectionnées en fonction de leurs principes d'échantillonnage et de leur usage courant. Un barboteur muni d'un filtre en aval, imprégné de 1-(2-méthoxyphényl) pipérazine (MP), a été utilisé comme méthode de référence, les méthodes barboteur étant encore considérées comme les seules permettant de mesurer efficacement l'exposition aux isocyanates dans les procédés émettant de grosses particules à durcissement rapide (Henneken *et al.*, 2007 ; White, 2006; White *et al.*, 2006). Les méthodes comparées comprenaient une méthode filtre-dénudeur utilisant la dibutylamine (DBA) comme réactif, commercialisée sous le nom Asset EZ4-NCO, ainsi que deux autres méthodes filtres. La première était une adaptation de la norme ISO 16702 (ISO, 2007), utilisant une cassette fermée de 37 mm dont les parois internes sont recouvertes de filtres imprégnés de MP pour prévenir les pertes potentielles (Mao *et al.*, 2000). La seconde consistait en une cassette de forme conique, appelée Swinnex, en polypropylène de 13 mm contenant un filtre imprégné de MP, identique à celle utilisée pour contenir le filtre terminal dans l'Asset. Ce dispositif Swinnex est censé ne pas présenter de collecte significative sur ses parois internes (Aubin *et al.*, 2023 ; Hext *et al.*, 2003). Les dispositifs d'échantillonnage des méthodes soumises à l'étude sont présentés au tableau 1.

Figure 1. Système de génération d'atmosphère contrôlée

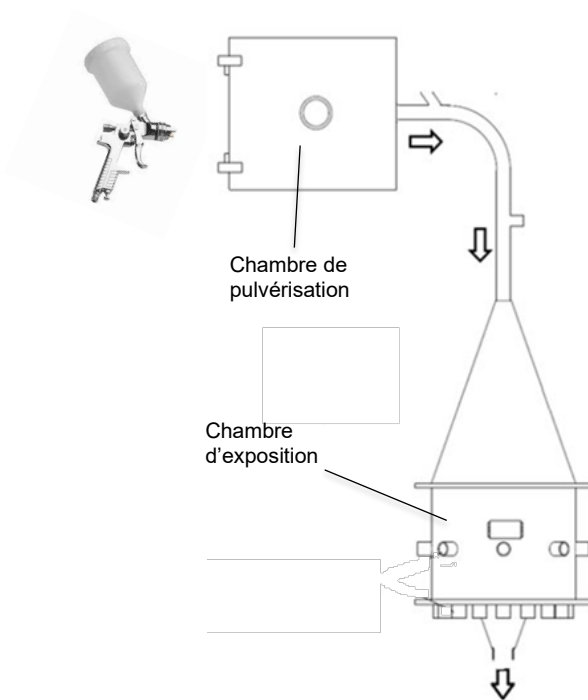

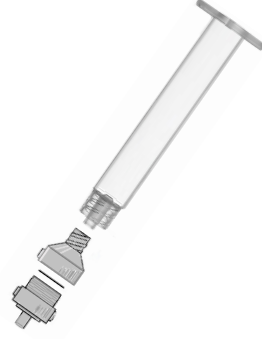
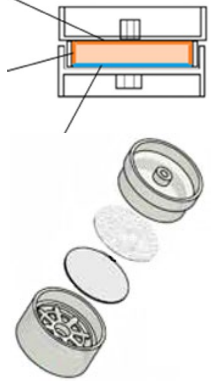
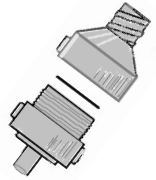


Tableau 1. Dispositifs d'échantillonnage étudiés dans l'étude

Méthode	MDHS 25/4 ISO 16702	ISO 177334-1	MP-37	MP-Swin
Dispositif*	 <p>Barboteur et cassette Swinnex 13 mm avec filtre imprégné</p>	 <p>Asset EZ4-NCO Dénudeur et cassette Swinnex 13 mm avec filtre imprégné</p>	 <p>Cassette fermée 37 mm avec filtre et parois imprégnés</p>	 <p>Cassette Swinnex 13 mm avec filtre imprégné</p>

*Les images ne sont pas à l'échelle.

Objectifs

L'étude visait à :

- 1) Développer et optimiser un système capable de générer par pulvérisation des aérosols semi-volatils à base d'isocyanates ;
- 2) Mener une étude d'intercomparaison approfondie des méthodes d'évaluation des isocyanates reposant sur différents principes d'échantillonnage.
- 3) Mener la même étude d'intercomparaison approfondie des méthodes d'évaluation en milieu de travail

Les objectifs ont été poursuivis, ils sont associés aux deux publications scientifiques dont le résumé est présenté dans ce rapport. Le premier article aborde le développement et la validation du système de génération. L'ensemble de la comparaison approfondie des méthodes effectuée en laboratoire avec le système est également présenté dans cet article : Ahientio *et al.*, 2025. Le deuxième article porte sur la comparaison approfondie des méthodes effectuée en milieu de travail. Les conclusions liées à l'ensemble de la présente étude, c'est-à-dire le continuum laboratoire – situation réelle, sont présentées dans cet article : Ahientio *et al.*, 2026.

1. RÉSUMÉS DES ARTICLES

1.1 Validation d'un système de génération de pulvérisation en laboratoire et son utilisation dans une étude comparative de méthodes d'évaluation de diisocyanate d'hexaméthylène (HDI)

Référence

Ahientio, H., Wingert, L., Gagné, S., Breau, L., Lesage, J. et Aubin, S. (2025). Validation of a laboratory spray generation system and its use in a comparative study of hexamethylene diisocyanate (HDI) evaluation methods. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 27(1), 119-132. <https://doi.org/10.1039/D4EM00513A>

Les isocyanates sont des irritants et sensibilisants bien connus, dont la mesure de l'exposition professionnelle par voie aérienne demeure complexe en raison de leur forte réactivité chimique et de leur nature semi-volatile. Cette étude s'inscrit dans la continuité d'une publication antérieure de notre équipe, qui portait sur la comparaison des méthodes d'évaluation des isocyanates. Les travaux actuels visaient à développer, valider et utiliser un système de génération en laboratoire conçu pour reproduire les conditions réelles de pulvérisation de vernis transparents dans les ateliers de carrosserie, en utilisant des produits à base de diisocyanate d'hexaméthylène (HDI).

Le système comprend un pistolet de pulvérisation relié à deux chambres en série, permettant la collecte et l'analyse des échantillons. Ce dispositif a permis de générer des concentrations de HDI et d'isocyanurate allant respectivement de 0,008 à 0,040 mg/m³ et de 0,351 à 3,45 mg/m³, avec une homogénéité spatiale (écart-type relatif, RSD) de 5,8 % et 16,5 %. La distribution granulométrique des particules (MMAD) de 4 µm a été mesurée à l'aide d'un impacteur en cascade et d'un impacteur électrique à basse pression. Les échantillons générés ont été utilisés pour établir une corrélation entre la quantité d'isocyanates collectée et l'analyse qualitative par microscopie électronique à balayage des dépôts de particules liquides en surface des filtres.

Trois méthodes ont été comparées à la méthode de référence — un barboteur avec filtre en fibre de verre (FFV) en aval et le réactif 1-(2-méthoxyphényl)pipérazine (MP), conformément à la norme ISO 16702/MDHS 25 — dans le cadre de six expériences de génération : (1) cassette Swinnex 13 mm FV ; MP (MP-Swin) ; (2) cassette à face fermée 37 mm FFV (filtre terminal et parois internes) MP (MP-37) ; et (3) dénudeur et FFV avec dibutylamine (DBA) (ISO 177334-1 Asset). L'analyse a révélé des tendances claires quant aux sections des échantillonneurs ayant capté le HDI (principalement en phase vapeur) ou l'isocyanurate (exclusivement en phase particulaire).

L'étude n'a mis en évidence aucun biais significatif entre les méthodes testées (MP-Swin, MP-37 et Asset) et la méthode de référence (barboteur), tant pour le monomère HDI que pour l'isocyanurate. Les trois méthodes testées ont présenté des limites de concordance dépassant la plage acceptable de $\pm 30\%$ (intervalle de confiance à 95 %), principalement en raison de la variabilité des données, bien que les méthodes MP-Swin et MP-37 aient montré une variabilité inférieure à celle de la méthode Asset. Les résultats seront évalués ultérieurement dans un environnement de travail où des vernis transparents similaires sont utilisés.

1.2 Comparaison approfondie de méthodes de prélèvement pour l'évaluation du diisocyanate d'hexaméthylène dans l'air dans un atelier de carrosserie automobile

Référence

Ahientio, H., Wingert, L., Gagné, S., Breau, L., Lesage, J. et Aubin, S. (2026). Comprehensive comparison of sampling methods for evaluating hexamethylene diisocyanate (HDI) in the air of an automotive collision repair facility. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 28(2), 405-418. <https://doi.org/10.1039/D5EM00892A>. Les isocyanates sont reconnus comme des agents irritants et sensibilisants puissants. La quantification précise de leurs concentrations aéroportées en milieu professionnel demeure un défi analytique majeur, en raison de leur forte réactivité chimique et de leur caractère semi-volatil, c'est-à-dire leur propension à être présent dans l'air tant sous forme vapeur que particulaire. Cette étude vient compléter des travaux antérieurs réalisés en laboratoire, en évaluant les méthodes d'échantillonnage des isocyanates dans un atelier de réparation automobile en conditions réelles. Elle a examiné la distribution spatiale dans les échantillonneurs et évalue si les simulations en laboratoire produisent des résultats comparables à ceux observés lors d'applications de pulvérisation de HDI, en tenant compte du contexte opérationnel.

L'évaluation a consisté à comparer trois méthodes utilisant des filtres à la méthode de référence — un barboteur avec filtre en fibre de verre (FFV) en aval et le réactif 1-(2-méthoxyphényl)pipérazine (MP), conformément à la norme ISO 16702/MDHS 25 — dans le cadre de six expériences de génération : (1) cassette Swinnex 13 mm FV ; MP (MP-Swin) ; (2) cassette à face fermée 37 mm FFV (filtre terminal et parois internes) MP (MP-37) ; et (3) dénudeur et FFV avec dibutylamine (DBA) (ISO 177334-1 Asset). À l'aide d'un impacteur en cascade, une distribution granulométrique des particules (MMAD) de 15 μm a été mesurée.

L'analyse a mis en évidence des schémas distincts de distribution du HDI et de l'isocyanurate dans les différentes sections des échantillonneurs. Ces schémas étaient

similaires à ceux observés en laboratoire, mais cohérents avec la taille de particules plus importante mesurée dans l'environnement testé. Les images obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB) ont révélé une accumulation substantielle de gouttelettes de revêtement sur les filtres, pouvant nuire à l'efficacité de la dérivation. Parmi toutes les méthodes testées, seule la méthode MP-Swin a montré un biais négatif significatif pour le HDI (-47 %). Toutes les méthodes utilisant des filtres ont sous-estimé les niveaux d'isocyanurate par rapport à la méthode de référence, avec un biais allant de -40 % à -59 %.

L'utilisation d'un activateur à faible vitesse a permis de réduire ces biais, suggérant que la forte réactivité limite la dérivation des isocyanates, entraînant une sous-estimation des concentrations mesurées. Les résultats obtenus sur le terrain se sont révélés plus variables et ont partiellement contredit les observations en laboratoire, qui n'avaient montré aucun biais significatif entre les méthodes testées et la méthode de référence. Ces résultats soulignent l'importance de l'extraction en conditions réelles dans l'échantillonnage des polyuréthanes en phase aérienne, et mettent en garde contre une dépendance exclusive aux méthodes par filtre en présence de composés à réactivité élevée. L'étude a mis en évidence la valeur complémentaire des comparaisons entre les environnements de terrain et de laboratoire, et a souligné l'influence du design des dispositifs d'échantillonnage ainsi que de la réactivité chimique sur la précision de la quantification des isocyanates.

2. DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION

2.1 Portée du projet de recherche

Le projet s'est attardé au comportement des isocyanates collectés à l'intérieur du dispositif de prélèvement, un aspect de la mesure dont la compréhension est essentielle pour garantir une évaluation précise de l'exposition professionnelle. Toutefois, son approfondissement demeurerait insuffisant, limitant ainsi la production de connaissances nécessaires à une compréhension adéquate des facteurs influençant la mesure. L'hypothèse avancée par les chercheurs questionnait l'efficacité de l'accès de l'isocyanate au réactif de dérivation dès sa collection au sein du dispositif de prélèvement. L'approche méthodologique adoptée dans le cadre de ce projet a permis d'établir des liens entre des observations spécifiques — telles que la répartition spatiale au sein des dispositifs et les données issues de la microscopie électronique à balayage — et des résultats comparatifs obtenus par différentes méthodes de mesure. Avec la notion d'accès au réactif comme fil conducteur, on décrit ci-dessous comment ce croisement d'informations a contribué à une compréhension approfondie des biais associés aux divers types de méthodes.

2.1.1 Caractérisation physique des isocyanates et leurs distributions spatiales dans le dispositif

La taille des particules émises par pulvérisation et la propension des isocyanates à se retrouver à l'état gazeux ou particulaire se sont révélées avoir une incidence directe sur l'endroit où ils sont collectés à l'intérieur du dispositif de prélèvement. L'évaluation de la distribution granulométrique des émissions générées a démontré que les particules générées au laboratoire étaient de plus faible taille (diamètre aérodynamique médian en masse (MMAD) de 4 μm) que celles générées en milieu de travail (MMAD de 15 μm).

La propension du HDI à se retrouver à l'état gazeux a mené il y a plusieurs décennies les fabricants de revêtements polyuréthane à diminuer sa proportion dans les mélanges utilisés à moins de 1 %. Il était donc attendu de retrouver le HDI majoritairement à l'état gazeux dans les émissions testées. Les résultats ont montré que le HDI des émissions mesurées est majoritairement présent en phase vapeur (> 60 %) et que cela peut toutefois varier selon plusieurs paramètres, notamment la taille des particules. Par comparaison avec celles du laboratoire, les particules de taille plus grande du terrain favorisaient une proportion plus grande du HDI sous forme particulaire. Cette tendance a également été corroborée par la répartition du HDI dans les deux sections de la méthode barboteur (solution collectrice vs filtre en aval). Ces observations font donc état d'une dynamique d'évaporation graduelle avec comme corollaire que la proportion de HDI sous forme vapeur s'accroît avec le temps dès que le produit est pulvérisé.

L'isocyanurate, en revanche, est exclusivement retrouvé en phase particulaire, principalement dans des aérosols > 2 μm . Cette conclusion se base autant sur la

répartition de l'isocyanurate dans le dispositif Asset que dans les deux sections de la méthode barboteur.

Les résultats de la répartition spatiale du HDI et de l'isocyanurate au sein du dispositif MP-37, encore utilisée dans plusieurs méthodes de mesure d'isocyanates, ont démontré un potentiel de dépôt très bas pour le HDI (4 % ou moins), mais pouvant être significatif pour l'isocyanurate (11 % et moins). Des particules de plus grandes tailles (milieu de travail) ont généré une plus grande proportion sur les parois, soutenant l'hypothèse d'une fragmentation suivie de rebonds de gouttelettes après leur impact initial sur le filtre. L'occurrence de ce phénomène est également soutenue par les résultats d'isocyanurate obtenus pour le dispositif de la méthode MP-Swin. Ces résultats mettent finalement en évidence un potentiel de perte des isocyanates au sein de certains dispositifs de type « cassette », dans le cas où ceux-ci n'ont pas de parois imprégnées de réactif ou encore lorsque la méthode d'extraction n'implique pas un rinçage systématique dès la fin du prélèvement.

L'étude de la répartition d'isocyanates selon leurs différentes caractéristiques physiques (volatilité et taille de particules) a permis une compréhension approfondie de leur site de dépôt ou de collection dans les dispositifs. La nature comparative de l'étude soutenant les hypothèses avancées a généré un corpus de connaissances qui permettra de faire des inférences sur la répartition dans plusieurs types de dispositifs de prélèvement ou de procédés industriels impliquant des isocyanates.

2.1.2 Accumulation des émissions d'isocyanates sur le support filtrant

La transposition de l'approche de dérivation par solution collectrice (utilisation du barboteur) vers celle utilisant un filtre imprégné s'est avérée très utile pour simplifier l'aspect du prélèvement personnel. Il est toutefois bien documenté dans la littérature scientifique que l'approche par filtre imprégné sous-estime la mesure dans le cas où les émissions consistent en des particules réactives de grandes tailles. L'hypothèse généralement acceptée pour expliquer ce biais avance un accès inadéquat de l'isocyanate au réactif de dérivation présent sur le support de collecte. L'accumulation de particules impactées sur le filtre créerait donc une zone où une quantité non-négligeable d'isocyanates n'auraient aucun contact avec le réactif imprégné au filtre. Par conséquent, la réaction chimique de polymérisation en polyuréthane ayant cours au sein des particules se continuerait, au détriment de la mesure du contaminant capté par l'échantillonneur. Cette hypothèse n'a été soutenue que par des preuves indirectes ou des observations peu probantes au cours des dernières décennies. Notre étude a réussi à lier le visuel de l'accumulation de gouttelettes de vernis, par microscopie électronique à balayage, avec la mesure empirique de cette accumulation d'isocyanates. L'étude laboratoire (Ahentio *et al.*, 2025) et l'étude en milieu de travail (Ahentio *et al.*, 2026) ont présenté explicitement ce lien pour des accumulations modérées et importantes, respectivement. Pour une première fois, à notre connaissance, nous avons été capables de constater, à l'échelle

microscopique, que même pour une accumulation modérée, les particules impactées sur le support filtrant présentent une portion significative qui n'est pas en contact optimal avec le réactif.

2.1.3 La réactivité et son effet sur la mesure

Le défi que pose la mesure des isocyanates dans l'air en milieu de travail est intrinsèquement lié à leur grande réactivité chimique. Dans certains cas, l'accès au réactif est optimal dès le prélèvement : particules réactives collectées dans une solution collectrice ou encore un isocyanate à l'état gazeux capté sur un filtre imprégné. Dans ces cas de figure, la réactivité n'est pas un enjeu pour la qualité de la mesure. La situation est différente si les isocyanates collectés, en cours de réaction de polymérisation s'accumulent dans l'échantillonneur sans avoir accès au réactif directement, et ce malgré le fait que celui-ci soit présent en grand excès sur le support de collecte. Dans un tel cas, la mesure sera optimale si les deux conditions suivantes sont respectées : l'échantillon doit être extrait dès la fin du prélèvement (« extraction terrain ») et le délai entre la collection des isocyanates et l'extraction doit être suffisamment court pour que la perte liée à la polymérisation vers le polyuréthane soit négligeable.

Le projet a mis en évidence l'effet de la vitesse de réaction sur la capacité des méthodes filtres à produire un résultat. L'étude laboratoire (Ahentio *et al.*, 2025) a conclu que les méthodes filtres produisaient des résultats sans biais significatif par rapport à la méthode barboteur (méthode de référence) malgré un contact non optimal entre les gouttelettes collectées et le support de collecte imprégné. Les auteurs ont alors conclu que la vitesse de réaction était suffisamment lente pour que les méthodes filtres produisent un résultat similaire à la méthode barboteur.

Des quantités encore plus grandes de gouttelettes ont été observées dans les échantillons de l'étude en milieu de travail (Ahentio *et al.*, 2026) avec comme effet un accès des isocyanates au réactif encore plus faible. Or, l'analyse du biais des méthodes filtres en fonction de la vitesse des deux activateurs d'isocyanate utilisés en milieu de travail (« lent » vs « rapide ») a révélé que le biais n'était pas significatif lorsque l'activateur lent était appliqué alors que le biais était significatif lors de l'application de l'activateur « rapide ». Ces observations viennent donc confirmer que la vitesse de réaction, aussi appelée vitesse de durcissement, est un déterminant important à prendre en compte quand vient le temps de choisir la méthode de prélèvement pour mesurer l'exposition aux isocyanates.

2.1.4 Études comparatives : laboratoire vs milieu de travail

L'accomplissement d'un protocole de comparaison de méthodes en laboratoire est souvent favorisé puisque cette approche permet de contrôler plusieurs paramètres qui, en retour, abaissent la variabilité potentielle des données, facilitant la détection de l'effet de certains paramètres sur la variable réponse. Le système mis au point et validé au cours de ce projet utilise un dispositif de génération qui reproduit fidèlement les émissions de vernis polyuréthanes retrouvés dans l'industrie de la réparation de carrosserie. Son utilisation génère donc des données plus représentatives de situations réelles de travail que les systèmes générant des isocyanates purs – donc des émissions dites « non-réactives », souvent à l'état gazeux ou sous forme de particules fines ou ultrafines. Il importait néanmoins de valider les conclusions de l'étude laboratoire avec une étude en milieu de travail afin de déterminer si la première consistait en une approche suffisamment fiable pour conclure sur la performance de méthodes par rapport à une référence donnée.

Les précédentes sections (2.1.1 à 2.1.3) ont démontré des différences entre les paramètres rencontrés lors des essais en laboratoire et ceux en milieu de travail. Les résultats obtenus sont toutefois clairs indiquant que l'élément ayant le plus d'impact sur le biais entre les méthodes était la réactivité du produit utilisé. Dans ce contexte-ci, cela signifie que l'étude laboratoire, et ses conclusions ont un niveau de représentativité de situation réelle plus faible que l'étude en milieu de travail. Il appert donc en rétrospective qu'un design expérimental de l'étude laboratoire incluant au moins deux produits de vitesse différentes aurait contribué à augmenter son niveau de représentativité. Cette conclusion confirme également le défi que constitue la mesure de l'exposition aux isocyanates en démontrant que pour un même procédé industriel, la composition du produit peut biaiser la mesure de façon significative selon la méthode de prélèvement utilisée.

2.2 Limites de l'étude

L'ensemble des mesures effectuées ont été prises en poste fixe et non sur un travailleur, dans sa zone respiratoire. Bien que la nature comparative du protocole expérimental appliqué produise des données pertinentes sur la performance des méthodes, il est possible que certains paramètres inhérents au port d'un échantillonneur par un travailleur puissent avoir des effets variés sur la performance de certaines méthodes. Le cas échéant la présente étude ne tient pas compte de ces effets potentiels.

L'efficacité d'aspiration des différents échantillonneurs peut avoir un effet significatif sur leur performance. Ce paramètre est plus ou moins bien défini pour les échantillonneurs utilisés étant donné qu'ils n'ont pas été conçus pour respecter le prélèvement d'une fraction granulométrique normalisée, comme la fraction inhalable. (ISO, 1995) On rappelle toutefois que la VLEP québécoise du HDI est exprimée en fraction particules totales, qui

ne constitue pas une fraction granulométrique normalisée. Cette limite ne devrait pas être significative étant donné que les échantillonneurs ont été utilisés, en termes de positionnement et orientation, comme s'ils étaient portés par un travailleur et du fait de la nature comparative de l'étude.

L'étude a mis l'emphase sur les principaux principes de prélèvement utilisés pour la mesure d'isocyanate dans l'air. L'approche de prélèvement du Capteur individuel de particules (CIP10) et dont l'utilisation a déjà été rapportée pour les isocyanates n'a pas fait partie de l'étude comparative.

2.3 Retombées de l'étude

La mise au point d'un système de génération simulant un procédé industriel de pulvérisation permet désormais son utilisation pour l'étude de procédés et de méthodes diversifiés.

L'étude approfondie de plusieurs méthodes de mesure d'isocyanates a permis de générer de nouvelles connaissances sur le comportement des isocyanates et leur stabilité à l'intérieur des dispositifs de prélèvement pour un type de procédé donné.

Ces connaissances permettront d'anticiper le comportement des émissions, au sein des dispositifs, provenant d'autres procédés impliquant des isocyanates.

Les conclusions de l'étude constituent une base de connaissance qui servira à optimiser les méthodes d'évaluation d'isocyanates, ainsi que leur portée, soutenant l'application réglementaire et les mesures de prévention par la communauté de pratique d'hygiène du travail du Québec.

2.4 Recommandations en termes de méthodes de mesure

Bien que l'étude soutienne l'utilisation du dispositif barboteur pour la mesure de l'exposition aux isocyanates dans ce contexte de pulvérisation de revêtements, des considérations pratiques suggèrent l'utilisation de méthodes avec filtre imprégné. Parmi les dispositifs étudiés, la cassette Swinnex serait le dispositif à favoriser compte tenu de ses résultats et du côté pratique lié à son utilisation. Une durée d'échantillonnage de 15 minutes ou moins est à appliquer et l'extraction sur le terrain dès la fin de l'échantillonnage devrait toujours être effectuée pour diminuer le plus possible la sous-estimation de la mesure, spécifiquement lorsque des mélanges à durcissement rapide sont appliqués.

BIBLIOGRAPHIE

- Ahientio, H., Wingert, L., Gagné, S., Breau, L., Lesage, J. et Aubin, S. (2025). Validation of a laboratory spray generation system and its use in a comparative study of hexamethylene diisocyanate (HDI) evaluation methods. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 27(1), 119-132. <https://doi.org/10.1039/D4EM00513A>
- Ahientio, H., Wingert, L., Gagné, S., Breau, L., Lesage, J. et Aubin, S. (2026). Comprehensive comparison of sampling methods for evaluating hexamethylene diisocyanate (HDI) in the air of an automotive collision repair facility. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 28(2), 405-418. <https://doi.org/10.1039/D5EM00892A>
- Aubin, S., Hamdi, E. M., Joly, A., Sarazin, P., Lesage, J., Breau, L., . . . Gagné, S. (2020a). On-site comparison of the OSHA 47, Asset EZ4-NCO, Iso-Chek, DAN, and CIP10 methods for measuring methylene diphenyl diisocyanate (MDI) at an oriented-strand board (OSB) factory. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 17(11-12), 560-573. <https://doi.org/10.1080/15459624.2020.1834111>
- Aubin, S., Hamdi, E. M., Joly, A., Sarazin, P., Lesage, J., Breau, L., . . . Gagné, S. (2020b). On site comparison of the OSHA 42, Asset EZ4-NCO, Iso-Chek, DAN and CIP10 methods for measuring toluene diisocyanate (TDI) at a polyurethane foam factory. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 17(5), 207-219. <https://doi.org/10.1080/15459624.2020.1731518>
- Aubin, S., Wingert, L., Gagné, S., Breau, L. et Lesage, J. (2021). Development and characterization of an adaptable aerosolized methylene diphenyl diisocyanate generation system. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 23(10), 1500-1508. <https://doi.org/10.1039/D1EM00183C>
- Aubin, S., Wingert, L., Gagné, S., Breau, L. et Lesage, J. (2023). Comprehensive methylene diphenyl diisocyanate (MDI) evaluation method comparison using a laboratory generation system. *Environmental Science: Processes and Impacts*, 25(5), 941-953. <https://doi.org/10.1039/d2em00443g>
- Bello, A., Xue, Y., Gore, R., Woskie, S. et Bello, D. (2020). Exposures and urinary biomonitoring of aliphatic isocyanates in construction metal structure coating. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 226, article 113495. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2020.113495>
- Bello, D., Woskie, S. R., Streicher, R. P., Liu, Y., Stowe, M. H., Eisen, E. A., . . . Redlich, C. A. (2004). Polyisocyanates in occupational environments: A critical review of exposure limits and metrics. *American Journal of Industrial Medicine*, 46(5), 480-491. <https://doi.org/10.1002/ajim.20076>
- Carlton, G. N. et England, E. C. (2000). Exposures to 1,6-Hexamethylene diisocyanate during polyurethane spray painting in the U.S. Air Force. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 15(9), 705-712. <https://doi.org/10.1080/10473220050110121>

- England, E., Key-Schwartz, R., Lesage, J., Carlton, G., Streicher, R. et Song, R. (2000). Comparison of sampling methods for monomer and polyisocyanates of 1,6-hexamethylene diisocyanate during spray finishing operations. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 15(6), 472-478. <https://doi.org/10.1080/104732200301250>
- Guillemot, M., Ravera, C., Melin, S., Simon, X. et Langlois, E. (2023). Isocyanates aerosols sampling for occupational exposure assessment. *Annals of Work Exposures and Health*, 67(suppl. 1), i10. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxac087.027>
- Henneken, H., Vogel, M. et Karst, U. (2007). Determination of airborne isocyanates. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 387(1), 219-236. <https://doi.org/10.1007/s00216-006-0901-8>
- Hext, P. M., Booth, K., Dharmarajan, V., Karoly, W. J., Parekh, P. P. et Spence, M. (2003). A comparison of the sampling efficiencies of a range of atmosphere samplers when collecting polymeric diphenylmethane di-isocyanate (MDI) aerosols. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 18(5), 346-357. <https://doi.org/10.1080/10473220301363>
- Huynh, C. K., Vu-Duc, T. et Savolainen, H. (1992). Design and evaluation of a solid sampler for the monitoring of airborne 1,6-hexamethylene diisocyanate (HDI) and its prepolymers in two-component spray painting. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 53(3), 157-162. <https://doi.org/10.1080/15298669291359447>
- Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. (2025). *GESTIS database: International limit values for chemical agents (Occupational exposure limits, OELs)*. IFA. <http://limitvalue.ifa.dguv.de/>
- Janko, M., McCarthy, K., Fajer, M. et van Raalte, J. (1992). Occupational exposure to 1,6-hexamethylene diisocyanate-based polyisocyanates in the state of Oregon, 1980-1990. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 53(5), 331-338. <https://doi.org/10.1080/15298669291359735>
- Karoly, W. J. (1998). Stability studies of diphenylmethane diisocyanate (MDI) on glass fiber filters. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 59(9), 645-647. <https://doi.org/10.1080/15428119891010839>
- Lesage, J., Stanley, J., Karoly, W. J. et Lichtenberg, F. W. (2007). Airborne methylene diphenyl diisocyanate (MDI) concentrations associated with the application of polyurethane spray foam in residential construction. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 4(2), 145-155. <https://doi.org/10.1080/15459620601133779>
- Levine, S. P., Hillig, K. J. D., Dharmarajan, V., Spence, M. W. et Baker, M. D. (1995). Critical review of methods of sampling, analysis, and monitoring for TDI and MDI. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 56(6), 581-589. <https://doi.org/10.1080/15428119591016818>

- Lockey, J. E., Redlich, C. A., Streicher, R., Pfahles-Hutchens, A., Hakkinen, P. J., Ellison, G. L., . . . White, M. (2015). Isocyanates and human health: Multistakeholder information needs and research priorities. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 57(1), 44-51. <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000000278>
- Mao, I.-F., Chen, M.-L. et Lin, Y.-C. (2000). Sampling efficiency of a modified closed-face cassette sampler for airborne toluene diisocyanate determination. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 73(8), 570-574. <https://doi.org/10.1007/s004200000182>
- Marand, Å., Karlsson, D., Dalene, M. et Skarping, G. (2005). Solvent-free sampling with di-n-butylamine for monitoring of isocyanates in air. *Journal of Environmental Monitoring*, 7(4), 335-343. <https://doi.org/10.1039/B414761H>
- Nordqvist, Y., Nilsson, U., Colmsjö, A., Dahl, A. et Gudmundsson, A. (2005). A chemisorptive cylindrical denuder designed for personal exposure measurements of isocyanates- evaluation on generated aerosols of 4,4'-methylenediphenyl diisocyanate. *Journal of Environmental Monitoring*, 7(5), 469-474. <https://doi.org/10.1039/B414047H>
- Organisation internationale de normalisation. (1995). *Qualité de l'air : Définitions des fractions de taille des particules pour l'échantillonnage lié aux problèmes de santé*. Norme ISO 7708.
- Organisation internationale de normalisation. (2007). *Workplace air quality: Determination of total organic isocyanate groups in air using the 1-(2-methoxyphenyl)piperazine and liquid chromatography*. Norme ISO 16702.
- Organisation internationale de normalisation. (2008a). *Workplace atmospheres: Determination of organonitrogen compounds in air using liquid chromatography and mass spectrometry. Part 1: Isocyanates using dibutylamine derivatives*. Norme ISO 17734-1.
- Organisation internationale de normalisation. (2008b). *Workplace atmospheres: Guidelines for selecting analytical methods for sampling and analysing isocyanates in air*. Norme ISO/TR 17737.
- Pronk, A., Tielemans, E., Skarping, G., Bobeldijk, I., Van Hemmen, J., Heederik, D. et Preller, L. (2006). Inhalation exposure to isocyanates of car body repair shop workers and industrial spray painters. *The Annals of Occupational Hygiene*, 50(1), 1-14. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mei044>
- Puscasu, S., Aubin, S., Cloutier, Y., Sarazin, P., Van Tra, H. et Gagné, S. (2015a). CIP10 optimization for 4,4-methylene diphenyl diisocyanate aerosol sampling and field comparison with impinger method. *The Annals of Occupational Hygiene*, 59(3), 347-357. <https://doi.org/10.1093/annhyg/meu100>
- Puscasu, S., Aubin, S., Cloutier, Y., Sarazin, P., Van Tra, H. et Gagné, S. (2015b). Comparison between the ASSET EZ4 NCO and impinger sampling devices for aerosol sampling of 4,4'-methylene diphenyl diisocyanate in spray foam application. *The Annals of Occupational Hygiene*, 59(7), 872-881. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mev025>

- Roberge, B., Aubin, S., Ostiguy, C. et Lesage, J. (2013). *Guide de prévention pour une utilisation sécuritaire des isocyanates : démarche d'hygiène du travail* (Rapport n° RG-764). IRSST. <https://doi.org/10.70010/UDXO5516>
- Rosenberg, C. et Tuomi, T. (1984). Airborne isocyanates in polyurethane spray painting: Determination and respirator efficiency. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 45(2), 117-121. <https://doi.org/10.1080/15298668491399479>
- Silk, S. J. et Hardy, H. L. (1983). Control limits for isocyanates. *The Annals of Occupational Hygiene*, 27(4), 333-339. <https://doi.org/10.1093/annhyg/27.4.333>
- Spanne, M., Grzybowski, P. et Bohgard, M. (1999). Collection efficiency for submicron particles of a commonly used impinger. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 60(4), 540-544. <https://doi.org/10.1080/00028899908984476>
- Sparer, J., Stowe, M. H., Bello, D., Liu, Y., Gore, R. J., Youngs, F., . . . Woskie, S. R. (2004). Isocyanate exposures in autobody shop work: The SPRAY study. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 1(9), 570-581. <https://doi.org/10.1080/15459620490485909>
- Streicher, R. P., Reh, C. M., Key-Schwartz, R., Schlecht, P. C. et Cassinelli, M. E. (1998). Determination of airborne isocyanate exposure. Dans National Institute for Occupational Safety and Health (édit.), *NIOSH manual of analytical methods* (4e éd.). NIOSH-CDC. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/chapter-k.pdf>
- Streicher, R. P., Reh, C. M., Key-Schwartz, R., Schlecht, P. C., Cassinelli, M. E. et O'Connor, P. F. (2002). Selecting isocyanate sampling and analytical methods. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 17(3), 157-162. <https://doi.org/10.1080/104732202753438234>
- White, J. (2006). MDHS 25 revisited: Development of MDHS 25/3, the determination of organic isocyanates in air. *The Annals of Occupational Hygiene*, 50(1), 15-27. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mei036>
- White, J., Coldwell, M., Davies, T., Helps, J., Piney, M., Rimmer, D., . . . Wake, D. (2006). *Isocyanate exposure, emission and control in small motor vehicle repair premises using spray rooms: Phase 1*. HSE.