

Substitution du dichlorométhane

Caroline Couture^{1,2}, Jérôme Lavoué^{1,3}, Philippe Sarazin⁴,
Isabelle Valois^{1,2}, Maximilien Debia^{1,2}

R-1207-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

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2025
ISBN 978-2-89797-321-6 (PDF)

<https://doi.org/10.70010/CHWB3364>

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

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



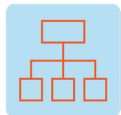
Identification des dangers, estimation et évaluation des risques



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 nos collègues du Département de santé environnementale et santé au travail (DSEST) de l'École de santé publique de l'Université de Montréal, Charles Beaudry, Daniel Drolet et Édith Giasson pour nous avoir fait bénéficier de leurs connaissances en hygiène du travail, et plus particulièrement, Denis Bégin, pour avoir pavé la voie à la démarche de substitution tout en nous ayant alimentés en informations précieuses tout au long du projet. Un merci également à Dominique Ker dont la vision européenne a apporté des éléments supplémentaires à ce rapport. Finalement, nous tenons à remercier toutes les entreprises et organisations partenaires qui nous ont fourni des exemples et des fiches de données de sécurité, sans qui le travail actuel aurait été moins utile pour les milieux de travail.

SOMMAIRE

L'exposition aux solvants organiques est une préoccupation majeure en santé et en sécurité du travail. Selon CAREX Canada, 22 000 travailleuses et travailleurs canadiens étaient exposés en 2016 au dichlorométhane (DCM), incluant 5 600 travailleuses et travailleurs québécois. Le DCM est notamment utilisé comme solvant dans les décapants à peinture et les dégraissants, comme milieu réactionnel dans la synthèse de produits pharmaceutiques et de pesticides et comme solvant pour l'extraction de substances organiques. En plus de ses effets irritants et cancérogènes, le DCM peut être responsable d'une carboxyhémoglobinémie par production endogène de monoxyde de carbone lors de sa transformation métabolique. La toxicité du DCM a mené à son interdiction dans l'Union européenne dans les décapants à peinture depuis 2012 et de nouvelles réglementations se mettent en place aux États-Unis afin d'interdire ou de limiter son utilisation. Au Canada, le DCM est inscrit sur la Liste critique des ingrédients des cosmétiques de Santé Canada et son usage est interdit dans les cosmétiques en aérosols. Ces mesures forcent les entreprises à travailler au remplacement du DCM dans de nombreuses applications.

C'est dans cette optique qu'une revue de littérature critique a été effectuée afin d'identifier les options de rechange au DCM. Pour ce faire, une recherche exhaustive a été réalisée dans 1) des bases de données bibliographiques; 2) des banques de données factuelles; 3) des rapports d'études de cas et 4) des fiches de substitution par utilisation. Une consultation de quatre banques de données d'exposition professionnelle a aussi été complétée afin de cibler les milieux de travail les plus préoccupants au regard de l'exposition au DCM. Deux outils d'analyse comparative ont permis d'évaluer les options de remplacement du DCM. Il s'agit du rapport de danger de vapeur (indice « *Vapour Hazard Ratio* » ou VHR), indiquant le potentiel de surexposition de différentes options de remplacement, ainsi que du système P2OASys (*Pollution Prevention Option Analysis System*) produit par le Toxics Use Reduction Institute (TURI) et permettant d'attribuer une cote aux produits chimiques selon différents critères (notamment en environnement, santé et sécurité). Finalement, les différents solvants de remplacement identifiés ont été analysés en regard du programme *Safer Choice* de l'U.S. EPA qui vise à informer sur le degré de vertitude des substances.

Les secteurs de la réparation des avions et automobiles (fuselage et carrosserie), de la production de produits chimiques organiques industriels et de produits du plastique (incluant les produits en mousse plastique), de la fabrication et de la réparation des structures de bois (rembourrage, matelas et sommiers, mobiliers de bureau, bâtiments publics et mobiliers connexes, cloisons, luminaires, armoires de cuisine), mais aussi ceux de la fabrication d'ascenseurs et d'escaliers mobiles sont propices à engendrer des situations de surexposition.

Dix-sept solvants de remplacement ont été identifiés avec à la fois un VHR ≤ 1000 et une cote P2OASys ≤ 6 . Parmi ces solvants, on souligne les esters d'acides dicarboxyliques

(DBE), le carbonate de propylène, le d-limonène, le lactate d'éthyle, les acétates, le diméthylsulfoxyde (DMSO), le méthylal (diméthoxyméthane), l'alcool benzylique (AB), l'isopropanol, et certains éthers de glycol. Les DBE, le lactate d'éthyle, l'isopropanol et l'acétate de propyle sont aussi des produits recommandés par le programme *Safer Choice*. D'autres substances présentant des enjeux plus importants en hygiène du travail, le N,N-Diméthylformamide (DMF) et la N-méthyl-2-pyrrolidone (NMP), apparaissent aussi comme des options de remplacement au DCM.

Toutes ces options de remplacement ne sont pas sans danger pour les travailleuses et travailleurs, et tout projet de remplacement du DCM devrait se faire selon une démarche organisée et systématique, soit la démarche en 9 étapes proposée par Gérin et Bégin (2002).

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1. ÉTAT DES CONNAISSANCES	3
1.1 Propriétés physico-chimiques du DCM	3
1.2 Toxicocinétique du DCM	4
1.3 Effets du DCM chez l'humain	4
1.4 Surveillance biologique de l'exposition	6
1.5 Échantillonnage et analyse	6
1.6 Équipements de protection collective et individuelle	7
1.7 Réglementation concernant le DCM et la substitution	8
2. MÉTHODOLOGIE	14
2.1 Recherche bibliographique	14
2.2 Consultation de banques de données	15
2.3 Évaluation des options de remplacement	17
2.3.1 Outils	17
2.3.2 Étiquettes et certifications	18
3. RÉSULTATS	19
3.1 Production et utilisation	19
3.1.1 Procédé de fabrication	19
3.1.2 Utilisation	19
3.1.3 Secteurs d'activités	21
3.2 Données sur l'exposition humaine	34
3.3 Options de remplacement	36
3.3.1 Décapants (peinture, vernis, encre, adhésif et joint)	37
3.3.2 Nettoyants et dégraissants	42
3.3.3 Dégrippants/lubrifiants	44
3.3.4 Composantes de colles, d'adhésifs et de calfeutnants (« scellants » à joint)	45
3.3.5 Soudage et cimentation au solvant	46
3.3.6 Revêtements et peintures	47
3.3.7 Préparations anti-projections en soudage métallique (anti-adhérents)	48
3.3.8 Industries pharmaceutiques	48

3.3.9	Extraction d'arômes, des parfums, des huiles essentielles et de composés organiques (alimentation, industrie pétrolière)	48
3.3.10	Analyses environnementales	50
3.3.11	Synthèse chimique	50
3.3.12	Dentisterie	51
3.3.13	Industrie de la fabrication et du recyclage des appareils électroniques.....	51
3.3.14	Imprimerie et sérigraphie	52
3.3.15	Tannerie et mégisserie (cuir)	52
4.	DISCUSSION	53
4.1	Options de remplacement fréquemment identifiées dans la littérature	53
4.1.1	Solvants de remplacement à privilégier selon le VHR et la cote P2OASys.....	53
4.1.2	Autres options de remplacement	58
4.2	Limites et défis	61
4.2.1	Outils de sélection de solvants	61
4.2.2	Réglementation	63
4.2.3	Écoblanchiment.....	66
4.2.4	Démarche de substitution	68
	CONCLUSION.....	71
	BIBLIOGRAPHIE	72
	ANNEXE A	95
A.I	Propriétés physico-chimiques du Dichlorométhane (DCM)	95
	ANNEXE B	98
B.I	Méthode de calcul du VHR et résultats associés à une liste de solvants.....	98
	ANNEXE C	103
C.I	Liste des catégories, exemples de critères de P2OASys et résultats associés pour une liste de solvants	103
	ANNEXE D	109
D.I	Résultats d'exposition au DCM selon l'INRS pour la période 1987 à 2022.....	109

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Dix secteurs où le DCM a été le plus fréquemment mesuré parmi les mesures détectées dans le LIMS et la BDEP d'OSHA	35
Tableau 2.	Substances divulguées dans 17 décapants à peinture commerciaux sans DCM	38
Tableau 3.	Substances divulguées dans 4 nettoyants à freins sans DCM	42
Tableau 4.	Liste des solvants avec leur VHR, leur cote P2OASys et leur classement en vertu du programme <i>Safer Choice</i>	54
Tableau 5.	Propriétés physico-chimiques du DCM	95
Tableau 6.	Liste de solvants avec leur n° CAS correspondant et les paramètres permettant le calcul de leur VHR.....	99
Tableau 7.	Catégories et exemples de critères de danger utilisés dans le système étasunien P2OASys.....	103
Tableau 8.	Résultats de cote P2OASys pour une liste de solvants	107

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Structure moléculaire du DCM.	3
Figure 2.	Statistiques descriptives des données d'exposition longue durée au DCM	109
Figure 3.	Évolution des niveaux d'exposition au DCM.....	110

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

Acronyme	Définition
2-BE	2-butoxyéthanol
AB	Alcool benzylique
ABS	Acrylonitrile butadiène styrène
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
AMM	Adhésifs de méthacrylate de méthyle
Anses	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
APR	Appareil de protection respiratoire
BDCET	Base de données canadienne des expositions au travail
BDEP	Banque de données d'exposition professionnelle
BPA	Bisphénol-A
C2	Cancérogène soupçonné chez l'humain selon le RSST
CAA	<i>Clean Air Act</i>
CAEQ	Classification des activités économiques du Québec
CAREX	<i>CARcinogen EXposure</i>
CAS	Chemical Abstracts Service
CCHST	Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail
CEAEQ	Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec
CEN	Comité européen de normalisation
CERCLA	<i>Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act</i>
CFR	<i>Code of Federal Regulations</i>
CIRC	Centre international de Recherche sur le Cancer
CL50	Concentration létale médiane
CMR	Cancérogènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction
CNESST	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
CO	Monoxyde de carbone
CO ₂	Dioxyde de carbone
COHb	Carboxyhémoglobine
COV	Composé organique volatil

Acronyme	Définition
CPG-DIF	Chromatographie en phase gazeuse avec détection par ionisation de flamme
CWED	<i>Canadian Workplace Exposure Database</i>
DBE	<i>Dibasic Esters</i> (esters d'acides dicarboxyliques)
DCM	Dichlorométhane (chlorure de méthylène)
DEGBE	2-(2-Butoxyéthoxy)-éthanol
DEGEE	Éther monoéthylique de diéthylène glycol
DEGME	Éther monométhylique du diéthylène glycol
DKP	Hydrogenophosphate de potassium
DL50	Dose létale médiane
DMF	N,N-Diméthylformamide
DMSO	Diméthylsulfoxyde
ECHA	European Chemicals Agency
EM	Substance dont l'exposition doit être réduite au minimum
EPC	Équipement de protection collective
EPCRA	<i>Emergency Planning and Community Right-to-Know Act</i>
EPI	Équipement de protection individuelle
ESC	Eau supercritique
EVA	Éthylène et alcool vinylique
FDS	Fiche de données de sécurité
g O ₃ /g COV	Gramme d'ozone par gramme de COV
GBL	Gamma-butyrolactone
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HFC	Hydrofluorocarbure
ICH	International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use
ILD	Instrument à lecture directe
IMIS	<i>Integrated Management Information System</i>
INERIS	Institut national de l'environnement industriel et des risques
INRP	Inventaire national des rejets de polluants
INRS	Institut national de recherche et de sécurité

Acronyme	Définition
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
LCPE	<i>Loi canadienne sur la protection de l'environnement</i>
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
LIC	Laboratoires Interrégionaux de Chimie
LIMS	<i>Laboratory Information Management System</i>
LSST	<i>Loi sur la santé et la sécurité du travail</i>
MEK	Méthyl éthyl cétone
NAICS	<i>North American Industry Classification System</i>
NAPA	National Automotive Parts Association
NEI	<i>National Emissions Inventory</i>
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health
NMP	N-méthyl-2-pyrrolidone
NSCEP	National Service Center for Environmental Publications
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
OPPBTP	Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
P2OASys	<i>Pollution Prevention Option Analysis System</i>
Pa	Pascal
PACO	Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique
PBT	Persistantes, bioaccumalables ou toxiques
PEL	<i>Permissible Exposure Limit</i>
PERC	Perchloréthylène (tétrachloréthylène)
PFO	Potentiel de formation d'ozone urbain ou troposphérique
PME	Petites et moyennes entreprises
PV	Photovoltaïque
PVA	Poly(alcool vinylique)
RAA	<i>Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère</i>
RCSST	<i>Règlement canadien sur la santé et la sécurité au travail</i>
REACH	<i>Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals</i>
REL	<i>Recommended Exposure Limit</i>

Acronyme	Définition
Reptox	Répertoire toxicologique
RPCCC	<i>Règlement sur les produits chimiques et contenants de consommation</i>
RPD	<i>Règlement sur les produits dangereux</i>
RSPSAT	Réseau de santé publique en santé au travail du Québec
RSST	<i>Règlement sur la santé et la sécurité du travail</i>
SCIAN	Système de classification des industries de l'Amérique du Nord
SGH	Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques
SIC	<i>Standard Industrial Classification</i>
SIMDUT	Système d'information sur les matières dangereuses utilisées au travail
SST	Santé et sécurité du travail
STEL	<i>Short-term Exposure Limit</i>
TCA	1,1,1-Trichloroethane (1,1,1-trichloréthane)
TCE	Trichloroéthylène (trichloréthylène)
THF	Tétrahydrofurane
TLV	<i>Threshold Limit Value</i>
TRI	<i>Toxics Release Inventory</i>
TURA	<i>Toxics Use Reduction Act</i>
TURI	Toxics Use Reduction Institute
TWA	<i>Time-Weighted Average</i>
UE	Union européenne
UL	Underwriters Laboratories
U.S. EPA	United States Environmental Protection Agency (Agence de protection de l'environnement des États-Unis)
VECD	Valeur d'exposition courte durée
VEMP	Valeur d'exposition moyenne pondérée
VHR	<i>Vapour Hazard Ratio</i> (rapport de danger de vapeur)
VLE	Valeur limite d'exposition professionnelle
vPvB	Substances très persistantes et très bioaccumulables
WEEL	<i>Workplace Environmental Exposure Level</i>

INTRODUCTION

L'exposition aux solvants organiques est une préoccupation majeure en santé et en sécurité du travail. Environ 300 000 travailleuses et travailleurs québécois sont exposés régulièrement à des solvants organiques, incluant le dichlorométhane (DCM) ou chlorure de méthylène (no CAS : 75-09-2). Selon CAREX Canada (2020), 22 000 travailleuses et travailleurs canadiens étaient exposés au DCM en 2016 dans le cadre de leur travail, soit 5 600 travailleuses et travailleurs québécois. Près de la moitié de ceux-ci étaient exposés à des niveaux importants de DCM jugés modérés ou élevés.

Le DCM est notamment utilisé comme solvant dans les décapants à peinture et les dégraissants, comme composant de bombes aérosols, comme milieu réactionnel dans la synthèse de produits pharmaceutiques et de pesticides et comme solvant pour l'extraction de substances organiques. À une certaine époque, il a lui-même été utilisé en remplacement d'autres substances toxiques présentes dans des adhésifs comme le 1,1,1-trichloréthane (TCA) (Bégin et Gérin, 2001).

L'inhalation de DCM entraîne une dépression du système nerveux central et, à fortes concentrations, une dépression respiratoire pouvant mener à la mort. Le DCM est aussi un solvant classé comme probablement cancérigène chez l'humain (2A) par le Centre international de Recherche sur le Cancer (CIRC) (Benbrahim-Tallaa *et al.*, 2014).

De 1980 à 2018, 74 décès liés à l'utilisation du DCM en milieu de travail ont été identifiés aux États-Unis (Hoang *et al.*, 2021). Les décapants pour peinture étaient les produits les plus fréquemment impliqués dans les décès liés au DCM (Hoang *et al.*, 2021). La toxicité du DCM a mené à son interdiction dans l'Union européenne (UE) dans les décapants à peinture depuis le 6 juin 2012 et de nouvelles réglementations se mettent en place aux États-Unis afin d'interdire ou de limiter l'utilisation de ce solvant.

Au Canada, cela fait plus de 30 ans que le DCM a été identifié comme présentant un risque pour la santé humaine et l'environnement (Environnement Canada et Santé Canada, 1993; Gouvernement du Canada, 2022a). Depuis 2003, le gouvernement fédéral exige que toute personne qui utilise 1000 kg ou plus de DCM par année mette en place un plan de prévention de la pollution à l'égard du DCM (*Avis obligeant l'élaboration et l'exécution de plans de prévention de la pollution à l'égard du dichlorométhane*, (2003) 137 Gaz. Gan. I, 3718). Le DCM est inscrit sur la Liste critique des ingrédients des cosmétiques de Santé Canada et son usage est interdit dans les cosmétiques en aérosols (Gouvernement du Canada, 2022b).

Ces mesures forcent les entreprises à travailler au remplacement du DCM dans de nombreuses applications. La présente monographie traite de la substitution du DCM en milieu de travail. Elle présente de façon synthétique et critique les connaissances sur les aspects de santé et sécurité du travail (SST) et d'environnement à considérer pour la

substitution de ce solvant, identifie les principales applications industrielles retrouvées dans la littérature utilisant ce solvant puis aborde les options de remplacement de manière à guider les spécialistes de l'hygiène du travail et de l'environnement dans leurs choix et décisions par rapport à la substitution de cette substance.

1. ÉTAT DES CONNAISSANCES

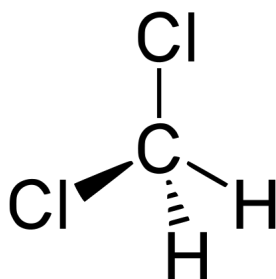
1.1 Propriétés physico-chimiques du DCM

Le DCM ou chlorure de méthylène (CAS 75-09-2) est un hydrocarbure halogéné dont deux atomes d'hydrogène du méthane ont été remplacés par du chlore (Gérin, 2002). La structure moléculaire du DCM (CH_2Cl_2) est illustrée à la Figure 1.

Figure 1. Structure moléculaire du DCM.

De « Dichloromethane », 2009

(<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dichloromethane.svg>). Reproduit avec permission.



Le DCM est un liquide incolore possédant une odeur étherée pénétrante ou une douce odeur sucrée. C'est un solvant très volatil et sa tension de vapeur à 20°C est de 350 mmHg et de 435 mmHg à 25°C (National Library of Medicine, 2023). La concentration à saturation correspondante atteint alors plus de 460 536 ppm à 20°C et 572 368 ppm à 25°C.

La densité des vapeurs du DCM est de 2,93 (air=1), ce qui signifie que ces vapeurs sont plus lourdes que l'air et qu'elles ont tendance à s'accumuler dans différents endroits partiellement fermés comme des baignoires (Bégin *et al.*, 2016b).

Le seuil de détection olfactif dans l'air de cette substance se situe entre 25 et 622 ppm selon la source consultée (Occupational Safety and Health Administration [OSHA], 2013; Santé Canada, 2012), ce qui signifie que les travailleuses et travailleurs pourraient être exposés à des concentrations de plusieurs dizaines de ppm sans en déceler sa présence dans le milieu.

Le DCM ne possède pas de point d'éclair à conditions normales de température et de pression, il n'est donc pas considéré comme un solvant inflammable (National Library of Medicine, 2023).

Le DCM est considéré insoluble ou peu soluble dans l'eau (13 à 20 g·l⁻¹ à 20°C) mais est miscible avec la plupart des solvants organiques (Institut national de recherche et de sécurité [INRS], 2021). Les paramètres de solubilité de Hansen en (J.cm⁻³)^{1/2} de cette

substance sont de $\delta_d = 18,2$; $\delta_p = 6,4$; $\delta_h = 6,2$ (δ_d = composante de dispersion ; δ_p = composante polaire ; δ_h = composante de liaison hydrogène) (Bégin et Gérin, 2002). Ces valeurs permettent de prédire le domaine de solubilité du DCM et de guider dans le choix d'un produit de remplacement possédant le même potentiel de solubilité. L'Annexe A présente les principales propriétés physico-chimiques du DCM.

1.2 Toxicocinétique du DCM

Le DCM est facilement absorbé par inhalation. Selon la concentration et la durée d'exposition, 31 % à 75 % de la dose inhalée est absorbée. Lorsqu'absorbé, le métabolisme du DCM génère du monoxyde de carbone (CO) selon une relation dose dépendante jusqu'à des concentrations de 200 à 500 ppm. Le CO agit alors comme un asphyxiant chimique en déplaçant l'oxygène de l'hémoglobine, formant de la carboxyhémoglobine (COHb). Des niveaux de COHb allant jusqu'à 10 % sont rapportés lors d'exposition à plusieurs centaines de ppm de DCM. Le métabolisme du DCM mène aussi à la formation de formaldéhyde, une substance reconnue comme cancérigène (American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2005).

Par ailleurs, dans leur règlement spécifique sur le DCM, le département du travail américain (Department of Labor ou US DOL) et l'agence gouvernementale fédérale des États-Unis en matière de santé au travail (Occupational Safety and Health Administration ou OSHA) rapportent que l'exposition au DCM pourrait aussi se produire par absorption par la peau lorsque la travailleuse ou le travailleur serait exposé à de fortes concentrations de vapeurs, particulièrement dans les cas où il utiliserait un appareil de protection respiratoire à adduction d'air (*Occupational exposure to methylene chloride*, 62 Fed. Reg., 1491 (10 janvier 1997)).

L'élimination de l'organisme se fait principalement par l'exhalation de DCM inchangé, de CO et de dioxyde de carbone (CO₂). L'excrétion urinaire se produit aussi dans une moindre mesure.

1.3 Effets du DCM chez l'humain

L'inhalation de DCM entraîne une dépression du système nerveux central et, à fortes concentrations, une dépression respiratoire pouvant mener à la mort. Parmi les symptômes à court terme, on rapporte des étourdissements, nausées, vomissements, maux de tête et de la confusion mentale (OSHA, 2013). Le DCM peut également être responsable d'une irritation des yeux, du nez et de la gorge mais aussi de la peau. Les travailleuses et travailleurs atteints de maladies cardiaques sont également à risque de faire une crise cardiaque ou de l'arythmie à la suite d'une augmentation du CO dans le sang (OSHA et National Institute for Occupational Safety and Health [NIOSH], 2013). En effet, tel que décrit dans la section précédente, le DCM peut être responsable d'une carboxyhémoglobinémie par production endogène de CO lors de la transformation métabolique.

L'exposition chronique au DCM est associée essentiellement à des effets hépatotoxiques, mais des effets rénaux sont aussi rapportés. Une analyse de l'impact du DCM sur le système endocrinien est également en cours par l'European chemicals agency (ECHA)¹. Le DCM est un solvant classé comme probablement cancérogène chez l'humain (groupe 2A) par le CIRC (Benbrahim-Tallaa *et al.*, 2014), alors que selon le *Règlement sur la santé et la sécurité du travail* (RSST) (R.L.R.Q. c. S-2.1, r. 13), le DCM est un cancérogène soupçonné chez l'humain (C2). La classification du CIRC a été déterminée sur la base d'une preuve limitée que le DCM cause le cancer du tractus biliaire (cholangiocarcinome) et le lymphome non hodgkinien chez l'humain ainsi que d'une preuve suffisante de sa cancérogénicité chez l'animal (tumeur pulmonaire maligne et hépatocellulaire chez la souris).

De nombreux décès sont rapportés en lien avec des expositions au DCM (Hoang *et al.*, 2021; Rayasam *et al.*, 2019). Les travailleuses et travailleurs du secteur du décapage de peintures ont été majoritairement affectés par ces décès. En 2012, aux États-Unis, un ouvrier est mort asphyxié en décapant l'intérieur d'un réservoir ayant servi à fabriquer de la peinture à l'eau. Le décapant utilisé pour accomplir la tâche de travail contenait plus de 60 % de DCM. La victime portait un appareil de protection respiratoire (APR) à cartouches chimiques, mais celui-ci s'est avéré inadéquat dans les circonstances (Cierpich *et al.*, 2012). Un autre cas mortel, lié au décapage de baignoires, est survenu en 2012 aux États-Unis. En effet, l'Université de l'Iowa a signalé le décès d'une travailleuse qui utilisait un produit de décapage à base de DCM et de méthanol. La technicienne, qui travaillait seule dans une petite salle de bain, n'était protégée ni par ventilation ni par protection respiratoire (Leonard *et al.*, 2012). Ces deux exemples ne sont qu'une partie des 85 décès qui ont été comptabilisés aux États-Unis pour la période s'échelonnant de 1980 à 2018, dont 74 associés au travail. Concernant les blessures non fatales, 37 201 appels faits au centre antipoison américain entre 1995 et 2017 concernaient une exposition aux décapants (Rosenman, 2021); on suspecte ainsi le DCM d'être responsable d'une majeure partie de ces appels. Selon le Parlement européen (*Décision du Conseil n° 455/2009*, 2009 J.O. (L 137), 3-6), « entre 1989 et 2007, le DCM a causé 18 accidents mortels (9 lors d'usages industriels, 8 lors d'usages professionnels et 1 lors d'usage grand public) et 56 accidents non mortels au sein de l'Union européenne » (Risk & Policy Analysts Limited, 2007).

D'autres effets de nature auto-immune ont été documentés récemment dans la littérature dont le syndrome de Sjögren (Chaigne *et al.*, 2015) et la sclérose amyotrophique latérale (Dickerson *et al.*, 2020). Les solvants, dont le DCM, ont également été identifiés tout récemment comme facteur de risque pour le syndrome métabolique (Kang *et al.*, 2023).

¹ <https://echa.europa.eu/fr/substance-information/-/substanceinfo/100.000.763>

1.4 Surveillance biologique de l'exposition

L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) a identifié cinq indicateurs biologiques d'exposition au DCM (Anses, 2018) :

- le DCM dans l'air expiré;
- le DCM sanguin;
- le DCM urinaire;
- le CO dans l'air expiré;
- la carboxyhémoglobine.

Après avoir étudié les avantages et les limites de chaque indicateur biologique, l'Anses a retenu le DCM urinaire et la carboxyhémoglobine comme pertinents pour la surveillance des expositions professionnelles au DCM. Pour le DCM urinaire, une valeur limite biologique de 0,2 mg/L est proposée. Pour la carboxyhémoglobine, l'Anses propose une valeur limite biologique de 3,5 %. Cette mesure de la carboxyhémoglobine ne peut toutefois être utilisée que chez les travailleuses et travailleurs non-fumeurs (American Conference of Governmental Industrial Hygienists [ACGIH], 2005; Anses, 2018). Du côté de la Suisse, les valeurs limites d'exposition professionnelles (VLE) 2024 de la SUVA sont les suivantes² : pour la carboxyhémoglobine, valeur limite biologique à 5 % (mesure en fin de l'exposition, de la période de travail) et pour le DCM sanguin, valeur limite biologique à 0,5 mg/L (mesure en fin de l'exposition, de la période de travail).

1.5 Échantillonnage et analyse

Afin d'évaluer les niveaux d'exposition, plusieurs méthodes d'échantillonnage sont proposées. Tout d'abord, selon le guide d'échantillonnage des contaminants de l'air de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), un tube de charbon actif (100/50 mg) installé dans la zone respiratoire du travail et muni d'une pompe d'échantillonnage à bas débit, d'un maximum de 0,2 L/min, permettra de connaître la concentration moyenne dans l'air durant le quart de travail (IRSST, 2023). L'autre méthode préconisée par l'IRSST est l'utilisation d'un dosimètre passif 3M 3500 pour vapeurs organiques. Les deux médias de collecte sont ensuite analysés par chromatographie en phase gazeuse avec détection par ionisation de flamme (CPG-DIF).

Pour sa part, l'OSHA³ suggère d'utiliser un tube de charbon actif 130/65 mg et un débit d'échantillonnage de 0,05 L/min. Le volume d'échantillonnage recommandé (3 L) de même que la méthode d'analyse de l'échantillon sont les mêmes qu'au Québec.

² <https://www.suva.ch/fr-ch/services/grenzwerte#gnw-location=%2F>

³ <https://www.osha.gov/chemicaldata/572>

L'Institut national de recherche et de sécurité (INRS, 2023) présente le dispositif de tube avec support de collecte CARBOXEN © 564 et un débit d'échantillonnage de 0,02 L/min permettant un prélèvement sur 8 heures. La méthode d'analyse est encore identique à celle présentée précédemment, soit la CPG-DIF. L'INRS propose également une méthode d'échantillonnage passive, soit l'utilisation d'un badge de charbon actif dont le contenu échantillonné sera par la suite analysé par CPG-DIF (INRS, 2015).

Des tubes de détection colorimétriques sont aussi disponibles pour faire des mesures instantanées des concentrations de DCM. Par exemple, le tube Gastec No 138 permet d'obtenir une information sur les concentrations de vapeurs de DCM de 30 à 500 ppm. Des corrections pour la température, l'humidité et la pression atmosphériques sont nécessaires.

Finalement, il est possible de lire en temps réel le DCM, en utilisant un appareil infrarouge à lecture directe avec une concentration minimale détectable de 0,7 mg/m³ (0,2 ppm) (International Agency for Research on Cancer [IARC], 2016).

1.6 Équipements de protection collective et individuelle

Bien que selon la hiérarchie des moyens de prévention, l'élimination à la source ou la substitution de la substance ou du procédé soient privilégiées, l'utilisation de certains équipements de protection collective (EPC) ou individuelle (EPI) pourrait être nécessaire pour protéger les travailleuses et travailleurs du DCM. Tout d'abord, une ventilation adéquate serait de mise. De plus, le DCM ayant une mention EM (substance dont l'exposition doit être réduite au minimum) en tant que cancérogène (RSST, c. S-2.1, r. 13), toute mesure devrait être mise en place par le milieu de travail pour diminuer l'exposition.

En cas de dépassement de norme, un APR serait de mise. Au Québec, il faut se référer, selon le RSST (c. S-2.1, r. 13), à la norme CSA Z94.4-11 (Groupe CSA, 2011) pour la sélection d'un APR. Dans le Guide de protection respiratoire de l'IRSST/CNESST (Ouellet et Labrecque, 2023), on y indique qu'avec des solvants ayant des points d'ébullition < 65 °C, ce qui est le cas pour le DCM, « on ne devra en aucun cas réutiliser les cartouches pour plus d'un quart de travail ». En effet, le temps de claquage⁴ est très court pour les solvants très volatils, sans compter les situations où la coexposition serait possible et où les autres solvants auraient plus d'affinité pour le charbon des filtres, ce qui pourrait libérer les molécules de DCM (Cierpich *et al.*, 2012).

Il n'y a aucune information dans le RSST indiquant que les APR à épuration d'air ne peuvent pas être utilisés lorsqu'il y a surexposition au DCM. En revanche, OSHA, aux

⁴ « État d'une cartouche qui a atteint sa saturation complète. Ce phénomène se produit lorsque toute la surface de charbon actif a été utilisée pour adsorber des contaminants » (Ouellet et Labrecque, 2023).

États-Unis, exige pour sa part un système à adduction d'air ou un APR autonome avec un masque complet lorsque l'exposition au DCM de la travailleuse ou du travailleur excède ou risque d'excéder la limite d'exposition permise sur 8 heures (*Permissible Exposure Limit ou PEL; Time-Weighted Average-Permissible Exposure Limit 8h* (TWA-PEL 8h) ou la limite d'exposition à court terme (*Short-term Exposure Limit* (STEL) de l'OSHA) (Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 29 C.F.R. § 1910.1052 (2024); *Occupational exposure to methylene chloride*, 62 Fed. Reg., 1494 (10 janvier 1997)). Notons que, dans les pays de la communauté européenne, on offre une solution différente pour une surexposition à des vapeurs organiques de substances ayant un point d'ébullition inférieur à 65°C. L'utilisation d'APR à épuration d'air pour ces vapeurs nécessite des cartouches spécifiques (AX) et ceci pour une seule utilisation (INRS, 2020).

En ce qui concerne les autres EPI, le Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail (CCHST) recommande de porter des lunettes de protection, ainsi qu'un tablier, des gants et des bottes faits de matériaux adaptés^{5,6}. Plus précisément, certaines références⁷ (Le Roy, 2020) recommandent l'utilisation de gants faits de poly(alcool vinylique) (PVA) ou de copolymère éthylène et d'alcool vinylique (EVA) pour une protection contre les hydrocarbures chlorés. Ce matériel semble d'ailleurs être le plus performant en termes de durée d'utilisation (le temps de claquage est > 360 minutes) chez la compagnie Ansell⁸; il consiste cependant en un matériau très rigide (faible dextérité) qui se décompose en présence de l'eau. Les gants Silver Shield® de Honeywell, constitués d'un stratifié de trois couches de polymères (polyéthylène (PE)/ copolymère éthylène et alcool vinylique (EVAL) / polyéthylène (PE)), sont cotés comme résistants pour plus de 8 heures (Forsberg et al., 2020). Cependant, sa résistance mécanique (piqûre, coupure) et sa faible souplesse peuvent limiter son utilisation selon le travail accompli. Il est donc recommandé de l'insérer simplement dans un gant résistant aux agresseurs mécaniques. Cela pourrait expliquer pourquoi il ne semble pas y avoir de bons polymères pour résister au DCM selon le logiciel Protecpo (Lara *et al.*, 2011)⁹.

1.7 Réglementation concernant le DCM et la substitution

Une valeur d'exposition moyenne pondérée (VEMP) de 50 ppm (174 mg/m³) est établie pour le DCM dans le RSST au Québec (R.L.R.Q., c. S-2.1, R. 13). La même recommandation est proposée par l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH, 2022) et par l'Anses (2018), alors que l'OSHA de même que le

⁵ https://www.cchst.ca/oshanswers/chemicals/chem_profiles/methylene.html#section-12-hdr

⁶ https://www.cchst.ca/oshanswers/prevention/ppe/trade_name.html

⁷ https://www.epa.gov/sites/default/files/2017-04/documents/fact_sheet_methylene_chloride_or_dichloromethane_dcm.pdf

⁸ <https://www.ansell.com/ca/fr/ansellguardian-chemical>

⁹ <https://protecpo.inrs.fr/ProtecPo/jsp/Accueil.jsp>

Département des relations industrielles de la Californie¹⁰ préconisent une VLE sur 8 h de 25 ppm (87 mg/m³) depuis plus de 25 ans (*Occupational exposure to methylene chloride*, 62 Fed. Reg., 1494 (10 janvier 1997))¹¹. La VLE 8 h d'OSHA est accompagnée d'une valeur d'exposition courte durée (VECD-15 min) de 125 ppm. De nombreux pays possèdent une VECD; citons la Suède et la France avec des valeurs respectives fixées à 70 et 100 ppm.

On notera ici que la proposition de l'ACGIH d'une VEMP 8h à 50 ppm a été adoptée en 1988. Dans le cadre d'une nouvelle réglementation concernant le DCM, l'agence américaine de protection de l'environnement propose de nouvelles VLE pour prévenir les effets délétères chroniques sur le foie : 2 ppm (8 h) et 16 ppm (15 min) (*Methylene chloride; Regulation under Section 6(a) of the Toxic Substances Control Act (TSCA)*, 88 Fed. Reg., 28284 (3 mai 2023)).

L'ACGIH et le RSST ne possèdent pas de notation peau pour le DCM¹². Or, plusieurs pays en possèdent une dans leur règlement sur les VLE en milieu de travail. La base de données GESTIS¹³ rapporte ainsi que la Belgique, le Danemark, l'Allemagne, la Norvège ou encore l'Espagne possèdent une notation « peau » invitant les intervenants à considérer que la voie percutanée est une contribution potentiellement significative à l'exposition globale. Comme le DCM est classé C2 selon le RSST, il comporte une mention EM, conformément à l'article 42 du RSST (R.L.R.Q., c. S-2.1, r. 13).

La substitution du DCM est une priorité qui répond à l'article 2 de la *Loi sur la santé et la sécurité du travail* (LSST), qui a pour objet l'élimination à la source même des dangers pour la santé, la sécurité et l'intégrité physique des travailleuses et travailleurs (*Loi sur la santé et la sécurité du travail*, R.L.R.Q., c. S-2.1). La substitution répond également à l'article 39 du RSST (R.L.R.Q., c. S-2.1, r. 13) qui vise à remplacer, autant que possible, les matières dangereuses qui sont sources de gaz, de fumées, de vapeurs, de poussières ou de brouillards par des matières qui ne le sont pas ou, encore, qui le sont moins. L'article 10.16 du *Règlement canadien sur la santé et la sécurité au travail* (RCSST, DORS/86-304 (Gaz. Can. II)), qui s'applique aux entreprises sous juridiction fédérale, va dans le même sens. Ce règlement stipule qu'il « est interdit d'utiliser une substance dangereuse dans le lieu de travail lorsqu'il est en pratique possible de la remplacer par une substance non dangereuse ». Le 2^e alinéa du même article précise explicitement que « cette dernière doit, lorsque cela est en pratique possible, être substituée à la substance dangereuse ».

¹⁰ <https://www.dir.ca.gov/title8/5202.html>

¹¹ Cette réglementation vise à limiter les risques associés au cancer et à la sensibilisation des tissus cardiaques.

¹² Cette voie d'exposition inclut le contact direct de la peau avec la substance ou ses vapeurs mais inclut aussi les membranes muqueuses et les yeux (RSST, R.L.R.Q., c. S-2.1, r. 13).

¹³ <https://limitvalue.ifa.dguv.de>

La réglementation et les programmes de gestion des produits chimiques sont mis en place pour restreindre l'utilisation de substances préoccupantes. Les mesures législatives menant à l'interdiction forcent aussi les entreprises à travailler au remplacement du DCM dans de nombreuses applications. Au Canada, certains autres solvants chlorés [tétrachloroéthylène (PERC), trichloréthylène (TCE)] sont déjà sévèrement réglementés, en particulier par le *Règlement sur les solvants de dégraissage* (DORS/2003-283 (Gaz. Can. II)). Toutefois, le DCM ne fait pas encore l'objet d'interdiction d'utilisation spécifique bien que, depuis plus de 25 ans, « une table de concertation constituée de représentants des pouvoirs publics, de l'industrie ainsi que de groupes d'intérêt voués à la protection de l'environnement a été mise sur pied afin d'examiner la façon dont le DCM devrait être géré au Canada » (Environnement Canada, 1998).

L'annexe 1 de la *Loi canadienne sur la protection de l'environnement* (LCPE, L.C. 1999, c. 33) donne la liste des substances toxiques, c.-à-d., celles qui, selon l'article 64, lorsqu'elles pénètrent dans l'environnement, sont susceptibles d'avoir un effet nocif sur l'environnement ou sur la diversité biologique (alinéa a), de mettre en danger l'environnement essentiel à la vie (alinéa b) ou de constituer un danger pour la vie ou la santé humaine (alinéa c). Les articles 57 à 60 de cette même loi permettent notamment d'exiger des Plans de prévention de la pollution aux émetteurs de substances toxiques au Canada. En 2003, un tel plan a été mis en place pour réglementer le DCM au pays (*Avis obligeant l'élaboration et l'exécution de plans de prévention de la pollution à l'égard du dichlorométhane*, (2003) 137 Gaz. Can. I, 3718), particulièrement dans le cadre de certaines activités telles que le « décapage de peinture d'aéronefs, y compris le décapage de pièces d'aéronefs; le gonflement de mousse souple de polyuréthane, la fabrication de produits pharmaceutiques et de produits chimiques intermédiaires, ainsi que l'enrobage de comprimés; le nettoyage industriel; la formulation d'adhésifs » (Environnement Canada, 2003). Les entreprises visées étaient celles utilisant ≥ 1000 kg de DCM par année pendant au moins un an depuis le 1^{er} janvier 1995. Selon le document de mise à jour (Gouvernement du Canada, 2010), cet avis « a permis de réduire l'utilisation de DCM et les rejets de DCM dans l'environnement ont été réduits de 900 000 kg en 1995 à 60 000 kg au 1^{er} janvier 2007. L'objectif global de réduction de 85 % visé par l'avis a été surpassé par la substitution du DCM par d'autres substances, par la reformulation de produits et d'autres méthodes de prévention de pollution ». En outre, pour le décapage de meubles, le gouvernement du Canada a publié un code de pratiques pour réduire les émissions de DCM dans l'environnement, incluant la recommandation d'envisager des méthodes de travail sans DCM (Environnement Canada, 2003).

En 2018, le Gouvernement du Canada publiait un rapport intitulé « *Intégration de la substitution éclairée et de l'évaluation des solutions de rechange dans le programme canadien sur les produits chimiques* » (Lowell Center for Sustainable Production [LCSP], 2018). Malheureusement, la vision des auteurs de ce texte pourra difficilement être mise en œuvre au Canada, car la mise à jour de juin 2023 de la LCPE (L.C. 1999, c. 33) n'y a pas enchâssé le principe de substitution (Lofstedt, 2014).

En juin 2021, le Gouvernement du Canada a publié un avis (Santé Canada, 2021) dans lequel Santé Canada fait siens les principes et les pratiques qui sont énoncés dans un document publié deux mois plus tôt par le Conseil international pour l'harmonisation (International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use ou ICH) des exigences techniques relatives aux produits pharmaceutiques à usage humain (ICH, 2021). Le document de l'ICH concerne les niveaux acceptables de résidus de solvants dans les médicaments. Les solvants sont classés dans trois catégories : classe 1, solvants à éviter, p. ex. le benzène; classe 2, solvants à limiter, p. ex. le DCM; classe 3, solvants possédant un faible potentiel toxique, p. ex. l'acétone. L'ICH a déterminé une exposition journalière admissible dans les médicaments de 6 mg pour le DCM. À noter que l'ICH indique que les solvants de la classe 2 peuvent être cancérogènes chez l'animal, mais sans être génotoxiques. Or, l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (U.S. EPA) considère le DCM comme génotoxique (United States Environmental Protection Agency [EPA], 2011).

En juin 2023, le Gouvernement du Canada a émis un avis en vertu de l'article 71 de la LCPE afin de renouveler la collecte d'informations dans le cadre du Plan de gestion des produits chimiques. Ainsi, toute utilisation, fabrication ou importation du DCM en quantité supérieure à 100 kg doit être déclarée (*Avis concernant certaines substances dans le cadre du Plan de gestion des produits chimiques – 2023*, (2023), 157 Gaz. Can. I, 2198).

Le 1^{er} janvier 2023 entré en vigueur au Canada le *Règlement limitant la concentration en COV de certains produits* (DORS/2021-268 (Gaz. Can. II)). Cette nouvelle réglementation a entraîné des conséquences sur la teneur en solvant de nombreuses préparations commerciales, car une grande quantité de solvants sont des COV. À titre d'exemples, le règlement limite les COV à 1 % p/p dans les dissolvants de vernis à ongles, 10 % p/p dans les nettoyants pour freins d'automobiles, 40 % p/p dans les nettoyants d'équipements électriques, 50 % p/p dans les décapants à peinture ou à revêtement et 75 % dans les nettoyants d'appareils électroniques. Cependant, la définition d'un COV demeure celle de la LCPE, ce qui exclut selon l'annexe I, comme aux États-Unis, certains solvants tels que l'acétone, le DCM et le PERC (LCPE, L.C. 1999, c. 33; *Protection of Environment*, 40 C.F.R. §§ 50-90 (Subchapter C)).

Le *Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère* (RAA) (R.L.R.Q., c. Q-2, r. 4.1), pris en vertu de la *Loi sur la qualité de l'environnement* (R.L.R.Q., c. Q-2), limite l'émission des COV dans l'atmosphère dans diverses industries. À l'instar de la législation canadienne (LCPE), le RAA liste les substances organiques volatiles qui ne sont pas considérées comme des COV (article 18), desquelles fait partie le DCM.

Le DCM est également un des solvants autorisés au Canada à des fins de décaféination; ainsi, les concentrations de résidus acceptables dans le café et le thé sont de 10 ppm (Gouvernement du Canada, 2022c). La norme à cet effet est la même aux États-Unis (*Food and Drug Administration*, 21 C.F.R. § 173.255 (2024)). Pour sa part, la norme européenne est de 2 mg/kg (0,56 ppm) dans le café torréfié et de 5 mg/kg (1,4 ppm) dans

le thé à des fins de décaféination ou de suppression de matières irritantes et amères (*Règlement de la Commission n° 468/2009*, 2009 J.O. (L141), 1-2). Par ailleurs, la teneur maximale en résidus de DCM dans les denrées alimentaires en raison de l'utilisation de solvants d'extraction dans la préparation des arômes à partir d'aromates naturels est de 0,02 mg/kg (0,0056 ppm) (*Règlement de la Commission n° 468/2009*, 2009 J.O. (L141), 1-2).

Aux États-Unis, le DCM doit être déclaré à l'inventaire des rejets toxiques (TRI) en vertu de la loi EPCRA (*Emergency Planning and Community Right-to-Know Act*) (*Protection of Environment*, 40 F.C.R. § 355.1 (Subchapter J)). Il est aussi désigné polluant atmosphérique dangereux en vertu du *Clean Air Act* (CAA) (*Protection of Environment*, 40 F.C.R. § 50-90 (Subchapter C)), et est une substance dangereuse en vertu de la loi CERCLA (*Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act*, 42 U.S.C. §103, cl. 9601).

Le 30 avril 2024, l'U.S. EPA annonçait le bannissement du DCM dans la plupart de ses utilisations¹⁴; l'agence interdit maintenant la fabrication, le traitement et la distribution du DCM pour toutes les utilisations par les consommateurs, et non pas seulement pour les décapants. Quelques utilisations du DCM demeurent permises par la nouvelle réglementation, par exemple dans la fabrication de produits pharmaceutiques, de séparateurs pour batteries aux ions de lithium pour véhicules électriques, dans la synthèse du réfrigérant difluorométhane (HFC-32), comme produit chimique dans les laboratoires, dans la fabrication du polycarbonate et dans le collage au solvant (certaines applications militaires et aérospatiales). La nouvelle réglementation étatsunienne, remplaçant celle de 2019 (*Methylene chloride; Regulation of paint and coating removal for consumer use under TSCA Section 6(a)*, 84 Fed. Reg., 11420 (27 mars 2019); *Methylene chloride; Regulation under Section 6(a) of the Toxic Substances Control Act (TSCA)*, 88 Fed. Reg., 28284 (3 mai 2023)), exige que les milieux de travail où le DCM sera toujours utilisé mettent en œuvre un programme de prévention spécifique au DCM et respectent une VLE sévère, soit une concentration moyenne de 2 ppm (8 mg/m³) de DCM pondérée sur 8 heures de travail. L'U.S. EPA reconnaît aussi que certaines utilisations du DCM sont nécessaires car elles contribuent à limiter l'utilisation des hydrofluorocarbones (HFC) et à contrer les effets de ces substances sur l'environnement et le climat (*Methylene chloride; Regulation under Section 6(a) of the Toxic Substances Control Act (TSCA)*, 88 Fed. Reg., 28284 (3 mai 2023)).

Du côté européen, le règlement REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*) indique que les décapants de peinture contenant du DCM à une concentration supérieure ou égale à 0,1 % en poids ne doivent plus être sur le marché depuis 2011 ni être utilisés par les professionnelles et professionnels depuis le 6 juin 2012

¹⁴ <https://www.epa.gov/newsreleases/biden-harris-administration-finalizes-ban-most-uses-methylene-chloride-protecting>

(*Règlement de la Commission n° 276/2010*, 2010 J.O. (L86), 7-12). En effet, REACH, ou Règlement (CE) No 1907/2006, en vigueur depuis le 1^{er} juin 2007, impose la substitution des substances hautement préoccupantes (les substances cancérogènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction (CMR), les substances persistantes, bioaccumulables ou toxiques (PBT), les substances très persistantes et très bioaccumulables (vPvB) et les substances perturbatrices du système endocrinien) par des options de remplacement moins dangereuses (*Règlement de la Commission n° 1907/2006*, 2006 J.O. (L 396), 1-849). En fait, l'étape d'autorisation des substances chimiques est basée sur le principe de la substitution, qui lui-même encourage la production propre et des produits durables (Kontilski et Gechev, 2006). L'article 4 de la directive européenne concernant la protection des travailleuses et travailleurs contre les risques liés à l'exposition à des agents cancérogènes ou mutagènes au travail, oblige les employeurs à réduire, dans la mesure du possible, l'utilisation de ces agents en milieu de travail, notamment en les remplaçant par des préparations ou des procédés moins dangereux (*Directive du Conseil n° 2004/37/CE*, 2004 J.O. (L 158), 50-76).

Cependant, l'UE laisse aux États membres la compétence de continuer à autoriser l'emploi commercial sur leur territoire. Plus précisément, l'annexe XVII stipule que, par dérogation, « les États membres peuvent autoriser, sur leur territoire et pour certaines activités, l'utilisation de décapants de peinture contenant du DCM par des professionnels ayant reçu une formation spécifique et peuvent autoriser la mise sur le marché de ce type de décapants de peinture aux fins de l'approvisionnement de ces professionnels » (*Règlement de la Commission n° 276/2010*, 2010 J.O. (L86), 7-12). Cependant, l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS) ne signalait aucune demande de dérogation en France plus de 3 ans après l'entrée en vigueur de ce règlement (INERIS, 2015).

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 Recherche bibliographique

Une revue de littérature a été effectuée afin d'identifier des documents scientifiques traitant d'exposition et d'utilisation de DCM, mais aussi de substitution de ce solvant. Pour ce faire, une recherche exhaustive dans les bases de données bibliographiques suivantes a permis d'identifier la plupart des articles scientifiques de première main et les rapports de recherche de la littérature dite « grise » : PubMed (Medline et Pubmed central)¹⁵, OVID (Embase)¹⁶, Toxline (Toxicology information online) du U.S. EPA¹⁷ et le Centre de service national pour les publications environnementales (National Service Center for Environmental Publications ou NSCEP)¹⁸. Les banques de données factuelles suivantes ont servi à recueillir certaines données physico-chimiques et autres paramètres et informations toxicologiques : répertoire toxicologique (Reptox) de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST)¹⁹, Centre d'information scientifique et technique de la CNESST²⁰, Agence européenne des produits chimiques²¹, PubChem²². De nombreux mots-clés, anglais et français, spécifiques à la substitution du DCM ont été utilisés tels que : dichlorométhane, chlorure de méthylène, exposition professionnelle, milieu de travail, substitution, alternative, remplacement.

La recherche de la littérature grise et de la littérature technique dans le réseau Internet a aussi été réalisée à l'aide du moteur de recherche généraliste Google incluant Google Scholar. Cette analyse a permis d'identifier des documents et rapports d'hygiène du travail rapportant l'utilisation du DCM comme ceux de la base de données du National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)²³, où il y a 124 rapports concernant le DCM, ou encore le rapport d'évaluation du risque de l'U.S. EPA qui présente de nombreux scénarios d'exposition professionnelle au DCM par inhalation (EPA, 2020).

Des banques d'études de cas, comme le site français portant sur la suppression ou la substitution des produits chimiques ou procédés dangereux, ont été consultées²⁴. Ce site identifie 25 fiches de substitution en fonction de différents secteurs d'activité où l'utilisation

¹⁵ <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>

¹⁶ <https://ovidsp.ovid.com/>

¹⁷ https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_Report.cfm?Lab=&dirEntryID=2794

¹⁸ <https://nepis.epa.gov>

¹⁹ <https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/Pages/repertoire-toxicologique.aspx>

²⁰ <https://www.centredoc.cnesst.gouv.qc.ca/centre-de-documentation-de-la-cnesst>

²¹ <https://echa.europa.eu/>

²² <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>

²³ <https://www2a.cdc.gov/hhe/search.asp>

²⁴ <https://www.inrs.fr/risques/chimiques/suppression-substitution-produits-chimiques-dangereux.html>

du DCM est reconnue ou suspectée²⁵, comme par exemple l'extraction d'arômes, des parfums, d'huiles essentielles et le décapage de façades/graffitis (INRS, 2010, 2012). D'autres fiches de substitution par utilisation ont aussi été utilisées pour identifier des options de remplacement au DCM (Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique [CITEPA], 2011; Chronopoulos *et al.*, 2020), dont 5 fiches produites par l'équipe de recherche en hygiène du travail de l'Université de Montréal (Bégin *et al.*, 2016a, 2016b, 2016c, 2016d, 2016e). Plusieurs cas de substitution ont été mis en place aux États-Unis entre 2005 et 2022²⁶. On y retrouve notamment les informations suivantes : nom du solvant original, nom du produit chimique substitutif, nom de l'entreprise où le remplacement a été réalisé, secteur industriel concerné, bref commentaire. Ces données sont issues du *Toxics Release Inventory (TRI) Program* de l'U.S. EPA.

Des échanges avec des fournisseurs, des utilisateurs et des gestionnaires ont permis d'identifier des utilisations du DCM ou de produits de remplacement au DCM. Les fiches de données de sécurité (FDS) des produits utilisés ont par la suite été analysées. Parmi les utilisateurs, tant des petites et moyennes entreprises (PME) que des grandes entreprises ont confirmé l'utilisation de ce type de produits en milieu de travail québécois, et ce, de manière quotidienne et fréquente. La recherche de la réglementation, des fabricants de solvants et de leur littérature technique sur le Web a aussi été réalisée. Les bases de données nationales de rejets de polluants ont également été consultées comme l'Inventaire national des rejets de polluants (INRP) du Canada²⁷ et l'Inventaire national des émissions (*National Emissions Inventory* ou NEI) de l'U.S. EPA²⁸.

2.2 Consultation de banques de données

Une évaluation de quatre banques de données d'exposition a permis de cibler les milieux de travail et titres d'emploi les plus préoccupants au regard de l'exposition au DCM. Cette analyse des banques de données a été effectuée en tenant compte des limites associées à l'interprétation de ce type de données.

Les données utilisées pour le présent projet proviennent en partie de la banque de données d'exposition professionnelle (BDEP) étatsunienne, résultant de la fusion de celle nommée *Integrated Management Information System (IMIS)* et du *OSHA Information*

²⁵ <https://www.inrs.fr/publications/bdd/far-fas.html>

²⁶ <https://www.epa.gov/toxics-release-inventory-tri-program/solvent-substitutions-reported-tri>

²⁷ <https://www.canada.ca/fr/services/environnement/pollution-gestion-dechets/inventaire-national-rejets-polluants.html>

²⁸ [https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/national-emissions-inventory-nei#:~:text=The%20National%20Emissions%20Inventory%20\(NEI,pollutants%20from%20air%20emissions%20sources](https://www.epa.gov/air-emissions-inventories/national-emissions-inventory-nei#:~:text=The%20National%20Emissions%20Inventory%20(NEI,pollutants%20from%20air%20emissions%20sources)

System (OIS)²⁹. Cette BDEP consigne les mesures d'exposition effectuées par les inspecteurs de l'OSHA depuis 1979 jusqu'à 2020 et les secteurs industriels sont identifiés avec le code d'activité économique SIC (*Standard Industrial Classification*) pour les données enregistrées dans IMIS et avec le *North American Industry Classification System* (NAICS) pour celles dans OIS³⁰. Afin d'uniformiser les 6 109 données pour le DCM avec un seul système de codage pour les secteurs industriels particuliers, 134 enregistrements ont été retirés. Parmi ces 134 enregistrements, quatre codes NAICS représentant 20 enregistrements ont été retirés car ils n'avaient pas d'équivalent de code SIC dans le tableau de correspondance, alors que 45 codes NAICS présents avaient de 2 à 8 correspondances en code SIC, pour un total de 114 enregistrements. L'analyse de cette banque de données permet de dresser un portrait des mesures effectuées aux États-Unis pour identifier les secteurs associés à des expositions élevées au DCM. Les valeurs d'exposition en mg/m³ ont été converties en ppm.

La base de données LIMS (*Laboratory Information Management System*) du système de gestion de l'information du laboratoire de l'IRSST contient des résultats d'analyse du Réseau de santé publique en santé au travail du Québec (RSPSAT)³¹. Plus précisément, les mesures contenues dans le LIMS sont des mesures effectuées grâce à des méthodes nécessitant une analyse en laboratoire, écartant ainsi les instruments à lecture directe (ILD) et les tubes colorimétriques. Des données y sont colligées depuis 1985 et sont classées selon le code de la Classification des activités économiques du Québec (CAEQ).

Une troisième base de données nord-américaine, la Base de données canadienne des expositions au travail (BDCET) gérée par CAREX Canada³², a également été interrogée. Les données compilées dans cette BDEP incluent uniquement les enregistrements associés aux substances cancérogènes de la *Canadian Workplace Exposure Database* (CWED)³³.

Une dernière BDEP a été consultée. L'outil de l'INRS, nommé « Exposition aux substances chimiques par situation de travail »³⁴, a fait l'objet d'une analyse. Les résultats fournis dans l'outil proviennent de mesures effectuées depuis 1987 par les Laboratoires

²⁹ La première banque nommée IMIS, a été en fonction entre 1979 et 2015. En 2011, OSHA a introduit un nouveau système nommé OIS. Entre les années 2011 et 2015, les informations sur les inspections réalisées par OSHA étaient enregistrées dans l'une des deux BDEP. Depuis 2015, seule la base OIS est utilisée (<https://wwwn.cdc.gov/eworld/Appendix/SourcesOfData>). Grâce à la loi américaine d'accès à l'information, *Freedom of Information Act* (FOI), l'équipe de Jérôme Lavoué a obtenu les informations contenues dans ces BDEP.

³⁰ La conversion entre les deux systèmes a été réalisée grâce à une table de conversion (de l'un à l'autre et vice-versa) préparée par l'équipe de Jérôme Lavoué.

³¹ <https://santeautravail.qc.ca/Accueil>

³² <https://www.carexcanada.ca/fr/fiches-sur-les-cancerogenes/>

³³ <https://cwed.spph.ubc.ca/>

³⁴ <https://outil-expo-rch-rb.inrs.fr/Outil110/Accueil>

Interrégionaux de Chimie (LIC) des caisses régionales d'assurance maladie et par les laboratoires de recherche de l'INRS. L'extraction de statistiques descriptives quant aux expositions professionnelles au DCM a été faite pour la période couvrant 1987 à 2022.

2.3 Évaluation des options de remplacement

2.3.1 Outils

Deux outils ont permis une analyse comparative des options de remplacement au DCM. Premièrement, le potentiel de surexposition de différentes options de remplacement de solvants a été évalué en calculant le rapport de danger de vapeur (indice « *Vapour Hazard Ratio* », VHR) tel que recommandé par Debia *et al.* (2009). Le VHR est une mesure sans unité qui informe sur le potentiel d'une substance à s'évaporer et à dépasser sa VLE. Cette mesure est utilisée pour comparer le potentiel de surexposition de différentes substances; l'annexe B présente la méthode de calcul ainsi qu'un tableau de VHR par solvant (Tableau 6).

Le deuxième outil utilisé pour évaluer le degré de vertitude des options de remplacement est P2OASys (*Pollution Prevention Option Analysis System*) produit par le Toxics Use Reduction Institute (TURI)³⁵. Cet outil a été développé pour aider les entreprises à déterminer si les options de remplacement qu'elles envisagent permettent d'améliorer leur processus existant en matière d'environnement, de santé et de sécurité. En utilisant P2OASys, des impacts négatifs imprévus sur l'environnement, les travailleuses et travailleurs ou sur la santé publique peuvent être identifiés avant l'adoption des modifications proposées (Bégin *et al.*, 2020). En utilisant à la fois des données quantitatives et des données qualitatives, l'outil peut évaluer chaque catégorie en fonction de critères selon des valeurs, des phrases clés, des classifications du Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits (SGH) et d'autres désignations d'agences gouvernementales. Les scores pour chaque critère, divisés jusqu'à 5 classes ou niveaux de sévérité, vont de 2 à 10, le score le plus bas étant le plus souhaitable. Les catégories, pour chacune desquelles des exemples de critères sont fournis à l'annexe C, sont :

- Effets aigus chez l'humain;
- Effets chroniques chez l'humain;
- Dangers écologiques;
- Dégradation environnementale et transport;
- Dangers atmosphériques;
- Propriétés physiques;
- Facteurs associés au processus;
- Facteurs associés au cycle de vie du produit.

³⁵<https://p2oasys.turi.org/About>

2.3.2 Étiquettes et certifications

Finalement, l'appartenance des solvants à différentes étiquettes a été utilisée afin de juger de la vertitude des options de remplacement, tel que décrit dans une publication antérieure de notre équipe de recherche sur les solvants verts (Bégin *et al.*, 2020). Ces étiquettes concernent l'une ou plusieurs des catégories suivantes: SST, efficacité du produit, environnement, contenu minimal en produits biosourcés. *Greensea*³⁶ garantit l'absence de substances cancérogènes, toxiques pour la reproduction et sensibilisants cutanés alors que *Greenguard* concerne la limite d'émissions de COV. Cette dernière est à la base des points *Leadership in Energy and Environmental Design* (LEED) accordés pour les fournitures de bureau à faible émission. L'étiquette UL ECOLOGO vise à identifier des produits permettant de réduire les impacts environnementaux. Six mille cent vingt-neuf produits possédaient l'étiquette environnementale ECOLOGO en 2023³⁷. ECOLOGO et *Greenguard* ont été achetées par la compagnie Underwriters Laboratories en 2010 et 2011 pour devenir les étiquettes UL ECOLOGO³⁸ et UL *Greenguard*³⁹ respectivement. Le programme *Safer Choice* de l'U.S. EPA⁴⁰ considère une liste de 105 solvants⁴¹ comme plus ou moins verts selon divers critères et classés selon un code de couleur⁴². *Safer Choice* évalue des préparations (*Safer Products*) et des ingrédients purs (*Safer Chemical*). Dans une publication antérieure (Bégin *et al.*, 2020), les produits certifiés *Green Seal*, *Safer Choice* et ECOLOGO ont été privilégiés pour un usage professionnel au Québec. Les différents solvants de remplacement à privilégier ont donc été analysés en regard du Programme *Safer Choice* dans le contexte de la monographie actuelle.

³⁶ <https://greenseal.org/splash/>

³⁷ <https://spot.ul.com/main-app/products/catalog/?keywords=>

³⁸ <https://www.ul.com/resources/ecologo-certification-program>

³⁹ <https://www.ul.com/services/ul-greenguard-certification>

⁴⁰ <https://www.epa.gov/saferchoice/learn-about-safer-choice-label>

⁴¹ <https://www.epa.gov/saferchoice/safer-ingredients> (cliquer sur l'élément *Solvents* dans la liste)

⁴² 1) Cercle vert : la substance est considérée comme peu préoccupante en se basant sur des données expérimentales et modélisées; 2) Cercle à moitié vert : la substance est probablement peu préoccupante en se basant sur des données expérimentales et modélisées. Cependant, des données supplémentaires renforceraient cette évaluation; 3) Triangle jaune : la substance a satisfait les critères d'évaluation de danger, mais comporte certains points préoccupants; 4) Carré gris : la substance est inacceptable comme ingrédient dans une préparation visant l'agrément du programme *Safer Choice*.

3. RÉSULTATS

3.1 Production et utilisation

3.1.1 Procédé de fabrication

La production du DCM s'accompagne de la production d'autres chlorohydrocarbures à un carbone soit le chlorométhane, le trichlorométhane (chloroforme) et le tétrachlorométhane (tétrachlorure de carbone). La séparation des hydrocarbures se fait ensuite par distillation pour produire le DCM. Le DCM n'est cependant pas fabriqué au Canada (Gouvernement du Canada, 2022a), il est donc importé⁴³.

Des stabilisants peuvent être ajoutés au DCM pour le protéger des effets de l'air et de l'humidité (Ohligschläger *et al.*, 2019; Rossberg *et al.*, 2005; Rossberg *et al.*, 2012). Selon le Reptox⁴⁴, les stabilisants les plus courants seraient l'éthanol (0,1 à 0,2 %), le méthanol (0,1 à 0,2 %), le cyclohexane (0,01 à 0,03 %) et l'amylène (0,001 à 0,01 %) (CNESST, 2005). Cette information est confirmée par la FDS de la compagnie Roth qui rapporte l'utilisation de l'amylène entre 0,002 et 0,006 % (poids) comme agent stabilisant pour son solvant « Dichlorométhane ROTIDRY®Sept ≥ 99,9 % (≤ 50 ppm H₂O) » (Carl Roth, 2021). Le Reptox rapporte aussi que dans les domaines alimentaire et pharmaceutique, le DCM utilisé comme solvant d'extraction est de qualité technique pur à plus de 99,99 %. La compagnie Sigma Aldrich rapporte ainsi pour le produit commercial « Dichlorométhane pour analyse EMSURE® ACS, ISO, Reag. Ph Eur » commercialisé en Ontario, une concentration de DCM de près de 100 % (poids) (Sigma-Aldrich Canada LTD, 2023).

3.1.2 Utilisation

Le DCM est principalement utilisé dans les décapants à peinture, mais il est aussi employé comme composant de préparations dégraissantes et de revêtements, composant d'aérosols (comme agent anti-projections, dégraissant ou insecticide), solvant dans la synthèse de produits pharmaceutiques, comme composant des colles (pour le plastique ou le caoutchouc), comme solvant pour le soudage des plastiques et comme solvant pour l'extraction (Bégin *et al.*, 2016b, 2016d; Bertrand et Clerc, 2011; INERIS, 2015; Jargot, 2006; Triolet, 2005; Troughton, 2008). Ainsi, on peut le retrouver dans des domaines aussi variés que la rénovation de cuisine, la fabrication de jouets ou d'équipements de sports jusqu'à la fabrication de plâtre médical, en passant par les agents réfrigérants et le nettoyage d'imprimantes (IARC, 2016). Il serait également un des solvants les plus utilisés

⁴³ Pour voir les principaux importateurs de DCM dans notre pays en 2021 : <https://www.ic.gc.ca/app/scr/ic/sbms/cid/productReport.html?hsCode=290312>.

⁴⁴ https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/pages/fiche-complete.aspx?no_produit=2899

en laboratoire⁴⁵. Selon Knox *et al.* (2023), le DCM est encore très présent dans des préparations utilisées en milieu de travail, mais également par les consommateurs en général, dont les cosmétiques et les lampes domestiques⁴⁶ pour lesquels aucune FDS n'est disponible.

Les rejets du DCM dans l'environnement ont été documentés par secteur d'activité dans l'INRP du Gouvernement du Canada (Environnement Canada, 1998; Environnement et Changement climatique Canada, 2020). Les quantités d'utilisation du DCM rapportées étaient de 7400 tonnes en 1995 et les plus grands utilisateurs étaient les secteurs du gonflement de la mousse de polyuréthane (1300 tonnes), de décapants pour peintures (1200 tonnes), du décapage commercial de meubles (1000 tonnes), de produits de nettoyage pour traitement des plastiques (600 tonnes) et de produits pharmaceutiques (600 tonnes), pour un total de 6300 tonnes rejetées dans l'environnement (Environnement Canada, 1998). En 2022, les secteurs déclarant rejeter le plus de DCM dans l'air étaient l'industrie du bois (13,33 tonnes), l'industrie pharmaceutique (7,51 tonnes) et l'industrie des déchets (3,39 tonnes) pour un total de 28,94 tonnes (Gouvernement du Canada, 2023). Selon l'INRP, le fabricant d'armoires de cuisine Kitchen Craft à Winnipeg, Manitoba, a émis dans l'air extérieur 12,9 tonnes de DCM en 2022 (Gouvernement du Canada, 2023).

Aux États-Unis en 2020, les deux plus grands émetteurs de DCM étaient deux producteurs manufacturiers de produits chimiques, incluant des ingrédients pharmaceutiques, avec 197,3 et 165,5 tonnes déclarées. Alors que le total d'émissions de DCM déclarées est de 2048,7 tonnes pour 8291 entreprises, ces deux seules entreprises représentent à elles seules plus de 17 % des émissions de DCM.

L'U.S. EPA estime que 5000 entreprises étasuniennes œuvrant dans la rénovation de meubles, pour la plupart de petite envergure, utilisent encore du DCM comme décapant. Bien que la quantité de DCM qui est utilisée varie beaucoup entre les entreprises, la moyenne se situe autour de 55 gallons aux 2 mois, ce qui correspond à 2,3 millions de gallons utilisés chaque année (*Methylene chloride; Regulation under Section 6(a) of the Toxic Substances Control Act (TSCA)*, 88 Fed. Reg., 28284 (3 mai 2023)).

En 2014 en France, 47 % des émissions industrielles de DCM dans l'air étaient attribuables à l'industrie pharmaceutique pour un total de 374 tonnes pour ce secteur d'activités (INERIS, 2015). L'industrie chimique et la fabrication de textile venaient en seconde et troisième place avec 22,6 et 11 % respectivement.

⁴⁵ <https://www.labmanager.com/how-to-handle-methylene-chloride-793>

⁴⁶ <https://www.poisson.org/articles/bubble-lights-the-hazards-of-nostalgia>

Selon ECHA⁴⁷, de 100 000 à 1 000 000 de tonnes de DCM seraient produites en Europe chaque année. Le site Web SPIN⁴⁸ rapporte les statistiques d'utilisation du DCM dans les pays nordiques comme la Norvège, la Finlande, la Suède et le Danemark de 2000 à 2022. On rapporte notamment que la Finlande a utilisé 584,1 tonnes métriques de DCM en 2019, une baisse par rapport à 2018 où elle employait 639,5 tonnes, mais en forte augmentation par rapport à 2017 où 103,6 tonnes étaient utilisées. La Norvège, est le pays qui utilise le moins de DCM (sauf pour 2021 et 2022) avec 17,6 tonnes en 2022, 10,0 tonnes en 2021, 8,8 tonnes en 2020, 10,1 tonnes en 2019 et 12,1 tonnes en 2018. Elle est suivie du Danemark : 9,1 tonnes en 2022, 8,3 tonnes en 2021; 41,9 tonnes en 2020; 42,3 tonnes en 2019; 29,0 tonnes en 2018. Dans le site Web SPIN, il est aussi possible d'obtenir des données sur les grandes branches industrielles où le DCM est utilisé⁴⁹. Ainsi, on constate que la Suède a utilisé 16,0 tonnes de DCM en 2021 pour la fabrication de produits pharmaceutiques de base et de préparations pharmaceutiques alors que le Danemark a utilisé 31,9 tonnes de DCM pour la fabrication de substances chimiques et de produits chimiques en 2020. En 2017 en Finlande, les secteurs d'activités qui rapportaient l'utilisation de DCM étaient par ordre d'importance : la fabrication de substances chimiques et de produits chimiques (68,8 tonnes), la fabrication de produits pharmaceutiques de base et de préparations pharmaceutiques (21,6 tonnes), le commerce de détails et la réparation d'automobiles et de motocyclettes (10,4 tonnes), la réparation et l'installation de machines et d'équipements (4,8 tonnes).

3.1.3 Secteurs d'activités

La section suivante présente des exemples concrets d'utilisation du DCM par secteur d'activité ou par utilisation. La catégorisation utilisée est basée sur un recoupement fait entre les classements de l'U.S. EPA (*Methylene chloride: Revision to Toxic Substances Control Act (TSCA) risk determination; Notice of availability*, 87 Fed. Reg., 67901 (10 novembre 2022) et de l'INERIS (2015), mais également sur les codes du Système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN)⁵⁰.

3.1.3.1 Décapants (peinture, vernis, encre, adhésif et joint)

Le décapage est une opération nécessaire pour la réfection de différents objets. De nombreuses utilisations du DCM pour décaper des baignoires, des graffitis ou encore des meubles en bois sont rapportées dans la littérature (Bégin *et al.*, 2016b, 2016c, 2016d). Comme décapant pour encre, peinture et vernis, le DCM assure un décapage efficace et

⁴⁷ <https://echa.europa.eu/fr/registration-dossier/-/registered-dossier/15182/1/2>

⁴⁸ SPIN - *Substances in Preparations in Nordic Countries. Nordic Product Registers of Norway, Sweden, Denmark and Finland* : <http://spin2000.net/>

⁴⁹ Voir NACE pour *Nomenclature of Economic Activities*

⁵⁰ https://www23.statcan.gc.ca/imdb/p3VD_f.pl?Function=getVD&TVD=1181553

rapide en agissant directement sur l'adhérence entre le fini et le sujet⁵¹. Le revêtement peut alors être facilement éliminé par la suite (Jargot, 2006). Le décapant est généralement appliqué à la main ou par un système de dispersion directement sur le fini. Dans certaines situations comme pour le décapage des meubles en bois, le décapant peut être versé dans une cuve munie d'un système de recirculation (Bégin *et al.*, 2016d). Lors de l'utilisation de décapants contenant du DCM pour enlever des graffitis, les travailleuses et travailleurs sont aussi exposés à d'autres solvants comme la N-méthyl-2-pyrrolidone (NMP), des éthers de glycol et des hydrocarbures aromatiques (Anundi *et al.*, 1993). Un décapant connu et vendu au Québec est le Circa 1850, décapant à meubles contenant 85-95 % de DCM (Swing Paints, 2018a).

Selon l'INERIS (2015), « au début des années 2000 une application spécifique de solvants au DCM était le décapage de tôles, notamment de tôles automobiles présentant des défauts de peinture et qui devaient être décapées puis repeintes, ou le décapage des peintures d'avions ». Le Health and Safety Executive rapportait en septembre 2023 qu'une entreprise de remise à neuf de jantes en alliage au Royaume-Uni a reçu une amende de 80 000 £ (137 106 \$ CA)⁵². La faute concernait l'utilisation d'un décapant à base de DCM et d'acide fluorhydrique en l'absence de mesures de prévention appropriées quant à la ventilation, aux EPI et à la formation. Ce genre de décapant existe également en Amérique du Nord, par exemple le B17 de Benco⁵³ (Benco, s.d.).

Spécifiquement pour le domaine de l'aviation, une entreprise québécoise propose sur son site Web⁵⁴ le Cee-Bee® A-202, un décapant à base de DCM et de phénol (Laboratoire R&D de Solutions GTR, 2023). Selon le bulletin technique, « CEE-BEE® STRIPPER A-202 est un décapant visqueux à base de chlorure de méthylène (DCM), de phénol et d'acide pour les peintures résistantes telles que le polyuréthane, les époxydes, l'extérieur des avions incluant les couches de base et apprêts » (Solutions chimiques Deaneco, 2020). Toujours dans le domaine aérospatial, des décapants à base de DCM servent également à retirer des scellants à base de polysulfure et de polythioéther (Morose *et al.*, 2014).

Plusieurs produits décrits comme des décapants à joints contiennent du DCM en forte proportion. La compagnie Henkel propose un produit avec 60 à 80 % de DCM (Henkel Canada Corporation, 2022) alors que le décapant de la compagnie Permatex contient de

⁵¹ « Surface de bois ou d'un produit dérivé du bois sur laquelle on applique une couche de produit de finition » (https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/2083117/subjectile?utm_campaign=Redirection%20des%20anciens%20outils&utm_content=id_fiche%3D2083117&utm_source=GDT).

⁵² <https://web.archive.org/web/20240420140122/https://press.hse.gov.uk/2023/09/27/alloy-wheel-refurbishment-firm-fined-80000-for-failing-to-protect-its-workers/>

⁵³ <https://www.bencosales.com/products/p/benco-b14-6hemb-twxy>

⁵⁴ <https://www.solutionsgtr.ca/fr/produits-deaneco/cee-bee-a-202-1.html#ex2677>

40 à 70 % de DCM (ITW Permatex Canada, 2015). Des alcools et des hydrocarbures sont additionnés au DCM. Le premier exemple est sous forme d'aérosol et permet de retirer les joints et les scellants sur des surfaces métalliques⁵⁵.

Un exemple de décapant à adhésif, largement disponible au Québec^{56,57}, est le décolleur intelligent. Selon sa FDS, il contient de 60 à 100 % de DCM (Kosmic Surf-Pro Inc., 2021). Puisqu'il est encore possible que des décapants contenant du DCM soient largement distribués dans les quincailleries de grande surface, il est probable que des PME et des travailleuses et travailleurs indépendants s'y approvisionnent pour accomplir par exemple des travaux d'enlèvement de colle à plancher.

3.1.3.2 Nettoyants et dégraissants

Le DCM est utilisé pour nettoyer différentes pièces métalliques, par exemple les freins et les carburateurs d'automobiles, de salissures comme des graisses et des huiles. Il présente l'avantage de dégraisser « à froid » sans autres actions comme chauffer, frotter ou agiter. Par exemple, le fabricant Berryman propose un nettoyant à freins contenant 60 à 70 % de DCM (Berryman Products, 2015a). Selon le fabricant, le nettoyant élimine sans effort le liquide de frein, la graisse, l'huile et d'autres contaminants de toutes les pièces de frein. La formule ininflammable à séchage rapide ne laisserait aucun résidu. Le même fabricant propose aussi d'autres nettoyants pour l'industrie automobile comme un nettoyant de pièces de carburateur contenant de 30 à 40 % de DCM (Berryman Products, 2020). Selon le fabricant, ce nettoyant est très efficace pour les pièces de carburateur et agit par simple immersion dans le liquide en 15 à 30 minutes. À noter que les deux nettoyants du fabricant Berryman contiennent d'autres substances toxiques, notamment le toluène ou le PERC. Le fabricant Kleen-Flo Tumbler Limitée propose aussi un nettoyant de pièces de carburateur contenant de 15 à 40 % de DCM et dans lequel on retrouve aussi plusieurs substances dont du o-Crésol (n° CAS 95-48-7), du xylène, isomères mixtes, purs (n° CAS 1330-20-7), du 2-butoxyéthanol (2-BE, n° CAS 111-76-2), du 1,2-dichlorobenzène (n° CAS 95-50-1), du phénol (n° CAS 108-95-2), de l'éthylbenzène (n° CAS 100-41-4) et du méthanol (n° CAS 67-56-1) (Les Entreprises Kleen-Flo Tumbler Limitée, 2016).

Certains produits nettoyants contenant du DCM sont spécialisés pour traiter les courroies (Les Entreprises Kleen-Flo Tumbler Limitée, 2017c). Par le passé, le DCM a aussi été utilisé pour le nettoyage des outils et récipients ayant servi à l'application de résine (INRS, 2006) et au nettoyage et dégraissage de plastiques particuliers (aminoplastes, phénoplastes, polyoxyméthylène), mais dans une moindre mesure que pour les métaux

⁵⁵ https://www.henkel-adhesives.com/ca/fr/produit/general-industrial-cleaners/loctite_sf_7900.html

⁵⁶ <https://www.canac.ca/fr/decapant-a-colle-le-decolleur-945-ml-55001304>

⁵⁷ <https://www.bmr.ca/fr/surf-pro-gel-le-decolleur-945-ml-027-0274.html?queryID=8def85e90c0a474dcccc202372287924>

(INERIS, 2015). Toujours selon l'INERIS (2015), le DCM a aussi été utilisé de façon marginale comme détachant pour textiles techniques et industriels.

3.1.3.3 Dégrippants/lubrifiants

Des dégriffants servent à débloquer une pièce ou un organe mécanique en faisant cesser le frottement et la dilatation des surfaces métalliques mal lubrifiées. Les produits identifiés dans cette catégorie et qui contenaient du DCM ne sont plus disponibles aujourd'hui. La FDS d'un lubrifiant, utilisé par le passé sous forme d'aérosol et nommé M-55, indique que ce produit contenait entre 10 et 30 % de DCM ainsi que de 40 à 80 % de distillat paraffinique de pétrole (n°CAS 64742-65-0) (K-G Spray-Pak inc., 2014). D'autres dégriffants conditionnés en bombe aérosol contenaient en 2018, du DCM (40 à 70 %) et du PERC (15 à 40 %) (Jig-A-Loo, 2018). Un autre exemple de dégriffant contenant entre 50 à 100 % de DCM (Orapi, 2017a) a été remplacé par une nouvelle formulation.

Un autre lubrifiant, sous forme de bombe aérosol fabriqué par la compagnie ontarienne Kleen-Flow Tumbler (Brampton, ON), contenait 15-40 % de DCM, mais aussi du n-hexane et du toluène (Kleen-Flo Tumbler Ind Limited, 2017). Ce produit était notamment distribué au Canada par Pièces d'auto Super⁵⁸ et National Automotive Parts Association (NAPA)⁵⁹, très connus des mécaniciens d'automobiles. Cependant, ce produit n'est plus disponible chez les deux distributeurs.

3.1.3.4 Composantes de colles, d'adhésifs et de calfeutrants (« scellants » à joint)

Les colles contenant du DCM sont utilisées pour coller différentes pièces, objets en mousses de polyuréthane, plastiques, tissus et textiles (Bégin *et al.*, 2016a; EPA, 2020). Des colles à base de DCM étaient utilisées dans l'industrie du cuir au Québec d'après Collot (1998). Trois colles en particulier (63-245, 80025-01, C-8137-4) ont été identifiées comme principale source d'exposition au DCM ; elles contenaient de 60 à 100 % de DCM. L'application de colle se faisait de différentes façons : passage de morceaux de cuir dans des rouleaux enduits de colle et étendage de la colle avec les doigts (produit 63-245), collage de talon à l'aide d'un pinceau (produit C-8137-4) et application de colle au rouleau (produit 80025-01).

Les fabricants de mousse flexible en polyuréthane et les fabricants de meubles et autres objets rembourrés doivent coller différentes pièces en mousse entre elles ou à d'autres matériaux tels que du tissu d'ameublement ou du bois. Les colleurs utilisent des pistolets à air comprimé pour pulvériser la colle sur les objets à assembler. Ils peuvent alors être fortement exposés aux solvants contenus dans les adhésifs. Le fabricant Camie propose une colle contenant de 80 à 90 % de DCM pour ce type d'application (Camie-Campbell,

⁵⁸ <https://pasuper.com/piece/kleen-flo/gasket-prep-cleaner/465>

⁵⁹ <https://carrefourindustrielldg.com/pulverisateur-pour-garnitures-de-joint>

2015). Selon le fabricant, la colle offre une prise rapide et une adhérence forte pour fixer la mousse d'uréthane, le tissu et le papier à eux-mêmes ou sur du métal ou du bois. Il semble que l'adhésif Camie 313B soit encore disponible sur le marché étatsunien. Le site Web⁶⁰ liste cet adhésif dans son catalogue qui a été publié en 2020 (la société PLZ a racheté la marque Camie-Campbell)⁶¹. Un autre exemple de ce type de colle documenté au Québec est la colle S1800-5PINK, qui contient de 60 à 80 % de DCM selon la FDS (Tri-Tex Co Inc., 2019).

Le DCM est aussi utilisé comme calfeutrant ou pour l'étanchéification. Par exemple, le produit Loctite MR 5009 hi-tack gasket sealant (Henkel Canada Corporation, 2021a), un scellant à joints, contenait du DCM (10-30 %) jusqu'en 2021. Un autre scellant, plutôt utilisé pour éviter les fuites dans les conduits d'aspiration, était composé de 30 à 60 % de TCE et de 15 à 30 % de DCM (Space Environment Labs. - Vacseal Inc., 2020).

3.1.3.5 Soudage et cimentation au solvant

Le soudage au solvant fait référence à un processus dans lequel un solvant ou un mélange de solvants sans solution polymère est utilisé pour assembler deux pièces de thermoplastiques. Plus précisément, le DCM fait fondre chimiquement le plastique. Pour sa part, la cimentation au solvant fait référence à un processus dans lequel le solvant ou le mélange de solvants utilisé pour créer le joint contient du polymère dissous. Le soudage et la cimentation au solvant sont utilisés pour diverses tâches d'assemblage de thermoplastique comme dans l'industrie des jouets, en tuyauterie, plomberie, fabrication d'objets en acrylique ou en polycarbonate comme des vitrines et des boîtes à gants (Desai, 2003; Troughton, 2008). Le soudage avec le DCM permettrait d'assembler des plastiques comme l'acrylique, le polystyrène, le polysulfone et l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS). La compagnie IPS Corporation propose ainsi un mélange de solvants contenant de 75 à 90 % de DCM, accompagné de TCE et de méthacrylate de méthyle, pour relier solidement des feuilles d'acrylique ou de plexiglass entre elles (IPS Corporation, 2020). Pour sa part, la compagnie Rema Tip Top propose plutôt un mélange de DCM (60-85 %) et d'isocyanates (20-30 %) (Rema Tip Top AG, 2022). Celui-ci peut être utilisé pour lier 2 pièces de caoutchouc⁶² (réparation de pneus ou de tapis de convoyeurs par exemple).

L'INERIS (2015) indique que le DCM serait utilisé pour assembler des objets en altuglasTM (polyméthacrylate de méthyle acrylique ou plexiglass) coulé (vitrage, enseigne, pare-brise, hublots, mobilier, pare-douche, garde-corps, écran anti-bruit, décoration, etc.), altuglasTM extrudé (mobilier urbain, enseigne, tube de niveau, entretoise, décoration, luminaires, etc.) et en polystyrène choc (signalétique, maquette, thermoformage (sauf miroir),

⁶⁰ <https://www.plzcorp.com/camie/>

⁶¹ <https://www.plzcorp.com/about-us/our-history/>

⁶² <https://www.alltiresupply.com/en-ca/products/rema-utr-20-hardener-for-sc2000-cement>

décoration). La colle à base de DCM pur est encore disponible en France pour ces 3 matériaux^{63,64}.

3.1.3.6 Revêtements et peintures

Le DCM est présent dans certaines peintures, encres ou vernis en tant que solvant/diluant (Les Entreprises Kleen-Flo Tumbler Limitée, 2017b). En France en 2005, cette utilisation aurait représenté environ 20 % des usages selon l'industrie (INERIS, 2015). » Le DCM est également utilisé comme solvant ou agent propulseur (dans les préparations sous forme d'aérosol) afin de faciliter l'application de peintures et revêtements (IARC, 2016). Certains revêtements utilisés dans l'industrie de la climatisation/réfrigération ou de la construction pour l'isolation des tuyaux froids contiennent également du DCM sous forme d'aérosol (EPA, 2020).

3.1.3.7 Préparations anti-projections en soudage métallique (anti-adhérents)

L'un des problèmes à prendre en compte dans le travail de soudage sur métal est la projection de métal fondu (*spatter*). Weman (2003) passe en revue les paramètres, p. ex. le voltage et le choix du gaz protecteur agissant sur la quantité de métal fondu projetée, pour les procédés de soudage par fusion. Plusieurs fabricants proposent des substances que le soudeur applique sur le métal à souder pour éviter que les projections de métal fondu n'adhèrent au métal. Certaines préparations, conditionnées en bombes aérosol, contiennent une forte teneur en DCM allant de 50 à 100 % de DCM (Linde Canada, 2022; Orapi, 2017b; Techniweld Corporation, 2019). Il est important de signaler que la combustion du DCM peut générer du chlorure d'hydrogène et du phosgène (Colonna, 2010). Le DCM serait cependant moins propice à former du phosgène que d'autres produits chlorés comme le tétrachlorure de carbone ou le TCE (Nieuwenhuizen et Groeneveld, 2000). Également, tel qu'expliqué par l'industrie, « le produit anti-adhérent pour les grattons de soudure permet de prolonger sensiblement la durée de vie des pièces d'usure et facilite le nettoyage » (Team Binzel, 2020).

3.1.3.8 Industries pharmaceutiques

Le DCM est utilisé comme milieu réactionnel dans la synthèse de produits pharmaceutiques ou encore comme solvant dans la fabrication des revêtements de pilules (Rullman, 2015; Zaid, 2020). L'INERIS (2015) rapporte trois principaux emplois pour le DCM dans cette industrie : solvant d'extraction, solvant de procédé et agent d'enrobage.

L'utilisation du DCM est notamment rapportée dans la synthèse du topotécan, un antinéoplasique de la classe des camptothécines (Sittig, 2007).

⁶³ <https://abaqueplast.fr/304--colle-a-solvant-dichloromethane>

⁶⁴ <https://abaqueplast.fr/le-collage/260-dichloromethane-colle-a-solvant-1-litre.html>

Certaines entreprises pharmaceutiques utilisent du DCM très concentré (> 99.5 %) comme solvant lors de techniques classiques de microencapsulation (coacervation⁶⁵, émulsion-évaporation)⁶⁶. D'autres entreprises pharmaceutiques⁶⁷ utilisent du DCM (> 99.5 %) dans une procédure d'analyse du gras selon la pharmacopée européenne (European Pharmacopoeia, 2020). Cette technique est utilisée à des fins de contrôle qualité et permet de détecter la présence d'impuretés, par la migration du solvant sur une plaque de silice.

Le DCM a été utilisé afin d'analyser une formulation d'aspirine et de métoclopramide, un médicament contre les migraines, avec une technique de chromatographie sur couche mince à haute performance. La phase mobile consistait en un mélange de cyclohexane, méthanol et DCM (1:4:1, v/v/v) (El-Maraghy, 2023). Un autre exemple est le contrôle qualité d'extraits de canneberges, pour lequel la phase mobile consistait en un mélange de DCM, d'acétate d'éthyle et d'acide formique selon le ratio suivant 6:10:1 (v/v/v) (Boudesocque *et al.*, 2013).

Le principe de substitution a été mis en œuvre chez Pfizer, car la molécule du ViagraTM n'est plus synthétisée en utilisant le DCM, alors qu'elle l'a déjà été par le passé (Dunn *et al.*, 2004).

3.1.3.9 Extraction d'arômes, des parfums, des huiles essentielles et de composés organiques (alimentation, industrie pétrolière)

Selon l'INRS (2010), le DCM est utilisé pour extraire des arômes, des parfums, des huiles essentielles et des composés organiques. Il peut donc être utilisé en agroalimentaire mais également pour la production de cosmétiques (Gouvernement du Canada, 2022b; INERIS, 2015).

On rapporte plus spécifiquement son utilisation à des fins agricoles et de transformation des aliments, comme solvant d'extraction pour les oléorésines d'épices et de houblon et pour l'élimination de la caféine des grains de café et des feuilles de thé (Gouvernement du Canada, 2022c). Cependant, en 1991, l'OSHA indiquait que le DCM n'était plus utilisé aux États-Unis pour la décaféination du café. L'INERIS (2015) rapportait pour sa part que la décaféination par le DCM aurait été arrêtée avant 2006 en France. De ce côté-ci de l'Atlantique, bien que le procédé utilisant le DCM tende à être remplacé par d'autres⁶⁸, le fabricant Qusac decaf (Valleyfield, QC) utilise toujours, en 2024, du DCM combiné avec

⁶⁵ Phénomène de séparation en deux phases de certaines solutions macromoléculaires.

⁶⁶ Anonyme, communication personnelle, 20 avril 2023.

⁶⁷ Anonyme, communication personnelle, 10 mai 2023.

⁶⁸ https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/pages/fiche-complete.aspx?no_produit=2899

de l'eau dans son procédé de fabrication de son café décaféiné⁶⁹. Même si le DCM employé comme solvant d'extraction de la caféine est utilisé en circuit fermé, il est toujours possible que des travailleuses et travailleurs soient exposés à ce solvant chloré lors de sa manipulation.

3.1.3.10 Analyses environnementales

De nombreuses techniques de chromatographie sur colonne sont réalisées avec du DCM afin de déterminer le contenu d'un échantillon. Le DCM est ainsi utilisé comme phase mobile en chromatographie en phase liquide. La compagnie Millipore Sigma propose du DCM pur à près de 100% pour des applications dans ce type de chromatographie (Millipore Sigma, 2023).

Le DCM est utilisé comme solvant d'extraction et de désorption des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et des hydrocarbures pétroliers (C10 à C50) en dosage par chromatographie en phase gazeuse par le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ) du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (Gouvernement du Québec) (CEAEQ, 2016a, 2022) et par le NIOSH (2021). Selon les méthodes analytiques du CEAEQ, le DCM serait aussi utilisé pour le dosage de différents pesticides (pesticides aryloxyacides, pesticides organochlorés, pesticides de type organophosphoré, triazine, carbamate et urée substituée) (CEAEQ, 2013b, 2013c, 2016b) et pour les composés organiques semi-volatils dans l'eau et les sols, les composés phénoliques, les acides gras et résiniques (CEAEQ, 2007), les alkylphénols dans les eaux usées (CEAEQ, 2012), les chlorobenzènes (CEAEQ, 2013a) et les biphényles polychlorés (CEAEQ, 2015). Dans ces différents protocoles, la chromatographie en phase gazeuse est parfois couplée à un spectromètre de masse (CEAEQ, 2016b, 2022), parfois à un détecteur à ionisation de flamme (CEAEQ, 2016a). Voici un exemple d'utilisation du DCM en chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse : « La détermination de la concentration des acides gras et résiniques s'effectue en deux étapes. Dans la première étape, les acides gras et résiniques sont extraits à l'aide de dichlorométhane, puis concentrés. Les acides sont ensuite dérivés à l'aide du N-O-bis-triméthylsilyl trifluoroacétamide (« BSTFA ») pour obtenir des esters triméthylsilylés. Dans la seconde étape, les esters triméthylsilylés sont analysés par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse (CG-SM) en mode d'acquisition d'ions sélectifs (« SIM »). La concentration des acides gras et résiniques présents dans l'échantillon est déterminée par comparaison des surfaces chromatographiques obtenues à un temps de rétention donné avec les surfaces des étalons ayant servis à établir la courbe d'étalonnage dans les mêmes conditions de dosage. » (CEAEQ, 2007).

⁶⁹ <http://www.dfeprocess.com/pages/myths-and-facts/#q-1>

Plusieurs articles scientifiques publiés rapportent l'utilisation du DCM dans leurs méthodes d'analyses environnementales ou d'échantillons organiques (Chen, G. L. *et al.*, 2023; Marek *et al.*, 2017; Shinyashiki *et al.*, 2009; Yuan *et al.*, 2020).

Selon le Risk & Policy Analysts Limited (2007), une partie du DCM pur, vendu à titre de solvant pour la manufacture de produits pharmaceutiques, est recyclée et réutilisée dans le secteur du décapage. Ainsi, un fournisseur québécois revend du DCM recyclé, pur à 98 % selon la fiche technique (Veolia, 2018).

3.1.3.11 Synthèse chimique

Le DCM est utilisé en grand volume dans la synthèse chimique à titre d'intermédiaire, que ce soit dans le secteur de l'agriculture (pesticides et engrais), de la réfrigération/climatisation ou d'autres produits chimiques. Le DCM est notamment utilisé pour la manufacture de produits pharmaceutiques et pétroliers (huile de base⁷⁰, plastiques, polycarbonates, caoutchouc,)⁷¹ (INERIS, 2015; *Methylene chloride: Revision to Toxic Substances Control Act (TSCA) risk determination; Notice of availability*, 87 Fed. Reg., 67901 (10 novembre 2022)). Le DCM serait aussi utilisé dans la production de résines polycarbonates et de fibres synthétiques ou de cellulose servant dans l'industrie des pâtes et papiers et à la fabrication de films photographiques (EPA, 2020; IARC, 2016; INERIS, 2015)⁷²; selon le registre américain de rejets de polluants, Kodak a d'ailleurs déclaré rejeter du DCM en 2020⁷³.

Le DCM aurait aussi déjà été utilisé pour produire des esters de cellulose, du triacétate et des esters de triacétate; en 2007, ces 3 composés comptaient pour 10 % des intermédiaires de synthèse en Europe (INERIS, 2015). Le DCM serait également utilisé pour la fabrication de polyuréthane (Fairfax et Porter, 2006) comme agent soufflant ou d'expansion de la mousse^{74,75} (CNESST, 2005) ainsi que pour la fabrication de produits de plastiques incluant des jouets, des surfaces de jeux et de l'équipement sportif (EPA, 2020)⁷⁶. Un autre exemple de synthèse chimique dans lequel du DCM est mis en œuvre est le procédé de la société BSN Médical à Vibraye (Pays de la Loire, France) qui

⁷⁰ <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/substances-chimiques/fiches-renseignements/en-bref/huiles-base.html>

⁷¹ <https://www.americanchemistry.com/content/download/11270/file/Critical-Chemistries-in-Automobile-Manufacturing-and-Maintenance-July2023.pdf>

⁷² <https://www.chlorinated-solvents.eu/products/methylene-chloride-dcm/>

⁷³ <https://www.reliableplant.com/Read/5091/eastman-kodak-reduces-methylene-chloride-emissions->

⁷⁴ <https://gost.tpsgc-pwgsc.gc.ca/Contfs.aspx?ID=14&lang=fra>

⁷⁵ <https://www.chlorinated-solvents.eu/products/methylene-chloride-dcm/>

⁷⁶ <https://highschoolenergy.acs.org/what-is-energy/drinking-bird.html#:~:text=Inside%2C%20the%20drinking%20bird%20is,bonds%20in%20the%20liquid%20state>

fabrique des bandes plâtrées (INERIS, 2015); 700 kg de DCM par heure s'évapore dans ce procédé de production⁷⁷.

Selon l'INERIS (2015), l'utilisation du DCM, comme solvant dans lequel se déroule généralement la polymérisation des polycarbonates, serait importante. On peut mentionner entre autres la manufacture de pneus⁷⁸ (Huang, H. *et al.*, 2022), domaine dans lequel certains fabricants américains (Michelin et Goodyear) déclaraient d'ailleurs rejeter quelques tonnes de DCM en 2020 selon le NEI. Selon la même source, l'entreprise forestière productrice de pâtes et papiers Resolute FP US Inc. déclarait rejeter du DCM en 2020, alors que sa filiale canadienne à Lebel-sur-Quévillon n'en déclarait pas en 2022⁷⁹.

Le gaz réfrigérant 410 utilisé dans les unités de climatisation est composé de 50 % de difluorométhane (CAS 75-10-5) dénommé HFC 32 ou R-32 (Gas-Servei, 2019). La synthèse chimique du difluorométhane (et anciennement du bromochlorométhane pour cette utilisation) se fait à partir de la déchlorofluorination du DCM (IARC, 2016; INERIS, 2015; Minor, 2014; Siegemund *et al.*, 2012). Cependant, l'utilisation dans ce cadre tend à disparaître étant donné la réglementation concernant les substances appauvrissant la couche d'ozone qui s'est mise en place ces dernières années (*Règlement de la Commission n° 2037/2000*, 2000 J. O. (L 244), 1-24; *Règlement sur les substances appauvrissant la couche d'ozone et les halocarbures de remplacement*, DORS/2016-137 (Gaz. Can. II)).

Le DCM aurait déjà été utilisé comme adjuvant de fongicide ou d'insecticide en France en 2006 (INERIS, 2015), mais il ne fait plus partie de la base de données « e-phy », catalogue des produits phytopharmaceutiques et de leurs usages, des matières fertilisantes et des supports de culture homologués en France⁸⁰. Le DCM a été substitué comme constituant de pesticides (Koinecke *et al.*, 1994). Au Canada, il n'aurait jamais été enregistré comme pesticide autorisé, mais aurait été utilisé comme insecticide fumigant dans d'autres juridictions (Environnement Canada et Santé Canada, 1993) comme aux États-Unis, spécifiquement comme fumigant post-récolte pour les céréales et les fraises, mais aussi pour le déverdisage des agrumes (EPA, 2020; Preisser *et al.*, 2011).

3.1.3.12 Dentisterie

Plusieurs articles rapportent l'utilisation du DCM dans ce secteur. Le DCM peut être utilisé en association avec du méthacrylate de méthyle pour la fabrication de prothèses dentaires (CNESST, 2024; INERIS, 2011). Il peut également être utilisé comme traitement

⁷⁷ https://www.paysdelaloire.prse.fr/IMG/pdf/bsn_reductiod4c1.pdf

⁷⁸ https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-06/documents/fact_sheet_rubber_tire_rtr_final.pdf

⁷⁹ <https://www.canada.ca/fr/services/environnement/pollution-gestion-dechets/inventaire-national-rejets-polluants.html>

⁸⁰ <https://ephy.anses.fr/>

de surface afin de faciliter l'adhésion des dents à la résine de base d'une prothèse dentaire (Jain *et al.*, 2014; Shimizu et Takahashi, 2012; Vuorinen *et al.*, 2010). En Europe, il semble également être utilisé dans le domaine de l'endodontie afin de rincer et de remplir les canaux^{81,82}.

3.1.3.13 Industrie de la fabrication et du recyclage des appareils électroniques

Le DCM serait utilisé à titre de nettoyant pour les circuits imprimés, mais également de décapant de revêtements d'enrobage des métaux à l'intérieur de ceux-ci afin de procéder à leur réparation ou à leur restauration⁸³ (Lu *et al.*, 2021). Cependant, son utilisation dans la manufacture d'appareils microélectroniques aurait pris fin au milieu des années 1990 (Fleming *et al.*, 2014). Bakhiyi et Zayed (2014) mentionnent que les sources d'exposition potentielles au DCM (et à d'autres solvants comme le benzène et le toluène) dans l'industrie des panneaux photovoltaïques (PV) (silicium cristallin de première génération, couches minces de deuxième et troisième génération) seraient le raffinage du zinc et du cuivre par électroobtention (agent d'extraction) ainsi que la fabrication de cellules PV (étapes de nettoyage, lavage et séchage, contacts électriques, agent liant), incluant la production de métaux et métalloïdes purs (cadmium, indium, gallium, sélénium, etc.). Dans l'industrie du recyclage des panneaux PV, une fois les différentes matières séparées (aluminium, modules PV et plastiques), les modules PV sont traités chimiquement par des solvants (Besanger, 2022). Le DCM est aussi utilisé dans la fabrication de panneaux solaires à base de pérovskite (Chen, M.-X. *et al.*, 2021), une nouvelle technologie dans le domaine⁸⁴. Le DCM est de plus utilisé dans la fabrication de diodes électroluminescentes (Shi *et al.*, 2022).

Le DCM serait également utilisé pour la fabrication de séparateurs pour batteries aux ions de lithium présentes dans les appareils électroniques ainsi que dans les véhicules électriques, mais dans une moindre mesure que le TCE (*Methylene chloride; Regulation under Section 6(a) of the Toxic Substances Control Act (TSCA)*, 89 Fed. Reg., 39254 (8 mai 2024)).

Des auteurs de l'université du Massachusetts (*Department of Plastics Engineering*) à Lowell ont déterminé que le DCM était le meilleur solvant pour dissoudre et ainsi récupérer et recycler les plastiques présents dans les déchets électroniques. En effet, ils jugent que le recyclage des plastiques par des solvants comme le DCM serait une technique d'avenir, moins énergivore et plus efficace que des techniques par triage des déchets ou par incinération car cette technique permettrait d'éviter la libération de

⁸¹ <https://intemerata.eu/fr/rincage-et-remplissage-des-canaux/1144-chlorure-de-methylene-10ml.html>

⁸² <https://www.perfexia.pl/en/cerkamed-methylene-chloride/>

⁸³ <https://www.chlorinated-solvents.eu/uses-and-benefits/uses/technology/>

⁸⁴ <https://www.journaldemontreal.com/2023/08/13/le-panneau-solaire-du-futur>

substances nocives et persistantes dans l'environnement comme les retardateurs de flammes bromés des polymères (Anderson *et al.*, 2022).

3.1.3.14 Imprimerie et sérigraphie

La sérigraphie et la lithographie sont deux méthodes d'impressions susceptibles d'utiliser du DCM, soit par l'utilisation d'encre à base de solvants ou encore lors du nettoyage des écrans (Castaing et Bertrand, 2019) ou du retrait des graphiques en vinyle pressés à chaud sur les t-shirts⁸⁵. La première méthode, qui permet de fabriquer, par exemple, des panneaux de circulation routière (Brasseur, 2010), utilise un pochoir et peut imprimer sur divers supports (tissus, etc.) alors que la seconde vise à imprimer sur de la pierre. Selon certains partenaires, le DCM était également utilisé en sérigraphie au Québec jusqu'à tout récemment pour le collage des écrans de soie ou tamis⁸⁶.

« La sérigraphie est généralement réputée pour le brillant des teintes, leur stabilité à long terme et la possibilité de thermoformer après l'application du revêtement. Cependant, elle exige des surfaces parfaitement planes. Il existe deux types de sérigraphies : - procédé utilisant des encres à base de solvants - procédé utilisant des encres pouvant être polymérisées lorsqu'elles sont exposées à des UV » (Arkema, 2017). Les encres à solvants, parmi lesquels se trouve le DCM, sont utilisées depuis l'avènement des supports en matières plastiques (Castaing et Bertrand, 2019). À l'heure actuelle, le DCM est toujours utilisé pour cette tâche, mais semble moins présent dans les encres disponibles⁸⁷ (Nazdar Company, 2023)⁸⁸.

Concernant la lithographie, il en existe deux types : la lithographie par faisceau d'électrons et la lithographie laser ou UV⁸⁹. La lithographie « repose sur le principe chimique de la répulsion du gras et de l'eau : pendant le tirage, la pierre est constamment mouillée si bien que les parties dessinées, qui sont grasses, refusent l'eau mais acceptent l'encre, elle-même grasse, des rouleaux encreurs ». ⁹⁰ Le rôle du DCM dans cette utilisation est d'améliorer la fluidité du polyactide, un polyester aliphatique thermoplastique dérivé de la polymérisation de l'acide lactique, utilisé sur plusieurs matériaux (feuilles, films, fibres) (Takei et Hanabata, 2017). Le DCM a aussi été utilisé pour le nettoyage des blanchets en lithographie (EPA, 1997).

⁸⁵ <https://lawsonsp.com/products/methylene-chloride>

⁸⁶ Anonyme, communication personnelle, 21 février 2024.

⁸⁷ <https://www.nazdar.com/en-us/SDS>

⁸⁸ <https://patentimages.storage.googleapis.com/62/a1/0d/1eb50c650476a0/US4248636.pdf>

⁸⁹ <http://inf.emt.inrs.ca/?q=fr/Lithographie>

⁹⁰ <https://urdla.com/blog/definition-lithographie/#:~:text=La%20lithographie%20est%20une%20technique,tr%C3%A8s%20fragile%20et%20tr%C3%A8s%20dense>

Les différentes composantes des presses dans le domaine de l'imprimerie, telles que les rouleaux amortisseurs et doseurs, doivent être nettoyées à l'aide de solvants, dont le DCM (Wolf et Morris, 2006). Le procédé offset (actuellement le procédé majeur d'impression) est un dérivé direct de la lithographie. Il consiste en un « procédé d'impression par lequel l'image encrée du support imprimant (une plaque de métal gravée) n'est pas reportée directement sur le papier mais d'abord sur un cylindre recouvert d'une feuille de caoutchouc (dite « blanchet »), à partir duquel l'encre est transférée sur le papier ».⁹¹

Dans le domaine de l'impression commerciale, les opérateurs au dôme occupent un poste susceptible d'être exposé au DCM. Le dôme consiste en un « dépôt, sur un support imprimé, d'une couche de résine transparente qui forme en se solidifiant une surface bombée, créant ainsi un effet de relief »⁹². Au Japon, le cholangiocarcinome a été diagnostiqué chez plusieurs travailleuses et travailleurs de services d'impression couleur exposés à plusieurs solvants, dont le DCM; ce type de cancer y a même été reconnu comme maladie professionnelle en 2013 (Kounami *et al.*, 2024; Kubo *et al.*, 2014; Yamada *et al.*, 2015).

L'utilisation du DCM est également recommandée pour éliminer les imperfections (dissolution du plastique) sur la surface d'objets obtenus par impression 3D (Suárez-Macías *et al.*, 2020). Le DCM élimine les lignes d'impression et permet de remplir les pores apparus lors de l'impression pour obtenir une surface lisse de la pièce imprimée.

3.1.3.15 Tannerie et mégisserie (cuir)

La tannerie ou mégisserie est l'« industrie de la transformation des peaux en cuir à l'aide de produits tannants » ou l'action de transformer ces peaux⁹³. Le processus du tannage du cuir consiste à stabiliser les fibres de collagène afin qu'elles ne puissent plus entrer en putréfaction. À la fin du processus, la stabilité du tissu et sa résistance mécanique et thermique augmentent (Black, 2013). Le DCM a également été utilisé comme produit hydrofuge lors de la finition des textiles et du cuir dans l'industrie de la tannerie et de la mégisserie (EPA, 2020).

⁹¹ <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/8889662/offset> « L'offset semble avant tout une technique d'impression qui a été appliquée, dans une large mesure, à la lithographie. Peu à peu, la technique et le procédé d'impression ont apparemment été confondus au point que les termes offset et lithographie sont devenus presque synonymes dans l'usage. Plus tard dans l'histoire, la photographie a également été appliquée à la lithographie qui se faisait déjà presque uniquement en offset. »

⁹² <https://www.btb.termiumpius.gc.ca/tpv2alpha/alpha-fra.html?lang=fra&i=&index=frr&srchtxt=DOMAGE>

⁹³ <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/8368285/tannerie>

3.2 Données sur l'exposition humaine

L'exposition humaine a été évaluée à travers l'analyse de quatre différentes bases de données. Cette analyse vise à identifier les secteurs dans lesquels des niveaux élevés ont été mesurés afin de soutenir la priorisation des efforts de substitution.

La BDEP d'OSHA compte 765 553 enregistrements dont 6 105 enregistrements qui concernent le DCM entre les années 1979 et 2020. En conservant uniquement les enregistrements effectués depuis l'an 2000 dans IMIS et OIS, il reste 2 582 mesures de DCM. De nombreux dépassements des normes américaines sont rapportés; parmi les industries les plus touchées⁹⁴, on rapporte les % de dépassement suivants : aéroports et services aéronautiques (58 %), entrepreneurs spécialisés (45 %), industrie des produits chimiques organiques industriels (44 %), rembourrage et réparation de meubles (42 %), menuiserie (37 %), fabrication de matelas et sommiers (37 %), fabrication de mobiliers de bureau en bois (33 %), fabrication de produits en mousse plastique (31 %), fabrication d'ascenseurs et d'escaliers mobiles (26 %), construction de bâtiments publics et mobiliers connexes (26 %), fabrication de cloisons et luminaires en bois (20 %), ateliers de réparation et de peinture de carrosserie (19 %), fabrication d'armoires de cuisine en bois (17 %) et industrie des produits du plastique (16 %).

Au Québec, la base de données du LIMS contenait 9831 mesures de DCM dont 6330 ayant un résultat supérieur à la limite de quantification entre 1985 et 2020. Le Tableau 1 présente les dix secteurs où le DCM a été le plus fréquemment mesuré parmi les mesures détectées dans le LIMS et la BDEP d'OSHA.

Selon CAREX Canada (2020), les secteurs où un plus grand nombre de travailleuses et travailleurs étaient exposés au DCM en 2016 étaient la réparation et l'entretien automobile, la finition de bâtiments et l'industrie de fabrication de produits plastiques. Les travailleuses et travailleurs les plus à risque d'être exposés à de fortes concentrations de DCM sont ceux du domaine de la fabrication de produits plastiques; en effet, plus de 20 % des mesures individuelles enregistrées dépassaient les 50 ppm, soit la VLE actuellement recommandée au Québec. Un document résumant les principaux risques professionnels par métier souligne d'ailleurs l'exposition au DCM chez les métiers de plasturgies et de services automobiles (Baillargeon *et al.*, 2020).

Le récent outil de synthèse des données françaises de l'INRS⁹⁵ compte 6 688 enregistrements pour le DCM entre 1987 et 2022. La description des résultats pour les mesures prises en personnel pour une durée de 60 à 600 min se trouve dans la Figure 2 à l'Annexe D. La médiane des expositions est de 4 ppm. Quant au graphique apparaissant à la Figure 3 de la même annexe, il illustre l'évolution des concentrations

⁹⁴ Seuls les secteurs ayant 25 enregistrements ou plus ont été conservés.

⁹⁵ <https://outil-expo-rch-rb.inrs.fr/Outil110/Accueil>

mesurées à travers la même période. On voit que les niveaux d'exposition ont chuté énormément dans les dernières années, le 95^e centile associé à une durée d'exposition de 60 à 600 min passant de plus de 288 ppm en 2005 à 14 ppm en 2022⁹⁶. Cela est certainement dû en partie à la réglementation européenne restrictive sur l'usage du DCM dans les décapants à peinture (*Décision du Conseil n° 455/2009*, 2009 J.O. (L 137), 3-6).

Tableau 1. Dix secteurs où le DCM a été le plus fréquemment mesuré parmi les mesures détectées dans le LIMS et la BDEP d'OSHA⁹⁷

LIMS (1985-2020)			BDEP d'OSHA (1979 à 2020)		
Secteur CAEQ*	Nombre	%**	Secteur SIC ***	Nombre	%
Industrie des peintures et vernis	915	13,8	Produits plastiques, non autrement classifiés	325	6,4
Autres industries de produits en matière plastique	512	7,7	Réfection et réparation de mobilier	298	5,9
Industrie des produits en matière plastique en mousse et soufflée	436	6,6	Aéroports, terrains d'aviation et services aéroportuaires	128	2,5
Industrie des meubles de maison rembourrés	264	4,0	Essais de laboratoire	120	2,4
Industrie des produits d'architecture en matière plastique	238	3,6	Produits en mousse polyuréthane	115	2,3
Industrie des armoires de cuisine et des coiffeuses de salle de bains	206	3,1	Enseignes et articles publicitaires	111	2,2
Industrie des meubles de maison en bois	206	3,1	Fabrication de produits en caoutchouc, non autrement classifiés	110	2,2
Ateliers de réparation de meubles	173	2,6	Composantes et équipements en bois	108	2,1
Autres industries des produits chimiques	164	2,5	Armoires de cuisine en bois	102	2,0
Industrie des savons et composés pour le nettoyage	154	2,3	Impression commerciale, lithographie	89	1,8

*CAEQ : Classification des activités économiques du Québec.

** Pourcentage par rapport au nombre total de mesures détectées.

***SIC : Standard Industrial Classification (classification utilisée aux États-Unis; les noms ont été traduits librement).

Les données d'exposition pour certains secteurs ont été explorées. Tout d'abord, selon les BDEP d'OSHA pour la période 2000 à 2020, les moyennes géométriques les plus élevées se retrouvent dans les secteurs d'activités suivants : travaux de verre et vitrage

⁹⁶ La conversion de mg/m³ à ppm a été faite à partir de l'outil <https://www.rincent-air.fr/convertisseur> en considérant une température ambiante de 25 °C.

⁹⁷ Seules les mesures d'exposition par inhalation ont été conservées.

(2 825 ppm), préparations pharmaceutiques (468 ppm), costumes et manteaux pour hommes et garçons (310 ppm), peinture et pose de papier peint (192 ppm), quincaillerie non autrement classifié (189 ppm), service de réparation non autrement classifié (185 ppm), appareils électriques industriels non autrement classifié (177 ppm), croustille de pomme de terre et collation similaire (173 ppm), plâtre, cloisons sèches et isolation (166 ppm), caisses en bois clouées et panneau de caisse (160 ppm). Cette BDEP rapporte des niveaux d'exposition plus élevés pour certains titres d'emploi dont le décapage de peinture dans le secteur des travaux de verre et vitrage (8 700 ppm) et les opérateurs du secteur des préparations pharmaceutiques (2 771 ppm). Le secteur de la transformation de thé et de café (décaféination) est quant à lui spécifiquement associé à une moyenne géométrique de 6 ppm selon les données de l'INRS couvrant les années 1987 à 2022.

Une évaluation des expositions professionnelles a été réalisée durant une opération de synthèse de produits pharmaceutiques. Le DCM était manipulé par des travailleuses et travailleurs à différentes étapes du procédé lors du remplissage et du vidage d'un réacteur. Des concentrations (8h) entre 11 et 41 ppm ont été mesurées en zone respiratoire des travailleuses et travailleurs (Rullman, 2015).

3.3 Options de remplacement

À la lumière des informations fournies dans les sections précédentes, la substitution du DCM doit être envisagée (INRS, 2021); elle est même obligatoire dans certaines juridictions comme aux États-Unis où le risque d'utilisation du DCM est présenté comme déraisonnable tant pour des utilisations industrielles que commerciales (*Methylene chloride; Regulation under Section 6(a) of the Toxic Substances Control Act (TSCA)*, 88 Fed. Reg., 28284 (3 mai 2023)). Depuis plus de vingt ans, des chercheuses et chercheurs travaillent sur la substitution de solvants dangereux par des solvants moins dangereux ou par des changements de procédés étant donné les enjeux de santé au travail, mais également les enjeux environnementaux qui y sont reliés (Bégin et Gérin, 2001; Roelofs et Ellenbecker, 2003).

On peut constater à l'Annexe B que le VHR du DCM est de 11 447 à 25°C (avec une tension de vapeur de 350 mmHg et une VLE de 50 ppm). Il est donc un solvant présentant un fort potentiel de surexposition, ce qui en fait un solvant mettant fortement à risque la santé des travailleuses et travailleurs. Selon Stenzel et Arnold (2015), considérant son VHR, l'environnement de travail où l'utilisation de ce solvant se fait devrait être extrêmement bien contrôlé; les auteurs suggèrent ainsi la présence d'une ventilation locale avec captation des vapeurs et un minimum de 6 changements d'air à l'heure lors de l'utilisation du DCM⁹⁸.

⁹⁸ Les critères ont été adaptés et recalculés pour tenir compte de la concentration à saturation.

Les options de remplacement au DCM peuvent être décrites par famille chimique, par catégorie selon leur origine ou encore selon leur utilisation. Afin de faciliter la correspondance avec les sections 4.1 et 4.3, une description des options par utilisation ou domaines d'application a été choisie ici, mais certaines substances peuvent être utilisées dans plusieurs domaines. Par exemple, le DMSO a été utilisé comme solvant de remplacement pour le nettoyage, le décapage, pour la formulation de pesticides ainsi que dans des procédés d'extraction (Bégin *et al.*, 2002a), alors que des éthers de glycol, commercialisés sous le nom de DOWANOL, sont utilisés pour des applications telles que le décapage, le nettoyage et le dégraissage (INERIS, 2015).

L'objectif de cette section est de documenter les options de remplacement; les préoccupations associées, dont les impacts sur la santé humaine, sur la sécurité mais aussi sur l'environnement, seront traitées essentiellement dans la section suivante.

3.3.1 Décapants (peinture, vernis, encre, adhésif et joint)

*« Le département [californien] responsable du contrôle des substances toxiques et son programme sur les produits de consommation plus sûrs (Safer Consumer Products) évaluent des options de remplacement pour des produits jugés prioritaires (State of California, 2019). Des exemples d'analyse de substitution sont disponibles comme celle évaluant les options de remplacement à l'utilisation du DCM dans les décapants à peinture (Burns, Magnuson, Geyer et Keller, 2016). Le document identifie notamment les décapants à base d'adipate diméthylrique comme une option de remplacement qualifiée de « verte ». » (Bégin *et al.*, 2020).*

Le Tableau 2 présente la composition de 17 décapants à peinture commerciaux sans DCM identifiés dans la littérature. Un exemple de solvant proposé comme décapant de peinture sans DCM est le Devstrip 501. Ce décapant est proposé au Canada pour l'élimination des peintures et revêtements présents sur de l'acier, du béton, de l'aluminium et d'autres alliages, du bois et des substrats de maçonnerie (International Paint, 2019). Selon la compagnie, le Devstrip 501 enlève efficacement les peintures au latex, aux résines alkydes, acryliques et les revêtements époxy et à l'uréthane à deux composants. Le Devstrip contient de 45 à 70 % d'alcool benzylique (AB).

Quatre grandes catégories de substances utilisées actuellement dans les décapants ont été identifiées : 1) la NMP (accompagnée parfois d'acide formique ou d'AB), 2) les esters d'acides dicarboxyliques (DBE) (incluant l'adipate diméthylrique, le glutarate diméthylrique, ou le succinate diméthylrique), 3) l'AB, et 4) une combinaison d'acétate de méthyl et d'autres substances (1,3-dioxolane, diméthylsulfoxyde (DMSO), N,N-Diméthylformamide (DMF), éthers de glycol) (Bégin *et al.*, 2016d; Durrani *et al.*, 2020; Morose *et al.*, 2017).

Des substances comme le tétrahydrofurane (THF) et la gamma-butyrolactone (GBL) peuvent également se retrouver dans la composition de décapants. Le peroxyde d'hydrogène présent dans certaines formulations sert à renforcer l'action décapante,

p. ex. dans le décapant PR-5044 de PPG (PPG, 2015, 2017). L'acide formique est également utilisé à cet effet, p. ex. dans le décapant B96 de Benco (Benco, 2015)⁹⁹.

Une autre option de décapant de peintures spécifiquement, mentionnée dans quelques publications, et recensée au Tableau 2 (Recochem, 2023a), est le carbonate de propylène, parfois couplé ou non avec la GBL, le DMF ou avec l'AB (Bégin, Beaudry, *et al.*, 2005; INERIS, 2015; Kurowski *et al.*, 2017), alors que Morose *et al.* (2017) donnent quelques exemples de formulations contenant du thiophène.

Ces composés correspondent globalement aux options de remplacement identifiées par l'INERIS (2015) pour le décapage.

Tableau 2. Substances divulguées dans 17 décapants à peinture commerciaux sans DCM

Substance / n° CAS	Référence
N,N-diméthylformamide / 68-12-2 Carbonate de propylène / 108-32-7 n,n-dimethyl 9-decenamide / 1356964-77-6 Carbonate de diméthyle / 616-38-6 Éthoxy-3 propionate d'éthyle / 763-69-9 Alcool d'alkyl (C9-C11) éthoxylé / 68439-46-3	Recochem (2023a)
1,3-Dioxolane / 646-06-0 Diméthoxyméthane / 109-87-5 Coupe pétrolière C ₁₁ -C ₁₄ / 64742-47-8 Méthanol / 67-56-1 Diméthylamino-2-éthanol / 108-01-0	Rust-Oleum (2023)
Tétrahydrofurane / 109-99-9 Méthanol / 67-56-1 Ammoniac / 7664-41-7 Xylènes / 1330-20-7 Alcool éthoxylé en C ₉ -C ₁₁ / 68439-46-3 Hydroxypropylméthylcellulose / 9004-65-3 Éthylbenzène / 100-41-4	W.M. Barr EHS Dept. (2021)
Sulfosuccinate de dioctyle et de sodium / 577-11-7 1-propoxypropane-2-ol / 1569-01-3	Avmor (2020); cette préparation est fournie dans un pulvérisateur à gâchette en bombe aérosol
Alcool benzylique / 100-51-6 Éther monobutylique du diéthylène glycol / 112-34-5 2-(2-Aminoéthoxy) éthanol / 929-06-6 Coupe pétrolière hydrotraitee / 64742-47-8 Alcool éthoxylé en C ₉ -C ₁₁ / 68439-46-3	W. M. Barr (2019)

⁹⁹ Pour une explication du rôle et du mécanisme d'action de l'acide formique dans les décapants, voir Huang, Z. *et al.* (2018).

Substance / n° CAS	Référence
Terpinolène / 586-62-9 d-Limonène / 5989-27-5	
Gamma-butyrolactone / 96-48-0 Éther méthylique du dipropylène glycol / 34590-94-8 Alcool éthoxylé en C ₉ -C ₁₁ / 68439-46-3	Inventec (2019)
2,5,7,10-tétraoxaundécane / 4431-83-8 Adipate diméthylique / 627-93-0 Glutarate diméthylique / 1119-40-0 Alcools éthoxylés en C ₉ -C ₁₁ / 68439-46-3	Franmar (2019)
Alcool benzylique / 100-51-6 Peroxyde d'hydrogène / 7722-84-1 Naphte de pétrole, aromatique léger / 64742-95-6	International Paint (2019)
Acétate de méthyle / 79-20-9 N,N-Diméthylformamide / 68-12-2 Cyclohexanone / 108-94-1 Éther undécylique du polyéthylène glycol / 34398-01-1	Recochem (2019)
Acétate de méthyle / 79-20-9 1,3-Dioxolane / 646-06-0 Diméthylsulfoxyde / 67-68-5	Kalium Solutions Inc. (2018b)
Glutarate diméthylique / 1119-40-0 Succinate diméthylique / 106-65-0 Phosphate triéthylique / 78-40-0 Adipate diméthylique / 627-93-0	EZ Strip (2018)
Alcool benzylique / 100-51-6 Acide glycolique / 79-14-1 Kaolin calciné / 92704-41-1	Dumond (2018)
1,1,1,2-Tétrafluoroéthane / 811-97-2 o-Chlorotoluène / 95-49-8 p-Chlorotoluène / 106-43-4 Acétone / 67-64-1 Méthanol / 67-56-1 Hydrocarbures saturés à chaînes ramifiées, C ₉ -C ₁₂ / 64741-65-7	Pratt (2017); cette préparation est fournie en bombe aérosol
Alcool benzylique / 100-51-6 Peroxyde d'hydrogène / 7722-84-1 Coupe pétrolière aromatique / 64742-95-6 Coupe pétrolière hydrotraitée / 64742-53-6 Sel de baryum de l'acide dinonylnaphthalènesulfonique / 25619-56-1 1,2,4-triméthylbenzène / 95-63-6	PPG (2017)
Eau / 7732-18-5 Adipate diméthylique / 627-93-0	3M Canada (2016)

Substance / n° CAS	Référence
Glutarate diméthylque / 1119-40-0 Smectite / 12199-37-0	
Adipate diméthylque / 627-93-0 N-Méthyl-2-pyrrolidone / 872-50-4 d-Limonène / 5989-27-5	Savogran (2015)
Alcool benzylique / 100-51-6 Phénol / 108-95-2 Acide formique / 64-18-6	Benco (2015)

Le fabricant étatsunien xF Technologies a mené une étude comparative d'un mélange de 84 % d'Ethyl 408 + 16 % d'éthanol versus le DCM pour le décapage en immersion d'une peinture acrylique rouge sur des barres en aluminium à une température de 65°F (18°C). L'image présentée en ligne par la compagnie¹⁰⁰ indique la présence d'un film résiduel translucide de peinture rouge pâle sur les barres en contact avec le DCM alors que celles en contact avec le mélange semblent presque complètement propres. Selon la FDS de la compagnie, le 5-méthylfuran-2-carboxylate d'éthyle, n° CAS 14003-12-4, est la substance active de l'Ethyl 408 (xF Technologies, 2022). En lien avec ce retour d'expérience de l'entreprise, l'efficacité de l'Ethyl 408 pour décaper des peintures en immersion a aussi été confirmée par des essais effectués par le Toxics Use Reduction Institute (TURI) de l'Université du Massachusetts à Lowell. Toutefois, le TURI rapporte que l'Ethyl 408 n'était pas efficace pour retirer la peinture du bois, mais était efficace pour le décapage sur l'acier inoxydable et l'aluminium (TURI, 2022).

Plusieurs autres essais d'efficacité de décapage ont été réalisés par le TURI en comparant différents substituts¹⁰¹. Selon un expert du TURI, les différentes alternatives composées de NMP, de DBE et d'AB sont moins efficaces que le DCM lorsqu'il s'agit de décaper plusieurs couches de peinture et nécessitent plus de temps d'application¹⁰². Cependant, même avec des composés contenant du DCM, on observe une variation dans les vitesses de performance.

Spécifiquement pour les décapants pour adhésifs et joints, le TURI a développé une formulation de décapant à peinture pour remplacer les décapants à base de DCM¹⁰³. Tel que présenté au Tableau 2, le nouveau décapant, fabriqué par une compagnie québécoise située à Granby, contenait du 1,3-dioxolane, de l'acétate de méthyle et du DMSO non divulgué (Kalium Solutions Inc., 2018a, 2018b) alors que maintenant, le

¹⁰⁰ <http://xftechnologies.com/solvents/>

¹⁰¹ [https://www.cleansolutions.org/Browse-Vendors-Products/\(product\)/1211](https://www.cleansolutions.org/Browse-Vendors-Products/(product)/1211)

¹⁰² <https://cen.acs.org/safety/consumer-safety/Replacing-methylene-chloride-paint-strippers/96/i24>

¹⁰³ https://web.archive.org/web/20240713133205/https://www.turi.org/Our_Work/Research/Coating_Removal

décapant Nouvelle Génération contiendrait les 3 mêmes ingrédients (SuperDécapant inc., 2019), en plus de l'AB et de trois autres solvants (SuperDécapant inc., 2023a, 2023b).

L'un des décapants qui a été le plus performant techniquement contient de l'acétate de méthyle et du 1,3-dioxolane (Morose *et al.*, 2020), c'est-à-dire le même solvant contenu dans le décapant développé par le TURI et décrit ci-dessus (Kalium Solutions Inc., 2018a), alors qu'une étude a conclu que le dioxolane et le diméthoxyméthane étaient les meilleures substances pour remplacer le DCM à titre de décapant (Kurowski *et al.*, 2017). Ces essais à petite échelle sont une étape essentielle de la démarche de substitution.

Certains décapants aqueux peuvent être utilisés pour le décapage de baignoire. Une autre option est d'éviter complètement l'étape de décapage en recouvrant les anciennes baignoires d'une coque préfabriquée en plastique (Bégin *et al.*, 2016b).

L'OTA (Office of Technical Assistance and Technology) du TURI a aussi produit une fiche de substitution pour le décapage d'instruments de musique (OTA, 2018); dans ce cas, l'AB a été privilégié.

Certains décapants sont spécifiquement conçus pour le ravalement de bâtiments. Un outil a même été développé par l'Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics (OPPBTP) pour la France afin de comparer les différents décapants entre eux¹⁰⁴.

Un des solvants recensés au Tableau 2, spécifique à l'enlèvement de graffitis (Avmor, 2020), a été certifié ÉCOLOGO^{105, 106}. D'autres solvants avaient été répertoriés par Bégin *et al.* (2016c) spécifiquement pour les graffitis, soient des décapants à base d'esters méthyliques d'acides dicarboxyliques, des décapants à base de lactate d'éthyle et de soyate de méthyle ainsi que des décapants à base d'acétate de l'éther monométhylique du propylène glycol et d'hydroxyde de potassium (Bégin *et al.*, 2016c). Spécifiquement pour les graffitis, les mêmes auteurs relataient que des techniques abrasives de rechange au jet d'abrasif traditionnel avaient été étudiées pour des surfaces métalliques et en béton; il s'agissait de projection de glace sèche et de projection d'une suspension aqueuse de verre recyclé concassé mais à l'époque, elles n'avaient pas fait l'objet d'une évaluation en matière d'hygiène du travail. Les graffitis ne se retrouvent pas uniquement sur les immeubles, le mobilier urbain et sur les véhicules de transport en commun. On en retrouve aussi sur les arbres¹⁰⁷; des auteurs recommandent l'utilisation de nettoyeurs à base d'essence d'agrumes pour cette tâche (Roviello *et al.*, 2023). Ce type de nettoyeur

¹⁰⁴ <https://www.aleacontrôles.com/uploads/tinyBrowser/Outil-D%C3%A9capants-Fa%C3%A7ades-OPPBTP.xlsx>

¹⁰⁵ https://abcdistribution.ca/wp-content/uploads/fiches-lalema/bt_EP75_fr.pdf

¹⁰⁶ <https://www.transtarsupply.com/product/ep75-graffiti-remover-946-ml/>

¹⁰⁷ <https://www.lapresse.ca/actualites/grand-montreal/2021-11-28/graffitis/montreal-barbouille.php>

contient souvent de l'extrait d'orange et en particulier du d-limonène qui a déjà fait l'objet d'une monographie (Bégin et Gérin, 2000).

Des méthodes techniques sont proposées pour réduire l'exposition aux solvants; par exemple, des lingettes pré-imbibées de solvants peuvent être privilégiées à l'utilisation d'un vaporisateur lorsque les quantités à utiliser sont minimales. Il faudra par contre considérer les déchets associés dans ce choix de moyen de maîtrise (CITEPA, 2011).

Finalement, certaines méthodes mécaniques ou thermiques comme le ponçage ou le pistolet thermique pourraient aussi être des alternatives aux décapants chimiques dans certaines applications, mais requièrent souvent plus de temps (Jargot, 2006; *Methylene chloride; Regulation under Section 6(a) of the Toxic Substances Control Act (TSCA)*, 88 Fed. Reg., 28284 (3 mai 2023)). Le Southwest Research Institute (San Antonio, TX) a récemment mis au point un robot d'ablation au laser de la peinture sur les avions¹⁰⁸. Étant donné l'importance de l'industrie aéronautique au Québec, cette méthode innovante de décapage de peinture sans DCM pourrait être prometteuse. Le décapage au laser n'est pas nouveau, car il en a été fait mention dans une publication antérieure (Gérin *et al.*, 1995).

3.3.2 Nettoyants et dégraissants

Il y a longtemps qu'on tente de remplacer les solvants chlorés pour cette utilisation. En effet, le Centre de recherches nucléaires étatsunien a publié une étude de cas où ceux-ci étaient utilisés dans le dégraissage en phase vapeur et pour le nettoyage manuel, mais où ils ont été remplacés par le nettoyage aqueux lessiviel dans des bains aux ultrasons et par des solvants moins toxiques, mais pouvant être combustibles¹⁰⁹. Le DCM a largement été utilisé comme nettoyant à freins et plusieurs produits de remplacement sont actuellement disponibles pour cette tâche (plusieurs exemples sont illustrés au Tableau 3).

Tableau 3. Substances divulguées dans 4 nettoyants à freins sans DCM

Substance / n° CAS	Référence
Hydrocarbures, C6-C7, n-alcanes, isoalcanes, cycliques, < 5 % n-hexane / 92128-66-0 Alcool isopropylique / 67-63-0	Würth France (2022)
Tétrachloréthylène / 127-18-4 Heptane, ramifiés, cycliques et linéaires / 426260-76-6 d-Limonène / 5989-27-5 Dioxyde de carbone / 124-38-9	Les Entreprises Kleen-Flo Tumbler Limitée (2017a)

¹⁰⁸ <https://www.rdworldonline.com/rd-100-2020-winner/laser-coating-removal-robot-lcr-robot/>

¹⁰⁹ Voir p.135-142 : <https://www.osti.gov/servlets/purl/6115790>

Acétone / 67-64-1 Acétate de pentyle / 627-63-7	Berryman Products (2015b)
n-Heptane / 142-82-5 Alcool isopropylique / 67-63-0	Würth Canada Limited (2014)

Un nettoyeur à freins à base de PERC a déjà fait l'objet d'une démarche de substitution étant donné la toxicité de ce composé (TURI, 2019). Celui-ci a été remplacé par une solution biosourcée, Ozzyjuice, en utilisant le système SmartWasher¹¹⁰. Ce type de produit est toujours disponible et est essentiellement à base d'eau (90-100 %) (CRC Industries, 2021); l'utilisation de ces produits de dégraissage dans des fontaines est également connue sous le nom de biofontaines (TURI, 2021). Une étude a évalué l'exposition de travailleuses et travailleurs aux bioaérosols lors de l'utilisation de biofontaines. Les auteurs concluent que ces expositions étaient très faibles et, en conséquence, ne recommandent pas d'utiliser une protection respiratoire lors de leur utilisation (Villeneuve *et al.*, 2017).

Certains nettoyeurs à freins ont vu le jour dernièrement afin de répondre aux nouvelles exigences réglementaires en matière d'environnement et de limitation de la teneur en COV des produits, dont deux à base d'acétone (FCA Canada, 2022; Petra Automotive Products, 2023), tous deux accompagnés d'heptanes cycliques linéaires ramifiés, d'éthanol, de n-heptane et de benzène. À noter que la définition de COV retenue exclut l'acétone, qui est lui-même un COV en Europe¹¹¹.

Outre ces composés, l'INERIS (2015) dénote l'utilisation possible, comme agent de nettoyage, de décapage et de dégraissage des métaux, de produits contenant l'un ou l'autre des ingrédients suivants : le 1,3-dioxolane, le diéthoxyméthane, le diméthoxyméthane, le diméthylsulfure, le dipropylène glycol, le lactate d'éthyle, la NMP. Également, un nettoyeur à métal à base de d-limonène, accompagné de lactate d'éthyle et de myrcène (Walter Technologies pour surfaces inc., 2018a) vise l'enlèvement de cires et de revêtements anticorrosion, l'enlèvement d'adhésif, de l'huile, de la graisse, de la cire, de la peinture, du goudron et de l'encre ainsi que le nettoyage de pièces des machines, de l'outillage, des pompes et des engrenages.

Les options de remplacement proposées spécifiquement à titre de détachants pour textiles, tels que le 1,3-dioxolane, le 2,5,7,10-Tetraoxaundecane, l'hydrogénéphosphate de potassium (DKP), le d-limonène, l'acétone et la méthyl éthyl cétone (MEK) n'ont pas été évalués en termes d'efficacité de la substitution (INERIS, 2015).

¹¹⁰ <https://smartwasher.com/>

¹¹¹ « En ce qui concerne les COV, l'Union européenne (UE) les définit entre autres comme étant des composés organiques ayant une pression de vapeur de 0,01 kPa ou plus à une température de 293,15 K (= 20 °C). L'UE définit même ce qu'est un composé organique semi-volatile comme un composé organique ayant un point d'ébullition plus élevé que 250 °C, mais inférieur à 370 °C mesuré à une pression de 101,3 kPa » (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2010a), (tiré de Bégin *et al.* (2020)).

Outre des solvants à faible volatilité, plusieurs procédés de remplacement ont été proposés afin de nettoyer et de dégraisser des surfaces et des équipements: machine à laver (utilisée de façon répétée), nettoyage par ultrasons, à caustique chaude, à pression et à vapeur, nettoyage à lit fluidisé, jet de sable ou de glace sèche (CO₂) (Chronopoulos *et al.*, 2020; TURI, 2021).

Il existe des appareils destinés au nettoyage automatique des cuves; ceux-ci permettent d'éviter que les travailleuses et travailleurs soient confinés dans des espaces clos et, par le fait même, exposés aux solvants. Le nettoyage est effectué en circuit fermé; le nettoyant, un solvant ou un nettoyant aqueux, est projeté sous pression sur la surface interne de la cuve. Divers fabricants proposent ce type de système de nettoyage. « L'organisme britannique sans but lucratif WRAP (Waste and Resources Action Programme) propose un document suggérant plusieurs conseils techniques pour une gestion rentable du nettoyage de cuves » (Bégin *et al.*, 2016e).

Le TURI a également recensé 2 cas de substitution du DCM par le nettoyage ultrasonique¹¹². Ce dernier s'effectue en baignant la pièce à nettoyer dans un liquide (à base d'eau généralement) en utilisant des vibrations de haute fréquence afin d'éliminer l'adhérence de la contamination. Les vibrations créent des microbulles dans le liquide, créant ainsi une action nettoyante (Chronopoulos *et al.*, 2020).

Le CO₂ supercritique peut aussi être utilisé comme nettoyant et dégraissant de pièces mécaniques de petites à moyennes dimensions, en remplacement des solvants pétrochimiques (Lumia, 2002).

3.3.3 Dégrippants/lubrifiants

La formulation de plusieurs produits utilisés comme dégrissant et lubrifiant a évolué depuis 2020. Par exemple, un produit de la marque Jig-A-Loo, qui contenait encore en 2018 du DCM (40 à 70 %) et du PERC (15 à 40 %) (Jig-A-Loo, 2018) est maintenant composé de naphta et d'heptane (Jig-A-Loo inc, 2020). La nouvelle formulation de ce produit, largement disponible dans la plupart des quincailleries au Québec, a donc permis d'éliminer les deux solvants chlorés (PERC et DCM).

Un autre exemple de dégrissant qui contenait entre 50 à 100 % de DCM a été remplacé (Orapi, 2017a). Aujourd'hui, Victoria Lub, possédant maintenant les produits Orapi, offre sur le marché un lubrifiant exempt de DCM, toujours sous forme d'aérosol, mais dans lequel du tétrafluoro-1,1,1,2 éthane (25 à 50 %), de l'alcool isopropylique (25 à 50 %) et du n-heptane (10 à 25 %) sont les principales composantes (Victoria Lub PTY LTD, 2021).

¹¹² <https://www.epa.gov/toxics-release-inventory-tri-program/solvent-substitutions-reported-tri>

3.3.4 Composantes de colles, d'adhésifs et de calfeutnants (« scellants » à joint)

Plusieurs scellants sans DCM sont maintenant proposés par différents fournisseurs comme Henkel et Grainger. Les scellants contiennent tous les deux entre 10 et 20 % de solvant n-hexane (n° CAS 110-54-3). Spécifiquement pour le produit Loctite MR 5009 hi-tack gasket sealant, après le retrait du DCM, du n-hexane (10-20 %) a été ajouté et la proportion d'acétone est passée de 10-30 % à 30-40 % (Henkel Canada Corporation, 2021b); cette nouvelle formule se trouve sous forme visqueuse ou liquide et la fiche indique un point d'éclair à 0 °C. Une 2^e fiche a été trouvée pour un produit Loctite sans DCM servant à l'étanchéification; cette fiche indique également la présence de n-hexane (10-30 %) et une plus grande proportion d'acétone (30-60 %) (Henkel Canada Corporation, 2023). Bien que ces produits ne possèdent plus de phrase de risque concernant la cancérogénicité, ils possèdent des phrases de risque en lien avec la toxicité pour la reproduction.

Initialement, des adhésifs à base de DCM étaient utilisés chez Domfoam à Montréal pour coller des pièces et blocs de mousse de polyuréthane ensemble, vendus ensuite à des fabricants de meubles rembourrés (Bégin et Gérin, 2001). La fiche de substitution produite par l'Université de Montréal pour les produits de collage de mousse de polyuréthane dans l'industrie du meuble rapporte plusieurs pistes de remplacement au DCM. Les adhésifs en phase aqueuse sont notamment identifiés comme des pistes de solution (Bégin *et al.*, 2016a). Une étude de cas de substitution de solvant, détaillée à l'Annexe V du document de Bégin et Gérin (2001), en vient à la même conclusion. Cette étude de cas présente différentes options préliminaires dont la composition était variée (polychloroprène, latex, caoutchouc naturel ou synthétique, hydrocarbure halogéné, polymère thermoplastique) de même qu'une analyse *a posteriori* de l'implantation de l'utilisation de l'adhésif privilégié (Simalfa 309 à base de polychloroprène d'un copolymère d'ester d'acrylique et d'eau). Le liant est un mélange de résine acrylique et de caoutchouc synthétique, légèrement basique. Le caoutchouc synthétique est du polychloroprène (Alfa Adhesives Inc., 2023).

Également, les adhésifs de méthacrylate de méthyle (AMM)¹¹³ ont déjà été conseillés comme option de remplacement (INERIS, 2015).

Un article de l'industrie (Adhesives & Sealants Industry, 2023), rapportait en octobre 2023 les développements récents dans la disponibilité d'adhésifs de contre-collage¹¹⁴ sans solvants pour l'industrie des emballages multicouches (grignotines, sachets de liquide, sachets avec fermeture à glissière, sachets stérilisables). L'article traite principalement de la réduction de l'émission des gaz à effet de serre que permet l'utilisation de ces

¹¹³ <https://mpi-matco.com/fr/blogue/explorer-les-adhesifs-de-methacrylate-de-methyle-amm-decouvrir-leur-polyvalence/>

¹¹⁴ <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/3398474/contre-collage>

nouveaux adhésifs. Or, il est probable que l'utilisation de tels adhésifs améliorerait par le fait même la qualité de l'air des lieux de travail.

L'Agence danoise de protection de l'environnement publiait en février 2023 un rapport de recherche portant sur la substitution des adhésifs à base de solvants¹¹⁵. On y traite du remplacement des adhésifs à base de solvants dans l'industrie du cuir par des adhésifs à base de biopolymères en utilisant de l'alginate¹¹⁶ et du chitosane¹¹⁷. Une autre partie de la recherche concerne le remplacement des adhésifs à base de solvants dans l'industrie du meuble. Il est question de les remplacer par des adhésifs à base de polymères modifiés¹¹⁸, comprenant des terminaisons de type silyle (-SiH₃). Le développement de ces nouveaux adhésifs est toujours en cours.

Un adhésif thermofusible a déjà aussi permis de remplacer un autre type de solvant dangereux, le néoprène (Brasseur, 2007). Ce type d'adhésif est toujours disponible aujourd'hui¹¹⁹. Selon le fabricant de colles Jowat, « Les adhésifs thermofusibles sont des formules sans solvant qui deviennent liquides lorsqu'elles sont chauffées et appliquées à l'état fondu »¹²⁰.

Un procédé de remplacement des solvants toxiques serait le perçage et le vissage (INERIS, 2015), bien qu'il ne puisse probablement pas convenir à toutes les applications.

3.3.5 Soudage et cimentation au solvant

Pour cette utilisation, dans le domaine plus spécifique de la sculpture, il y avait déjà eu une recommandation en 2009 afin de substituer le DCM, même si de petites quantités étaient utilisées, étant donné que celui-ci était reconnu comme cancérigène (Chen, L. et Tapp, 2009). Pour le collage de pièces en polycarbonate, Troughton (2008) recommande les trois solvants suivants: acétate d'éthyle, acide acétique glacial et 2-méthoxyéthanol.

Plusieurs FDS confirment que l'acétate d'éthyle (60-75 %) peut être utilisé à des fins de cimentation au solvant (Rema Tip Top Australia Pty Ltd., 2017; Rema Tip Top North America, 2015a; Rema Tip Top/North America, 2023), bien qu'elles mentionnent également la présence d'isocyanates, reconnus pour entraîner des effets respiratoires et cutanés (Roberge *et al.*, 2013). Cependant, plusieurs FDS transmises récemment par des partenaires industriels indiquent une composition en TCE à plus de 80 % pour ce type de

¹¹⁵ <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2023/02/978-87-7038-487-2.pdf>

¹¹⁶ <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/26555099/alginate>

¹¹⁷ <https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/17561517/chitosane>

¹¹⁸ https://fr.wikipedia.org/wiki/Polym%C3%A8re_modifi%C3%A9_silane

¹¹⁹ https://www.3mcanada.ca/3M/fr_CA/bonding-and-assembly-ca/hot-melt-adhesives/

¹²⁰ <https://www.richelieu.com/us/fr/categorie/colles-silicones-et-scellants/colles-thermofusibles/adhesif-granulaire-pour-bande-de-chants-thermofusible-jowat-266-00/1470650/sku-JW26600>

produits (Rema Tip Top North America, 2015b), que ce soit pour la réparation de pneus ou pour toute autre action vulcanisante ou durcissante, bien qu'il soit noté dans l'une d'entre elles qu'il s'agit d'un « Adhésif vulcanisant chimique à base de caoutchouc naturel » (Midwest Rubber Mfg., 2015). Rappelons que depuis 2012, le CIRC a classé le TCE dans le groupe 1, cancérigène chez l'humain (cancer du rein) et que l'U.S. EPA a signifié son intention de bannir toutes les utilisations du TCE en 2023¹²¹.

Une autre compagnie propose un produit contenant 25-50 % de cyclohexanone, 25-50 % de MEK et 10-25 % d'acétone (Weld-On, 2022).

3.3.6 Revêtements et peintures

Deux exemples de diluants à peinture distribués par la compagnie Recochem et qui ne contenaient plus de DCM en 2023 consistent en un mélange de 60 à 80 % de distillat de pétrole avec soit 10 à 30 % de solvant Stoddard¹²² (Recochem, 2023b), soit 10 à 30 % d'acétone (Recochem, 2023c). Un autre exemple contient 90 à 100 % de N-ethyl-2-pyrrolidone (DSP Singapore Holdings PTE. LTD., 2018).

Un revêtement pour préservation du bois est également fait à base de solvant Stoddard à 60-80 % (Recochem, 2024). Certaines peintures, minérales ou silicatées, sont utilisées pour le revêtement extérieur dans le secteur des bâtiments et travaux publics¹²³.

Hoy *et al.* (1993) ont breveté pour le compte de la société Union Carbide (maintenant Dow Chemical) un procédé utilisant le CO₂ supercritique pour appliquer des peintures par pulvérisation, réduisant ainsi l'émission de solvants organiques classiques dans l'air des locaux de travail. Cette technologie, connue sous l'appellation commerciale UniCarb®, a été évaluée pour l'application d'une laque nitrocellulosique sur le bois dans l'industrie du meuble. Les auteurs de cette étude concluent notamment que la qualité du fini appliqué en une couche est aussi bonne ou meilleure que celle du revêtement habituellement utilisé en deux couches (Heater *et al.*, 1994).

Une firme néerlandaise¹²⁴ a aussi mis au point une technologie pour teindre les tissus sans utilisation d'eau ou de substances chimiques autres que le colorant, par l'emploi du CO₂ supercritique (Ritter, 2014). Cette technologie est utilisée avantageusement par un fabricant taïwanais¹²⁵.

¹²¹ <https://www.epa.gov/newsreleases/biden-harris-administration-proposes-ban-trichloroethylene-protect-public-toxic>

¹²² https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=1156

¹²³ https://www.preventionbtp.fr/ressources/solutions/peintures-minerales-les-benefices-par-rapport-aux-peintures-acryliques_UzjL7JZzAM6tfSeBzRZBxh

¹²⁴ <https://dyecoo.com/>

¹²⁵ <https://cen.acs.org/articles/90/i7/Nike-Looks-Supercritical-Carbon-Dioxide.html>

3.3.7 Préparations anti-projections en soudage métallique (anti-adhérents)

Plusieurs préparations anti-projections ou anti-adhérentes sans solvant chloré sont proposées sur le marché. Par exemple, la série E-Weld de Walter Technologies pour surfaces propose 2 produits, un contenant du polyéthylène glycol (1-5 %) (Walter Technologies pour surfaces inc., 2022b) et un mélange de Tert-alkyl(en C12-14)amines éthoxylées, propoxylées (1-5 %) et de sodium cumenesulphonate (1-5 %) (Walter Technologies pour surfaces inc., 2022a). Les deux sont en solution et s'appliquent en vaporisateur¹²⁶. Une autre compagnie propose un aérosol anti-projections à base d'huile végétale, disponible en Europe¹²⁷. Un autre anti-adhérent utilisé dans l'industrie du soudage est fait à base d'huile minérale blanche (30-60%) et contient du dioxyde de titane (1-5%) (Walter Technologies pour surfaces inc., 2018b).

3.3.8 Industries pharmaceutiques

Certains produits pharmaceutiques qui contenaient du DCM n'en contiennent plus. C'est le cas du ViagraTM pour lequel le processus de production entier a été revu afin de limiter les émissions de solvants toxiques et volatiles, tout en limitant l'utilisation de ressources et d'énergie (Dunn *et al.*, 2004).

De manière générale, l'INERIS (2015) a identifié plusieurs solvants de remplacement pour la synthèse de produits pharmaceutiques, il s'agit du 1,3-dioxolane, du diéthoxyméthane et du 2,5,7,10-Tetraoxaundecane.

3.3.9 Extraction d'arômes, des parfums, des huiles essentielles et de composés organiques (alimentation, industrie pétrolière)

Divers solvants de remplacement sont utilisés pour l'extraction (1,3-dioxolane, dipropoxyméthane, diéthoxyméthane, diméthoxyméthane) ou la synthèse (1,3-dioxolane, diéthoxyméthane, 2,5,7,10-Tetraoxaundecane, diméthoxyméthane) d'huiles essentielles ou de parfums et produits pour la toilette (INERIS, 2015).

Concernant l'industrie agroalimentaire et les produits cosmétiques, le n-hexane a déjà été privilégié comme solvant de remplacement au DCM, mais celui-ci est toxique pour l'humain et également pour les organismes aquatiques (INERIS, 2015).

L'INRS propose le remplacement du DCM par l'éthanol ou le cyclohexane, bien qu'il précise que cette utilisation entraîne un risque important d'incendie ou d'explosion (INRS, 2018). Cette substitution semble également représenter des enjeux techniques car il y est aussi précisé que « le procédé doit être adapté au nouveau solvant (coefficient de

¹²⁶ https://www.walter.com/documents/34301/40600/HTA219_E-WELD_Products_Brochure.pdf/de86b1cf-b3ac-413b-a0d4-66f8af86b067

¹²⁷ <https://www.sureweld.net/products/sistdb-preweld-the-works-welding-fluid-600ml.html>

solubilité/distillation) ». L'INRS propose également la substitution du DCM par un autre procédé, soit l'utilisation du CO₂ supercritique, sans toutefois, selon toute vraisemblance, en avoir fait l'analyse. En effet, on suggère que cette substitution « rend nécessaire des études et des investissements conséquents ». Le CO₂ supercritique est utilisé pour extraire diverses substances de végétaux, comme la caféine, la nicotine, les aromatisants, les parfums, les huiles essentielles et les lipides. Des huiles végétales peuvent également remplacer les solvants classiques comme agents d'extraction auxiliaires dans le CO₂ supercritique, utilisé p. ex. pour l'extraction de ces substances naturelles (Benaissi, 2013). Également, diverses réactions chimiques peuvent être effectuées dans le CO₂ supercritique (Wu et Han, 2013).

Dans le cas spécifique de la caféine, trois procédés sans DCM peuvent être utilisés dont deux procédés sans solvant. Le premier est l'utilisation de CO₂ supercritique à haute pression (Reddy et Saharay, 2019). En fait, Le CO₂ se trouve à être préparé à des températures et sous des pressions élevées lui conférant des propriétés de solvant organique. Ce changement a été fait par Maxwell House qui a remplacé le TCE, utilisé avant 1975, pour du DCM; le CO₂ supercritique a par la suite remplacé le DCM en 1987 (NIOSH, 1995). En effet, « certaines substances qui se retrouvent en phase gazeuse à la température et à la pression ambiantes peuvent agir comme des solvants si elles sont portées à des températures et à des pressions supérieures à leur point critique. Il s'agit d'une zone où les états gazeux et liquides existent en une seule phase de propriétés intermédiaires entre le liquide et le gaz, possédant notamment la mobilité du gaz et le pouvoir dissolvant du liquide. Le dioxyde de carbone (anhydride carbonique, gaz carbonique ou CO₂) est le fluide supercritique le plus utilisé à cause des conditions relativement faciles à atteindre (Bégin *et al.*, 2002[b]). Il suffit de températures supérieures à 31°C et de pressions dépassant 7,38 MPa (Lumia, 2002). Il se comporte alors comme un bon solvant apolaire » (Bégin *et al.*, 2020).

Le deuxième procédé est la méthode suisse ou extraction à l'eau, qui consiste à faire tremper les grains de café dans l'eau chaude quelques heures pour extraire la caféine des grains vers l'eau. La solution qui en résulte est filtrée au charbon actif qui retient les molécules de caféine tout en laissant les arômes; les grains de café sont ensuite séchés¹²⁸. La troisième méthode est la même que celle utilisée pour le DCM mais elle utilise plutôt l'acétate d'éthyle comme solvant¹²⁹; les grains de café sont alors immergés (méthode directe) dans une solution d'eau et d'acétate d'éthyle ou alors dans de l'eau chaude qui elle est séparée des grains et traitée au solvant (méthode indirecte); « la caféine se lie au solvant contenu dans l'eau et s'évapore. On trempe ensuite de nouveau

¹²⁸ <https://theconversation.com/comment-fabriquer-t-on-le-cafe-decafeine-et-est-il-vraiment-sans-cafeine-217052>

¹²⁹ <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/aliments-nutrition/participation-public-partenariats/avis-proposition-moderniser-listes-additifs-alimentaires-autorises/ebauche-solvants.html>

les grains sans caféine dans cette eau pour qu'ils réabsorbent les saveurs et les arômes du café »¹³⁰.

3.3.10 Analyses environnementales

Depuis plusieurs années, des chimistes allemands ont travaillé à remplacer le DCM en chimie analytique par des solvants moins dangereux. Un exemple est une méthode d'analyse spectrophotométrique où le DCM est absent et le méthanol devient le seul solvant utilisé (El-Maraghy, 2023). D'autres auteurs présentent aussi des solutions de rechange à l'utilisation du DCM employé en chromatographie (HPLC, TLC, chromatographie rapide sur colonne) en employant des mélanges de solvants moins toxiques incluant p. ex. l'acétate d'éthyle, l'éthanol, l'isopropanol et l'heptane avec ou sans additifs acides ou basiques (Lee *et al.*, 2024).

Cependant, il est difficile lorsqu'on parle d'analyse chimique de substituer une substance par une autre étant donné la grande standardisation qui est derrière les différents protocoles. D'ailleurs, en 2015, aucune substitution n'était envisagée par les laboratoires d'analyses chimiques (INERIS, 2015).

3.3.11 Synthèse chimique

Le 1,3-dioxolane, le diéthoxyméthane et le 2,5,7,10-Tetraoxaundecane sont utilisés comme solvants de synthèse pour la fabrication de produits chimiques organiques de base et de produits phytosanitaires (INERIS, 2015). Welton (2015) a aussi démontré que la synthèse de polycarbonates sans DCM était possible. Pour ce faire, plusieurs étapes sont nécessaires mais en résumé, de l'oxyde d'éthylène, du CO₂, du méthanol, du phénol et du bisphénol-A (BPA) sont ajoutés dans le processus à différents moments.

Dans le secteur industriel, le diméthoxyméthane pourrait être utilisé comme agent moussant dans la fabrication d'équipements automobiles et de matelas, mais il a aussi des effets nocifs (INERIS, 2015). Toujours selon les mêmes auteurs, « L'ADEME et la DRIRE Alsace (2005) ont étudié des options de réduction de COV pour la société Carpenter Pur S.A. qui produit de la mousse polyuréthane souple pour des applications dans l'ameublement ou la literie et qui transforme également des matériaux alvéolaires pour des applications industrielles. La solution mise en place n'a pas entraîné de modification de procédé. Le DCM (l'agent d'expansion) a été remplacé par du dioxyde de carbone. Le CO₂, liquide sous haute pression, est déposé sur un tapis motorisé. La détente de ce gaz provoque une expansion du mélange pâteux permettant la formation d'une mousse. Alors que cette solution a réduit les émissions de DCM de l'entreprise, ses émissions de CO₂ ont augmenté ».

¹³⁰ <https://theconversation.com/comment-fabrique-t-on-le-cafe-decafeine-et-est-il-vraiment-sans-cafeine-217052>

En ce qui concerne spécifiquement la manufacture de films photographiques, Kodak mentionne s'être tournée, entre autres, vers une stratégie numérique afin de limiter ses émissions de DCM¹³¹. En effet, un changement de la technologie dans l'industrie de la photo par l'arrivée de l'impression numérique et de l'imagerie de document ne nécessite plus de DCM. Finalement, « le plâtre médical peut être substitué par des bandes de résines sans plâtre » (INERIS, 2015).

3.3.12 Dentisterie

À titre d'agent adoucissant de la gutta-percha¹³²¹³³, plusieurs substances de la famille des alcènes (1,3-pentadiène, cyclopentène, isoprène, 2-méthyl-2-butène, 1,5-hexadiène) auraient démontré une efficacité aussi élevée que le DCM, alors que pour l'adhésion du polyméthylméthacrylate, des esters méthyliques à faible poids moléculaire, tels que le formate de méthyle et l'acétate de méthyle, seraient appropriés (Asmussen et Peutzfeldt, 2000).

3.3.13 Industrie de la fabrication et du recyclage des appareils électroniques

Certains auteurs ont testé 3 solvants de remplacement dans la préparation de cellules solaires de pérovskite afin d'obtenir une surface avec une bonne cristallinité : l'acétate de propyle, l'alcool isobutylique et l'isooctane. Parmi ces 3 solvants, l'acétate de propyle est le plus concluant (Chen, M.-X. *et al.*, 2021). Dans le domaine des batteries, le carbonate de propylène a pour sa part démontré un bon potentiel d'utilisation comme solvant de remplacement (Chen, L. *et al.*, 2022).

Les fluides supercritiques (eau ou CO₂) peuvent être utilisés pour recycler les panneaux PV utilisés pour capter l'énergie solaire. Un groupe de chercheurs a expérimenté la technologie de l'eau supercritique (ESC) en testant plusieurs solvants afin de traiter simultanément les déchets solides et les déchets organiques liquides: un solvant aqueux fait d'eau distillée à 100 %, un solvant aqueux fait à 70 % d'eau distillée et à 30 % de solvant organique (constitué de méthanol, d'acétonitrile et de chloroforme) ainsi que ce dernier solvant auquel du peroxyde d'hydrogène, un agent oxydant, a été ajouté. Cette technologie serait avantageuse par rapport aux méthodes physico-chimiques et thermiques étant donné la réutilisation des solvants supercritiques pour plus d'un procédé de traitement, tout en limitant l'utilisation de solvants toxiques et les rejets dans

¹³¹ <https://www.reliableplant.com/Read/5091/eastman-kodak-reduces-methylene-chloride-emissions->

¹³² Substance plastique et adhésive naturelle servant à obturer les canaux des dents lors des dévitalisations.

¹³³ <https://www.ecohabitation.com/guides/3717/recyclage-des-panneaux-solaires-photovoltaïques-en-fin-de-vie/>

l'environnement (Bisinotto Pereira *et al.*, 2023). Actuellement, ni cette technologie ni même le processus de recyclage ne semblent disponibles au Québec^{134,135}.

Plusieurs mélanges de solvants ont été testés par le TURI en remplacement du DCM afin d'enlever les revêtements protecteurs enrobant les cartes de circuits imprimés (Lu *et al.*, 2021). Parmi ceux-ci, on note le cyclohexane, les DBE et l'acétate d'éthyle.

3.3.14 Imprimerie et sérigraphie

Selon la compagnie John R. Hess & Company, Inc.¹³⁶, l'alcool isopropylique serait le solvant le plus utilisé dans l'industrie de l'imprimerie pour nettoyer des pièces imprimées formées de résines polyuréthane et d'époxy. Seul, l'alcool isopropylique ne possède toutefois pas le pouvoir de dissolution pour ces résines. Les auteurs indiquent que des éthers de glycol comme l'éther monométhylque du dipropylène glycol et l'éther monométhylque du tripropylène glycol sont souvent utilisés comme solvant pour la finition de surface des pièces imprimées.

Selon un partenaire œuvrant dans le domaine au Québec, dans certaines entreprises spécialisées en sérigraphie, un adhésif pour soies à base de DCM (RhinoTech, 2018) a été remplacé par un adhésif à base de 1,3-dioxolane (RhinoTech Inc., 2018) ou par un produit à base d'acétone (NBC Meshtec Americas Inc., 2021). Cependant, des utilisations du DCM demeurent présentes, notamment pour le nettoyage des outils (Nazdar Company, 2023).

L'élimination de l'utilisation de solvants pour cette utilisation est possible par le remplacement d'une presse à imprimer offset par une presse numérique pour l'impression d'enveloppes. Le nettoyage des blanchets par des solvants a aussi été éliminé par l'ajout du nettoyage automatique de ceux-ci (TURI, 2017).

3.3.15 Tannerie et mégisserie (cuir)

Selon certaines sources, les solvants organiques halogénés peuvent être presque complètement substitués dans tous les cas, que ce soit pour le nettoyage, le dégraissage, l'huilage de la peau ou comme agent post-tannage, sauf pour le nettoyage de la laine de Merino¹³⁷. Aujourd'hui, la majorité des agents de tannage sont de nature minérale, végétale ou encore font partie de la famille chimique des syntans, des aldéhydes et des huiles. L'agent le plus fréquemment utilisé (80-90 %) serait les sels de chrome (III) (Black *et al.*, 2013).

¹³⁴ <https://www.ecohabitation.com/guides/3717/recyclage-des-panneaux-solaires-photovoltaïques-en-fin-de-vie/>

¹³⁵ <https://www.economie.gouv.qc.ca/objectifs/informer/vecteurs/vecteurs-economie-et-innovation-detail/la-fin-de-la-vie-utile-de-millions-de-panneaux-denergie-solaire-souleve-le-defi-de-mettre-en-place-des-installations-de-recyclage-specialisees>

¹³⁶ <https://www.jrhessco.com/case-study-resin-removal-in-emerging-3d-print-technologies/>

¹³⁷ https://leatherpanel.org/sites/default/files/publications-attachments/bref_report_.pdf

4. DISCUSSION

4.1 Options de remplacement fréquemment identifiées dans la littérature

La présente section présente les différentes options de remplacement au DCM traitées dans la section 4.3 en les divisant en deux catégories : la première regroupe les solvants présentant les scores de VHR et de P2OASys les plus faibles, alors que la seconde discute des autres options de remplacement identifiées dans la revue de littérature. Ce classement doit cependant être utilisé avec prudence, car le contexte d'utilisation et le procédé associé peuvent faire varier les risques liés à la santé, à la sécurité et à l'environnement.

4.1.1 Solvants de remplacement à privilégier selon le VHR et la cote P2OASys

Dans un premier temps, il est possible d'analyser les options de remplacement à l'aide des outils quantitatifs que sont le VHR et la cote obtenue par P2OASys. Rappelons que le VHR et la cote P2OASys pour le DCM sont respectivement de 11447 et de 7,9 (voir Tableaux 6 et 8 en annexe) et que, plus les scores sont bas, meilleures seront les options de remplacement. Peu de solvants identifiés dans la section précédente possèdent un $VHR \leq 1000$ ainsi qu'une cote de $P2OASys \leq 6,0$. Les solvants de remplacement respectant ces deux critères sont rassemblés au Tableau 4; leur statut en vertu du programme *Safer Choice* apparaît également dans la colonne de droite. Le statut (cancérogène, mutagène et toxique pour la reproduction) des substances selon REACH (*Règlement de la Commission n° 2024/197, 2024 J.O., 1-19 [ECHA]*) ainsi que leur présence ou non dans la liste des substances préoccupantes de l'ECHA ont été vérifiés avant de les considérer comme de bonnes options de remplacement¹³⁸. Plusieurs de ces solvants avaient également été identifiés ou qualifiés dans une monographie antérieure comme des solvants verts étant, à différents degrés, respectueux de l'environnement ou sans danger pour ceux et celles qui sont exposés à ces produits (Bégin *et al.*, 2020).

¹³⁸ <https://echa.europa.eu/fr/candidate-list-table>

Tableau 4. Liste des solvants avec leur VHR, leur cote P2OASys et leur classement en vertu du programme *Safer Choice*

Substance	CAS	P2Oasys	VHR	Classement selon <i>Safer Choice</i>
Carbonate de propylène	108-32-7	3,5	10	Vert
Adipate diméthylique	627-93-0	3,5	53	Vert
Glutarate diméthylique	1119-40-0	3,6	219*	Vert
Éther monoéthylique de diéthylène glycol (DEGEE)	111-90-0	4,1	29	-
Éther monométhylique du diéthylène glycol (DEGME)	111-77-3	4,3	33	-
2-(2-Butoxyéthoxy)-éthanol (DEGBE)	112-34-5	4,5	8	Jaune
Méthylal (diméthoxyméthane)	109-87-5	4,5	526	-
Alcool benzylique (AB)	100-51-6	4,8	25	-
Lactate d'éthyle	97-64-3	4,6	987	Vert (demi)
Gamma-butyrolactone (GBL)	96-48-0	4,9	12	-
Succinate diméthylique	106-65-0	4,9	439	Vert
Acétate d'éthyle	141-78-6	5,1	307	-
Alcool isopropylique (isopropanol)	67-63-0	5,1	299	Vert
2-butoxyéthanol (2-BE)	111-76-2	5,3	58	-
Acétate de propyle	109-60-4	5,9	472	Vert
Diméthylsulfoxyde (DMSO)	67-68-5	5,9	16	-
d-limonène	5989-27-5	6	521	Jaune

*Calculé à partir d'une pression de vapeur à 20 °C

Le carbonate de propylène est peu volatil et possède un faible potentiel de surexposition (VHR=10). Son très faible score général de P2OASys (3,5) est signe d'une faible toxicité pour l'humain et de peu d'effets sur l'environnement rapportés, bien qu'il soit tout de même un dérivé pétrochimique. En analysant les scores des différentes catégories, seul l'effet aigu possède un score significatif, signe d'une irritation réversible pour les yeux. Dans une précédente monographie, une irritation modérée pour la peau et les yeux était déjà rapportée (Bégin, Beaudry, *et al.*, 2005). Le carbonate de propylène semble être une bonne option de remplacement au DCM d'un point de vue sanitaire et sécuritaire. Une VLE 8 h de 6 ppm est associée à cette substance en Suisse.

Les esters d'acides dicarboxyliques (DBE) (incluant l'adipate diméthylique, le glutarate diméthylique, ou le succinate diméthylique) apparaissent être des options de remplacement au DCM à privilégier. Ces substances présentent en effet des potentiels de surexposition faibles et des cotes de P2OASys faibles; elles sont de plus issues de sous-produits de synthèse du nylon et ont fait l'objet d'une monographie précédente (Bégin et Gérin, 1999). En vertu de son programme *Safer Choice*, l'U.S. EPA considère les trois DBE comme des substances peu préoccupantes pour la santé et l'environnement. Les DBE sont donc des solvants d'intérêt pour remplacer le DCM comme décapant, bien qu'ils aient été évalués comme moins efficaces que le DCM (temps d'attente beaucoup plus long donc nécessité de modifier la tâche de travail) (Morose *et al.*, 2020). Les DBE

semblent donc être des bonnes options de remplacement au DCM d'un point de vue sanitaire et sécuritaire. L'Allemagne propose des VLE 8 h situées entre 1,2 et 1,5 ppm pour ces 3 solvants séparément alors que pour les 3 combinés, une valeur de 0,75 ppm a été adoptée (Hartwig, 2023).

Plusieurs éthers de glycol apparaissent comme étant des options de remplacement intéressantes à partir des résultats de VHR et de la cote P2OASys obtenus, bien que par le passé, les dérivés de l'éthylène glycol (série E) aient été remplacés pour des raisons de toxicité pour la reproduction par les dérivés de propylène glycol (série P) (Gérin *et al.*, 1995; Miraval, 2022). Les éthers de glycol sont également des irritants cutanés, oculaires et des voies respiratoires tout en étant facilement absorbés par ces trois voies (Bégin *et al.*, 2002b). La plupart des éthers de glycol n'ont pas été évalués par l'U.S. EPA dans le cadre des produits certifiés *Safer Choice*. Finalement, ils sont des COV susceptibles de favoriser l'ozone troposphérique (Bégin *et al.*, 2002b). Le 2-BE (CAS 111-76-2), dérivé de l'éthylène glycol, a été largement utilisé en industrie, notamment dans les dégraissants, les décapants, les nettoyants et les peintures. Au regard de sa toxicité hépatique, le NIOSH aux États-Unis recommande une VLE de 5 ppm de 2-BE (10 h/jour, 40 h/sem). Un règlement spécifique sur le 2-BE existe depuis 2006 au Canada. Il limite par exemple la concentration de 2-BE à 0,1 % en poids dans les peintures en aérosol, à 2,0 % dans les décapants pour planchers et à 10 % dans les nettoyants pour automobiles. Sinon, certaines précautions sont à prendre avec trois autres éthers de glycol de série E mentionnés dans le tableau ci-dessus; le DEGBE est hépatotoxique et a des effets sur système endocrinien (VLE de 20 ppm selon l'Union européenne), le DEGME est associé à la phrase de risque H360 (« peut nuire à la fertilité ou au fœtus »)¹³⁹, alors que le DEGEE est mutagène/tératogène et neurotoxique (VLE de 6 ppm en Allemagne). Les éthers de glycol de la série P seraient donc à privilégier comme option de remplacement au DCM par rapport à ceux de la série E.

Le gouvernement du Canada a procédé à une évaluation des risques du méthylal (diméthoxyméthane) pour la santé et l'environnement (Environnement et Changement climatique Canada et Santé Canada, 2019). Le gouvernement conclut que le diméthoxyméthane n'est pas nocif pour la santé humaine aux concentrations d'exposition prises en compte dans l'évaluation et qu'il ne pénètre pas dans l'environnement à des concentrations qui sont nocives pour l'environnement. Cependant, le diméthoxyméthane est identifié comme ayant des effets de toxicité aiguë de catégorie 4 (INERIS, 2015), soit une toxicité aiguë orale, cutanée et par inhalation, ce qui ne semble pas être reflété dans P2OASys avec de faibles cotes pour ces catégories et une cote globale de 4,5. Cependant, selon l'outil P2OASys, l'irritation des yeux est aussi un effet rapporté. Le diméthoxyméthane semble toutefois être une bonne option de remplacement au DCM d'un point de vue sanitaire et sécuritaire. L'ACGIH recommande une VLE de 1000 ppm

¹³⁹ <https://echa.europa.eu/fr/brief-profile/-/briefprofile/100.003.551>

sur 8 h pour prévenir les effets d'irritation des yeux et des muqueuses et le potentiel de dépasser cette valeur est relativement faible (VHR = 526).

L'AB satisfait au critère énoncé à l'alinéa 64c) de la LCPE (L.C. 1999, c. 33), car cette substance « pénètre ou peut pénétrer dans l'environnement en une quantité, à une concentration ou dans des conditions de nature à constituer un danger au Canada pour la vie ou la santé humaines ». L'AB ne répond cependant pas aux critères énoncés aux alinéas 64a) et b) mais apparaîtra éventuellement dans l'annexe 1 de la LCPE.

Environnement et Changement climatique Canada et Santé Canada (2022) proposent un cadre de gestion pour l'AB concernant l'exposition humaine cutanée par certains produits de santé naturels et médicaments en vente libre. Il apparaît cependant que ce cadre de gestion ne concerne pas spécifiquement les travailleuses et travailleurs dans le contexte de la substitution du DCM. En effet, avec un VHR de 25, l'AB est l'un des solvants présentant le potentiel de surexposition le plus faible parmi ceux évalués dans cette monographie. De plus, le point d'éclair est élevé (93 °C). L'AB semble donc être une bonne option de remplacement au DCM d'un point de vue sanitaire et sécuritaire, bien qu'une irritation des yeux et une sensibilisation cutanée soient possibles (*Règlement de la Commission n° 2024/197*, 2024 J.O., 1-19). L'Allemagne a récemment établi une VLE de 5 ppm sur 8 h pour cette substance (Hartwig, 2023).

« Le lactate d'éthyle est peu toxique pour les organismes aquatiques et aisément biodégradables. Son potentiel de formation d'ozone troposphérique est faible et son potentiel de déplétion de l'ozone stratosphérique est nul »¹⁴⁰. Chez les travailleuses et travailleurs, il peut causer l'irritation des muqueuses et de la sensibilisation cutanée¹⁴¹; une VLE de 5 ppm lui a été octroyée par la Finlande.

Bien qu'ayant été identifiée comme solvant avec un faible potentiel de surexposition, la GBL n'est pas sans danger; cette substance est notamment utilisée pernicieusement comme « drogue du viol » (Nisse, 2015) et peut causer la mort dans un contexte de polyconsommation. La phrase de risque « lésions oculaires graves » est aussi associée à ce solvant. Toutefois, les très faibles scores de VHR (12) et de P2OASys (4,9) favorisent l'utilisation de cette substance qui a une VLE de 50 ppm en Finlande. Cette substance semble donc être une option de remplacement au DCM, mais des précautions doivent être prises pour prévenir des effets sanitaires potentiels.

L'acétate d'éthyle est un solvant très inflammable avec un point d'éclair à -4 °C; le risque à la sécurité doit donc être considéré lors d'un projet de substitution. Il est fortement volatil, mais en comparaison au DCM, c'est une option de remplacement envisageable car le VHR de l'acétate d'éthyle est de 307. Toutefois, ce dernier solvant n'est pas

¹⁴⁰ Cet extrait est tiré de Bégin *et al.* (2020).

¹⁴¹ https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=10041

atoxique¹⁴². En effet, l'acétate d'éthyle a une TLV-TWA de l'ACGIH¹⁴³ de 400 ppm afin de minimiser le potentiel irritant du nez, des yeux et des voies respiratoires supérieures. L'acétate d'éthyle ne figure toutefois pas dans le programme *Safer Choice*, mais peut être biosourcé à partir de glucides. L'acétate de propyle, quant à lui, présente aussi un risque d'inflammabilité avec un point d'éclair à 12,8 °C¹⁴⁴. Malgré sa plus faible volatilité que celle de l'acétate d'éthyle, son VHR est plus élevé avec une valeur de 472, mais ce solvant est considéré comme une substance peu préoccupante pour la santé et l'environnement en vertu de son classement selon le programme *Safer Choice* (vert). Ces deux substances constituent donc être des options de remplacement au DCM.

L'isopropanol est très inflammable avec son point d'éclair à 11,7 °C¹⁴⁵. Il est de plus explosif et réactif au contact d'oxydants puissants¹⁴⁶. Il est irritant pour les yeux et les voies respiratoires, mais également pour la peau dans une moindre mesure¹⁴⁷. Ses impacts sur la santé étant limités et sa fabrication étant possible à partir de glucides (biosourcé) (Ko *et al.*, 2022), l'isopropanol a déjà été considéré comme un solvant vert (Bégin *et al.*, 2020). Une VLE de 200 ppm a été adoptée par l'ACGIH¹⁴⁸.

Le DMSO est généralement décrit comme peu toxique pour l'humain et le *Règlement sur les produits dangereux* (RPD) (DORS/2015-17 (Gaz. Can. II)) n'exige pas qu'il soit divulgué dans la section 3 (Composition/Information sur les ingrédients) des FDS au Canada. En effet, le DMSO ne répond à aucun des critères concernant les classes de dangers pour la santé, en vertu du RPD. Le problème principal rapporté du DMSO est qu'il passe facilement à travers la peau¹⁴⁹. Ce solvant pourrait alors entraîner d'autres substances toxiques dans l'organisme par contact cutané. Le DMSO est toutefois peu toxique et possède un point d'éclair élevé (87 °C)¹⁵⁰. La valeur de sa VLE en Allemagne correspond à 50 ppm. Le DMSO semble donc être une bonne option de remplacement au DCM d'un point de vue sanitaire et sécuritaire.

¹⁴² https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=166

¹⁴³ <https://www.acgih.org/ethyl-acetate/>

¹⁴⁴ https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/pages/fiche-complete.aspx?no_produit=406

¹⁴⁵ https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=828#:~:text=Le%20CIRC%20rapporte%20qu'environ,expir%C3%A9%20et%20dans%20l'urine

¹⁴⁶ https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=fr&p_card_id=0554

¹⁴⁷ https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=828#:~:text=Le%20CIRC%20rapporte%20qu'environ,expir%C3%A9%20et%20dans%20l'urine

¹⁴⁸ <https://www.osha.gov/chemicaldata/475>

¹⁴⁹ https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=7708

¹⁵⁰ https://www.inrs.fr/dms/ficheTox/FicheFicheTox/FICHETOX_137-1/FicheTox_137.pdf

Le d-limonène est un solvant biosourcé extrait des pelures d'agrumes. En vertu de son programme *Safer Choice*, l'U.S. EPA considère le d-limonène comme une substance présentant certains dangers (triangle jaune). L'organisation rapporte notamment qu'en raison de sa toxicité potentielle pour les organismes aquatiques, le d-limonène ne peut pas être utilisé dans des produits à libération directe dans l'environnement. De plus, à cause du potentiel d'accélération de la formation de produits d'oxydation, le d-limonène ne peut pas être utilisé en combinaison avec des oxydants, comme le peroxyde d'hydrogène (H₂O₂). Chez l'humain, il est un sensibilisant et hépatotoxique; des mesures de protection peuvent cependant être prises dans les milieux de travail pour protéger des risques d'allergie cutanée. Il serait tout de même une bonne option à envisager dans certains contextes. En Allemagne, sa VLE est de 5 ppm.

4.1.2 Autres options de remplacement

Parmi les solvants de remplacement qui ne respectent pas les 2 critères identifiés ci-dessus, on note le méthacrylate de méthyle. Celui-ci est un sensibilisant respiratoire et cutané et est très inflammable (point d'éclair à 10 °C) (CNESST, 2024), ce qui lui attribue une cote de 6,9 selon P2OASys, alors que son VHR est de 1013. Il ne serait donc pas une option à privilégier pour le remplacement du DCM.

La NMP a été identifiée comme une solution de rechange au DCM dans plusieurs applications, alors qu'il était déjà question de la remplacer dans les décapants en 2017 (Morose *et al.*, 2017) et dans les peintures en 2018 (Virenfeldt *et al.*, 2018) en raison de sa toxicité. L'administration américaine Obama avait même proposé de la bannir en 2017¹⁵¹. La NMP peut avoir des effets sur le fœtus durant la grossesse (Bégin et Gérin, 1999). Les autres effets varient de l'irritation de la peau en allant jusqu'à celle des voies respiratoires, en passant par une toxicité oculaire (Bégin et Gérin, 1999; Bégin *et al.*, 2002b; Bégin, Moumen, *et al.*, 2005). Les scores de P2OASys font aussi ressortir le caractère toxique de cette substance pour les catégories effets aigus et chroniques, alors que sa faible volatilité lui confère un faible VHR. Le comité des WEEL¹⁵² (*Workplace Environmental Exposure Level*) a déterminé des VLE pour la NMP : 15 ppm (8 h), 30 ppm (15 min), notation peau; la toxicité sur le développement a été considérée comme l'effet critique (*Workplace environmental exposure level guide: n-Methyl-2-pyrrolidone*, 2022). L'U.S EPA met également en évidence les risques aigus et chroniques de toxicité de la NMP sur le développement à la suite d'une exposition principalement par voie cutanée pour les femmes enceintes et pour celles en âge de procréer, notamment si exposées plus de 4 heures en une journée. Le 14 juin 2024, l'U.S. EPA publiait un projet de règlement concernant ce solvant (*n-Methylpyrrolidone (NMP); Regulation under the Toxic Substance Control Act (TSCA)*, 89 Fed. Reg., 51134 (14 juin 2024)); son intention était d'interdire la plupart des utilisations de la NMP en raison de ses propriétés toxiques pour

¹⁵¹ <https://cen.acs.org/safety/consumer-safety/Replacing-methylene-chloride-paint-strippers/96/i24>

¹⁵² <https://www.tera.org/OARS/index.html>

la reproduction. Seules quelques utilisations seront permises, mais un programme sévère de protection des travailleuses et travailleurs serait alors exigé des employeurs. L'Agence ne propose pas de VLE dans l'air des lieux de travail, car son évaluation du risque a démontré que le risque toxique principal provient du contact cutané avec le solvant. Le programme de protection des travailleuses et travailleurs proposé par l'U.S. EPA est d'ailleurs axé sur le contact cutané. Pour diminuer le risque, en attendant une réglementation spécifique, l'U.S. EPA recommande que soient prises diverses mesures de réduction de l'exposition, particulièrement le port de gants protecteurs. À noter qu'il n'existe pas de VLE dans la réglementation québécoise pour ce solvant et que l'ACGIH n'a pas évalué cette substance¹⁵³. D'autres VLE sont par ailleurs proposées: 3,6 ppm est en vigueur en Suède¹⁵⁴, alors qu'une VLE de 400 mg/m³ (98,7 ppm) est applicable en Ontario¹⁵⁵. En janvier 2024, Environnement et Changement climatique Canada et Santé Canada (2024b) ont publié une mise à jour de leur ébauche d'évaluation de la NMP en vertu de la LCPE (*Loi sur le renforcement de la protection de l'environnement pour un Canada en santé*, L.C. 2023, c. 12). Leur conclusion est la suivante : « Compte tenu de tous les renseignements contenus dans la présente ébauche d'évaluation mise à jour, il est proposé de conclure que la NMP est une substance qui satisfait aux critères énoncés à l'alinéa 64c) de la LCPE (L.C. 1999, c. 33), car elle pénètre ou peut pénétrer dans l'environnement en une quantité, à une concentration ou dans des conditions qui constituent ou peuvent constituer un danger pour la vie ou la santé humaine au Canada » (Environnement et Changement climatique Canada et Santé Canada, 2024b). La NMP ne semble donc pas être une option de remplacement au DCM d'un point de vue sanitaire. À noter que, bien qu'elle ait un VHR de 23, sa cote P2OASys est de 7. En cas d'utilisation, des mesures de maîtrise doivent être mises en place pour limiter l'exposition, notamment celle des femmes enceintes ou qui allaitent.

Le DMF est classé 2A (probablement cancérigène pour l'humain) par le CIRC (IARC, 2018). La FDS de certaines préparations de décapant à base de DMF indique d'ailleurs que le décapant « peut provoquer le cancer » et « peut nuire à la fertilité ou au fœtus » (Recochem, 2019). En décembre 2023, une sévère restriction concernant le DMF entrait en vigueur en Europe en raison de sa toxicité développementale¹⁵⁶. Il est désormais interdit de mettre sur le marché une préparation contenant du DMF en concentration égale ou supérieure à 0,3 % sans que les fabricants et les utilisateurs mettent en œuvre les moyens de maîtrise nécessaires à réduire l'exposition par inhalation en deçà de 6 mg/m³ et à 1,1 mg/kg/jour pour l'exposition cutanée. Pour sa part, l'ACGIH a publié en mars 2018 sa dernière recommandation de VLE pour le DMF de 5 ppm sur 8 h pour

¹⁵³ <https://www.acgih.org/n-methyl-2-pyrrolidone/>

¹⁵⁴ <https://www.av.se/globalassets/filer/publikationer/foreskrifter/hygieniska-gransvarden-afs-2018-1.pdf>

¹⁵⁵ <https://www.ontario.ca/fr/page/limites-dexposition-professionnelle-actuelles-pour-les-milieus-de-travail-en-ontario-en-vertu>

¹⁵⁶ <https://echa.europa.eu/documents/10162/3dfadfb-a9bd-9b66-4868-153dd9034b7b>

prévenir les dommages au foie et l'irritation oculaire et des voies respiratoires supérieures¹⁵⁷. Au Québec, la VLE était fixée à 30 mg/m³ (8 h) jusqu'à récemment, accompagnée d'une notation indiquant qu'une contribution significative à l'exposition totale est possible par la voie cutanée. Depuis le 14 mars 2024 (*Règlement modifiant le Règlement sur la santé et la sécurité du travail*, 2024, Décret 280-2024 (G.O. II)), la VLE québécoise est fixée à 5 ppm (8 h), toujours accompagnée d'une notation concernant le contact cutané et avec l'ajout d'une notation selon laquelle la cancérogénicité de ce solvant est démontrée chez l'animal. Il n'y a aucune réglementation au Canada limitant la concentration de DMF dans les préparations commerciales, mais le DMF est sur la liste des substances à risque plus élevé du TURI (Executive Office of Energy and Environmental Affairs, 2016). Plusieurs équipes de recherche ont étudié le remplacement du DMF dans divers secteurs industriels. À titre d'exemple, le DMF est largement utilisé dans la fabrication du cuir synthétique à base de polyuréthane. En collaboration avec le fabricant Nike, des chercheurs du Berkeley Center for Green Chemistry de l'Université de Californie ont proposé cinq avenues différentes pour le remplacer. Les solvants recommandés étaient le dihydrolévo-glucosénone (dont le nom commercial est Cyrène™), l'isosorbide de diméthyle, la γ -valérolactone, le méthoxycyclopentane, et le glycofuroil (Ramphal *et al.*, 2019). Le DMF ne semble donc pas être une option de remplacement au DCM d'un point de vue sanitaire. Ceci est mis en évidence par un VHR de plus de 1000, signe d'un fort potentiel de surexposition, et une cote P2OASys de 6,8. Il est possible d'employer des produits moins dangereux. En cas d'utilisation, des mesures de maîtrise doivent être mises en place pour limiter l'exposition au minimum considérant le risque cancérogène.

Concernant les solvants à base de naphta ou coupes pétrolières dont le solvant Stoddard, plusieurs effets peuvent leur être associés. Tel que noté dans certaines FDS (Recochem Inc., 2023b, 2024), « le pétrole contient des hydrocarbures aromatiques (benzène, toluène, éthylbenzène, naphtalène) et aliphatiques (n-hexane), qui peuvent entraîner de nombreux effets néfastes sur la santé, notamment le cancer, la formation de tumeurs, la perte auditive et la toxicité pour le système nerveux ». D'ailleurs, en vertu de l'article 64 de la LCPE, Environnement et Changement climatique Canada et Santé Canada (2024a) concluent que 17 mélanges du groupe des naphas satisfont à un ou plusieurs des critères pour être considérés comme des substances toxiques. Cela signifie qu'à la suite de la période de consultation se terminant le 15 mai 2024¹⁵⁸, le Gouvernement du Canada pourrait placer ces mélanges d'hydrocarbures sur la liste des substances toxiques de la LCPE. Un cadre de gestion des risques final serait alors publié par le Gouvernement du Canada pour ces substances. C'est probablement pour toutes ces raisons que, déjà en 2013, on cherchait à les remplacer (Boyle, 2013). Toujours dans la famille des

¹⁵⁷ <https://www.acgih.org/dimethylformamide/>

¹⁵⁸ <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/evaluation-substances-existantes/cadre-gestion-risques-groupe-naphas-bas-point-ebullition.html>

hydrocarbures, le n-hexane est également neurotoxique chez l'humain, ce qui lui confère une cote P2OASys de 6,9; les effets aigus et chroniques sur la santé cotent respectivement à 10 et à 9. En effet, le n-hexane est bien connu pour être responsable à long terme d'une neuropathie périphérique, en plus d'augmenter le risque d'incendie (CNESST, 2023). Le VHR du n-hexane est de 4026. Les substances chimiques de cette catégorie ne sont donc pas des options envisageables pour le remplacement du DCM.

Certains éthers de glycol sont non seulement toxiques, mais ne répondent pas aux critères de VHR et de P2OASys sélectionnés dans la présente monographie. Par exemple, le 2-méthoxyéthanol a un VHR de 125000 et est un reprotoxique auquel est associée la phrase de danger « Peut nuire à la fertilité. Peut nuire au fœtus (H360FD) » et dommages aux organes du SGH (INRS, 2014). Bien que la cote globale P2OASys de ce dernier (6) soit plus faible que celle du DCM, les cotes associées à la santé humaine sont comparables à celles du DCM.

L'acide acétique glacial est un liquide corrosif avec un pH inférieur à 2. Des effets de corrosion cutanée et de lésions oculaires graves sont possibles. La VEMP qui lui est associée au Québec est relativement sévère (25 mg/m³ ou 10 ppm) (*Règlement sur la santé et la sécurité du travail*, R.L.R.Q., c. S-2.1, r. 13). Bien que sa cote P2OASys soit de 5,8, son VHR est de 2066¹⁵⁹. La substitution du DCM par l'acide acétique glacial est donc à proscrire.

D'autres substances ont été répertoriées, mais certaines données associées sont manquantes. Par exemple, aucune VLE n'a été trouvée pour le polychloroprène. Il ne semble pas y avoir de problème avec ce composé du point de vue de l'hygiène du travail; un problème important surviendrait toutefois lors d'un incendie de colle à base de celui-ci, car il y aurait production de chlorure d'hydrogène. Cette colle étant largement employée pour coller des pièces de mousse de polyuréthane dans l'industrie du meuble rembourré, un incendie générerait aussi de la fumée comprenant des produits de décomposition et de dépolymérisation du polyuréthane, comme de l'acide cyanhydrique et des diisocyanates. Ce produit n'est pas évalué par le programme *Safer Choice*, mais est toutefois certifié *Greenguard gold* étant donnée sa faible teneur en COV¹⁶⁰.

4.2 Limites et défis

4.2.1 Outils de sélection de solvants

Le VHR est un outil d'aide à la décision qui devrait être largement utilisé dans les projets de substitution afin de se prononcer sur une alternative potentielle. Le VHR (sans unité) représente la propension d'un solvant à dépasser sa propre VLE. Une attention

¹⁵⁹ Notons que la pression de vapeur à 20 °C a été utilisée pour le calcul.

¹⁶⁰ <https://asid.ecomedes.com/products/simalfa/simalfa-309>

particulière doit être portée au choix de cette VLE utilisée dans le calcul puisque pour être considéré comme un outil d'aide à la décision pour évaluer le risque sanitaire en lien avec l'inhalation des vapeurs de solvants, seules des valeurs sanitaires devraient être utilisées.

P2OASys permet à l'utilisateur d'avoir le détail de l'évaluation par catégorie et ainsi, d'identifier les éléments qui pourraient être préoccupants. L'objectif de cet outil est de comparer différentes substances entre elles et non pas d'attribuer une cote absolue à une substance en particulier¹⁶¹; P2OASys évalue également les mélanges. L'utilisateur a cependant la liberté d'adapter l'outil à sa réalité en mettant plus ou moins d'emphasis sur une catégorie. Il faut être prudent avec l'utilisation de cet outil; en effet, les données saisies dans le système sont basées sur celles apparaissant dans les FDS alors que les données pourraient changer dans le temps. Debia *et al.* (2011) rapportent que la bioconcentration, le score attribué à la composition en COV et la CL50 chez le poisson sont les trois paramètres qui influencent le plus le résultat de l'indice utilisé dans P2OASys sans l'utilisation des facteurs de pondération. Les auteurs concluent que cet indice, utilisé sans pondération, serait largement orienté vers la prévention de la pollution, ce qui représenterait un risque de sous-estimer certains enjeux associés à la santé et sécurité, comme la tension de vapeur et l'inflammabilité.

Tel que résumé dans Bégin *et al.* (2020), pour un usage professionnel au Québec, les produits certifiés *Green Seal*, *Safer Choice* ou ECOLOGO devraient être privilégiés. En effet, des certifications comme ECOLOGO, *Green Seal* ou *Safer Choice* considèrent aussi bien des critères de santé, de sécurité que d'environnement, excepté que les deux dernières prennent en compte différents paramètres comme la cancérogénicité (classement du CIRC) ou les substances PBT. Cependant, seule la dernière évalue des préparations et des solvants purs. Les autres sont très orientées vers l'une ou l'autre des préoccupations (environnement par exemple). Une autre norme nord-américaine, la norme *Biopreferred*, vise à augmenter l'utilisation de produits biosourcés, c'est-à-dire à haute teneur en carbone organique récent, issus notamment de la foresterie et de l'agriculture¹⁶². Ainsi, aucune étiquette nord-américaine ne permet d'avoir la certitude que tous les aspects à considérer pour faire une démarche de substitution sans transfert de risque n'existe.

Les facteurs considérés dans les outils rejoignent certains des principes de la chimie verte ou encore, les critères utilisés dans les certifications comme *Safer Choice*. La considération de plusieurs éléments dans un seul et même indice peut entraîner des substitutions inadéquates pouvant se traduire par des risques pour la santé des travailleuses et travailleurs. Ainsi, il n'existe pas d'outil infaillible sous la forme de logiciel ou autre pour trouver la meilleure solution de rechange à l'utilisation d'un solvant

¹⁶¹ <https://p2oasys.turi.org/About#EHS>

¹⁶² Un seuil minimal de teneur en carbone biosourcé de 25 % a été fixé (Comité européen de normalisation [CEN], 2017).

problématique; il peut donc être difficile de conclure sur la vertitude ou la durabilité d'un solvant particulier car cela dépend toujours de son contexte d'utilisation. Un solvant de remplacement qui respecte tous les critères qu'un solvant doit satisfaire ou qui est complètement inoffensif est pratiquement impossible, tout est donc une question de compromis lors du choix du meilleur solvant. À noter également que l'analyse a été faite à partir des informations disponibles sur les substances actives et non sur les mélanges.

Tel que mentionné dans une publication : « En plus de permettre la comparaison des solvants, les logiciels SUBTEC et PARIS II sont les seuls outils qui proposent des solutions de rechange à un solvant problématique sous la forme de mélanges de solvants de remplacement. L'absence actuelle de disponibilité de ces outils milite en faveur de l'étude d'autres outils disponibles sur le marché pour la formulation des mélanges de solvants (p. ex. Shell BlendPro) même s'ils sont limités en termes de comparaison des dangers (point d'éclair, taux d'évaporation) » (Bégin *et al.*, 2008). Des bases de données spécialisées sous forme de fichier Excel, comme celle de l'OPPBTP¹⁶³, présentent un grand intérêt pour aider les entrepreneurs français à choisir la préparation commerciale appropriée aux travaux de décapage de façade (Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics [OPPBTP], 2019). Le fichier contient des informations sur 102 décapants commerciaux disponibles dans l'hexagone. Malheureusement, on ne peut utiliser directement cet outil au Québec car les décapants commerciaux référencés dans le fichier Excel n'y sont pas disponibles. Cependant, un tel outil adapté aux préparations disponibles au Québec serait utile dans les chantiers. Les Allemands possèdent des outils semblables, mais disponibles uniquement dans la langue de Goethe. Le développement de bases de données spécialisées ou encore la publication de nouvelles fiches de substitution sur des applications spécialisées demeurent des développements souhaitables pour aider les intervenantes et intervenants à choisir des options de remplacement dans un projet de substitution de solvants.

4.2.2 Réglementation

Lors de la revue de littérature, plusieurs produits commerciaux ont été identifiés. Les produits commerciaux sont assujettis au *Règlement sur les produits chimiques et contenants de consommation* (RPCCC) (DORS/2021-269 (Gaz. Can. II)), ce qui ne représente aucune obligation d'être en conformité avec le SGH et ainsi, de produire une FDS, contrairement à ce que stipule la *Loi sur les produits dangereux* (L.R.C. 1985, c. H-3). De plus, ces FDS sont souvent non conformes au *Règlement sur les produits dangereux* (DORS/2015-17 (Gaz. Can. II)). Ainsi, la réglementation fédérale n'empêche pas une travailleuse ou un travailleur de s'approvisionner lui-même et de faire sa tâche

¹⁶³ <https://www.preventionbtp.fr/ressources/documentation/fiche-pratique/je-choisis-le-decapant-facade-qui-convient-a-mon-utilisation>

sans FDS ou avec une FDS incomplète; ces produits facilement accessibles peuvent donc être largement utilisés par des PME au Québec.

Plusieurs enjeux avec les FDS de ces produits commerciaux ont été identifiés. Par exemple, la FDS du Circa 1850 Super D-Solver Gel Stripper sans DCM serait inflammable, mais on n'y indique pas le point d'éclair (Swing Paints, 2018b). D'autres problématiques peuvent également être rencontrées lorsqu'une FDS ne rapporte pas précisément des plages de concentration : lorsque l'identification des composantes d'un produit est absente pour des raisons de secret commercial sans pour autant qu'il n'y ait de n° d'autorisation spécifié, et lorsque les exigences de divulgation diffèrent selon les juridictions. Par exemple, tel que décrit à la section 5.1.1, la FDS en français d'un décapant fabriqué au Québec ne divulgue pas la présence du DMSO (Kalium Solutions Inc., 2018a), contrairement à la fiche en anglais destinée aux États-Unis (Kalium Solutions Inc., 2018b) et à la fiche technique (SuperDécapant inc., 2019). À noter qu'il n'y a pas seulement la présence ou non de DMSO qui les distingue, mais également le % de 1,3-dioxolane (5-40 % en anglais et 20-22 % en français) (SuperDécapant inc., 2023a, 2023c).

Un autre exemple de fiche erronée est celle d'un décapant contenant principalement du DMF (Recochem Inc., 2023a); en effet, il y a des plages de concentration avec le signe <, ce qui n'est pas permis par le RPD (*Règlement sur les produits dangereux*, DORS/2015-17 (Gaz. Can. II)). Pour la protection des mains, la section 8.2 indique : « Porter des gants appropriés ». Cette consigne est nettement insuffisante, car il appartient aux employeurs de trouver l'information, ce qui n'est pas facile pour les PME. Dans cette même section, on réfère à la norme générale européenne EN 374, alors que cette fiche est prévue pour le Canada. Le problème vient aussi du fait qu'on a affaire à un mélange de solvants dans ce décapant à peinture. Finalement, toujours dans cette même fiche, il est noté à la section 15.1 que le DMF est classé 2A selon IARC, alors qu'à la section 11.1, il est inscrit « n'est pas classé comme cancérigène », ce qui démontre que plusieurs erreurs se trouvent dans les FDS et qu'il faut faire preuve de prudence lors d'une démarche de substitution. Pour plus d'informations sur les « Non-conformités les plus courantes » des FDS, il est possible de consulter la section du même nom sur le site web du SIMDUT¹⁶⁴.

Rappelons que plusieurs solvants de remplacement identifiés et déjà disponibles sur le marché n'ont pas de VLE. Le RSST se base principalement sur les valeurs de l'ACGIH. Toutefois, l'ACGIH n'a pas évalué l'ensemble des solvants et très peu de solvants de remplacement. De plus, lorsque l'on compare des VLE de la France à des recommandations de l'ACGIH pour plusieurs solvants, on constate que plusieurs valeurs sont inférieures en France, tel qu'il l'a été démontré dans une nouvelle parue sur le site

¹⁶⁴ <https://simdut.org/fds/s8/>

web Solub¹⁶⁵. Les hygiénistes doivent ainsi effectuer des revues de littératures afin d'identifier des recommandations de valeurs sanitaires récentes. Le Tableau 6 en annexe peut être utilisé pour identifier des valeurs de référence pour des solvants de remplacement au DCM; plusieurs des valeurs de cet annexe sont issues du système GESTIS¹⁶⁶.

La réglementation semble avoir eu un plus grand impact sur l'exposition au DCM lorsqu'elle vise à interdire carrément sa présence dans certaines formulations, comme on peut le voir à la Figure 3 à l'Annexe D; rappelons que l'utilisation du DCM est très restreinte en Europe depuis 2012. Il est donc très bien accueilli que de nouvelles réglementations se mettent aussi en place aux États-Unis afin d'interdire ou de limiter l'utilisation de ce solvant. Cependant, par le passé, les dangers de réglementer substance par substance ainsi que de la politisation et même de la judiciarisation¹⁶⁷ de la science ont été démontrés; tous ces éléments ajoutent des délais. Pour ce faire, l'OSHA s'est doté de procédures réglementaires priorisant les études démontrant avec évidence des effets chez les animaux aux études épidémiologiques ainsi que les études démontrant un effet plutôt que celles démontrant l'absence d'effets tout en visant la prévention (Jacobs *et al.*, 2010).

La substitution est un élément central de la réglementation REACH en Europe depuis 2006 (*Règlement de la Commission n° 1907/2006*, 2006 J.O. (L 396), 1-849). Le 1^{er} mars 2024, la Commission européenne organisait d'ailleurs un atelier à Bruxelles dans le cadre d'une vaste étude dont le but est d'accélérer le processus de substitution des substances dangereuses¹⁶⁸. Par ailleurs, la Belgique publiait en novembre 2023 un volumineux rapport intitulé « *Development of a Strategic Roadmap for the Substitution of SVHC¹⁶⁹ as part of a Sustainable Economy* » (Belgian FPS of Economy and the FPS of Public Health, 2023). Au Québec, on pourrait croire que l'article 39 du RSST protège les travailleuses et travailleurs en favorisant la substitution. Cependant, celui-ci ne serait pas utilisé pour émettre des dérogations ni pour rendre une décision d'arrêt de travail. Contrairement à l'article 10.16 du RCSST, on y retrouve la présence des mots « Autant que possible » (RSST, R.L.R.Q., c. S-2.1, r. 13).

D'un point de vue environnemental, la réglementation canadienne actuelle sur les COV exclut de sa définition les solvants chlorés et l'acétone (*Loi canadienne sur la protection*

¹⁶⁵ <https://solub.irsst.qc.ca/solvants-france-versus-quebec/>

¹⁶⁶ <https://limitvalue.ifa.dguv.de/>

¹⁶⁷ La Cour suprême des États-Unis s'est prononcée sur ce qu'était un risque acceptable (Jacobs *et al.*, 2010).

¹⁶⁸ https://www.environmentalpolicyandeconomics.com/getattachment/News/January-2024/Workshop-for-substitution-of-targeted-hazardous-ch/Working-Paper-Substitution-Planning_Final.pdf.aspx?lang=en-GB

¹⁶⁹ *Substances of Very High Concern* ou substances extrêmement préoccupantes.

de l'environnement, L.C. 1999, c. 33). Cette définition des COV ne favorise donc pas le remplacement du DCM par des options avec moins de COV.

Ainsi, bien qu'elle ne soit pas toujours garante de la protection du public, la réglementation est nécessaire et constitue une intervention de prévention primordiale. La prévention primordiale consiste en des actions qui visent la modification et l'élimination des facteurs de risques à une échelle globale (p. ex. l'interdiction de produits chimiques) (adapté de Fournier *et al.* (2023)). La présente monographie permet de mettre en évidence 3 modifications réglementaires à envisager afin d'agir en prévention primordiale :

- Modifier le règlement canadien qui exclut actuellement le DCM comme COV alors qu'il est un COV par définition;
- Modifier le RSST pour abaisser la norme de 50 ppm (cela forcerait les milieux de travail à faire de la substitution plutôt que d'utiliser un APR autonome);
- Interdire des décapants contenant du DCM.

Afin de favoriser au Québec le remplacement des solvants traditionnels par des options vertes, le législateur pourrait s'inspirer de la *Loi sur la réduction des toxiques de l'État du Massachusetts (Massachusetts Toxics Use Reduction Act, ch. 211 (Mass. 2018))*, qui offre des ressources pour aider concrètement les entreprises à mettre en œuvre leurs projets de substitution de substances toxiques. Par exemple, l'assistance du laboratoire du TURI comprend notamment une visite de site, l'évaluation du procédé, le prélèvement d'échantillons (contaminants et pièces), l'identification d'options de remplacement, des tests de performances avec le solvant à substituer et avec les options de remplacement¹⁷⁰.

4.2.3 Écoblanchiment

Selon le Grand dictionnaire terminologique de l'Office québécois de la langue française¹⁷¹, l'écoblanchiment est, par définition, une « opération de relations publiques menée par une organisation, une entreprise pour masquer ses activités polluantes et tenter de présenter un caractère écoresponsable¹⁷² ». « Cet organisme propose également les synonymes suivants : mascarade écologique, blanchiment vert et verdissage d'image alors que le terme « *greenwashing* » doit être évité. Il peut également être défini comme un acte de

¹⁷⁰ <https://www.turi.org/resources-for-switching-from-tce-and-other-halogenated-solvents/>

¹⁷¹ http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8365406

¹⁷² La même organisation définit la notion d'écoresponsable ainsi : « Alors que le concept de « responsable » touche aux trois dimensions du développement durable (environnement, société et économie), le préfixe éco-, formé à partir de l'adjectif écologique, a un sens restreint et concerne davantage la dimension de l'environnement naturel. »

tromperie des consommateurs concernant les pratiques environnementales des organisations ou les bénéfices environnementaux d'un produit ou d'un service »¹⁷³.

Plusieurs cas d'information erronée ou inadéquate ont été identifiés lors de la présente recherche. Par exemple, la FDS du Décolleur intelligent comporte certaines informations inexactes (Surf-Pro, 2018). À titre d'exemple, la fiche indique que le produit est « biodégradable », ce qui est trompeur, car il contient entre 60 et 100 % de DCM. Pour être biodégradable, un produit doit respecter l'essai sur la biodégradabilité n° 301 de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) (OCDE, 2013)¹⁷⁴. De plus, l'utilisation de mots à la mode comme « intelligent » vise à tromper l'utilisateur. Un autre exemple est une préparation à base de DMF qui contient également de l'acétate de méthyle (Recochem, 2019), très inflammable et qui se métabolise rapidement en méthanol dans l'organisme. Un fabricant montréalais indique cependant sur son site Web que son décapant à base de DMF est « non toxique »¹⁷⁵. Toute cette désinformation ne contribue pas à favoriser des démarches de substitution éclairée.

Un autre exemple d'écoblanchiment qui peut être fourni est situé sur le site Web d'un fabricant de café, mentionné précédemment, qui utilise du DCM pour la décaféination de celui-ci. En effet, ce procédé est qualifié de chimie verte¹⁷⁶ et de « respectueux de l'environnement »¹⁷⁷ alors que le procédé de la compagnie ne respecte pas les principes n°5 (utilisation de substances inoffensives) et 7 (utilisation de substances renouvelables) de la chimie verte (Anastas et Warner, 1998). En outre, on constate que des logos et des termes utilisés (DFE ou « *Designed for the environment* »)^{178, 179} ressemblent à l'étiquette *Safer Choice* (anciennement connue sous le nom de « *Design for the Environment* » ou Dfe de l'U.S. EPA)¹⁸⁰ sans y être associés. De la même manière, le logo nommé « 100 % *eco friendly* » n'apparaît pas dans la liste des écolabels¹⁸¹ et serait probablement une étiquette maison. Précisons que l'autodéclaration (étiquetage de type II) est permise et encadrée par la norme ISO 14021:2016¹⁸² mais « que les données sur lesquelles se base la déclaration doivent être vérifiables, exactes et significatives »¹⁸³.

¹⁷³ Cet extrait est tiré de Bégin *et al.* (2020).

¹⁷⁴ https://www.oecd-ilibrary.org/environment/essai-n-301-biodegradabilite-facile_9789264070356-fr;jsessionid=zuCGVuhBRmj6pCrCA_Y3pk3Q1fhDGHjSuLBM0rbr.ip-10-240-5-39

¹⁷⁵ <https://solvableworks.com/fr/product/decapant-surpuissant-puissance-industrielle/>

¹⁷⁶ <https://www.dfeprocess.com/pages/myths-and-facts/#q-1>

¹⁷⁷ <https://dfeprocess.com/>

¹⁷⁸ <https://dfeprocess.com/>

¹⁷⁹ <https://dfeprocess.com/pages/our-commitment/>

¹⁸⁰ <https://www.epa.gov/saferchoice/standard>

¹⁸¹ <https://www.ecolabelindex.com/ecolabels/>

¹⁸² <https://www.iso.org/fr/standard/66652.html>

¹⁸³ <https://www.environnement.gouv.qc.ca/developpement/ecoetiquette/savoir-plus.htm>

Toutes ces situations sont présentes malgré le fait que, au Canada, la *Loi sur la concurrence* (L.R.C. 1985, c. C-34) interdise « aux entreprises de donner des indications fausses ou trompeuses pour promouvoir un service, un produit ou un intérêt commercial ». ¹⁸⁴ Heureusement, en juin 2024, des modifications ont été apportées à cette loi « afin de resserrer l'encadrement des indications environnementales utilisées par les entreprises. Ces indications devront dorénavant être fondées sur une épreuve suffisante et appropriée et, lorsqu'elles portent sur une entreprise ou sur ses activités, être fondées sur des éléments suffisants et appropriés obtenus à l'aide d'une méthodologie reconnue à l'internationale. Une autre des modifications apportées qui, elle, entrera en vigueur en juin 2025, permettra aux parties privées de s'adresser au Tribunal de la concurrence pour contester certains comportements contrevenant à la *Loi sur la concurrence* ». ¹⁸⁵

4.2.4 Démarche de substitution

Par le passé, les solvants suivants ont été identifiés comme étant couramment utilisés pour la substitution : les DBE (à la place des éthers de glycol, de leurs acétates et de l'isophorone), le d-limonène (à la place des aromatiques, des hydrocarbures chlorés, des cétones et des esters), les acétates (à la place des aromatiques), les solvants oxygénés en général (à la place des solvants chlorés), les éthers dérivés du propylène glycol (à la place de ceux dérivés de l'éthylène glycol) (Gérin *et al.*, 1995). Près de 30 ans plus tard, les recherches démontrent essentiellement le même portrait, soit que ces substances sont toujours présentes dans plusieurs utilisations (Bégin, Beaudry, *et al.*, 2005; Bégin et Gérin, 2000; INERIS, 2015; Roviello *et al.*, 2023).

On peut toutefois mentionner qu'une attention particulière doit être apportée aux nouveaux risques que représentent les nouvelles substances. En raison d'une réglementation environnementale visant l'élimination progressive des hydrocarbures chlorés dans le domaine de la réparation automobile en Californie, plus précisément, dans les nettoyeurs à freins en aérosol, certains fabricants ont remplacé le PERC par un mélange de solvants incluant le n-hexane, une substance notoirement neurotoxique ¹⁸⁶. À noter que l'heptane aurait donné des caractéristiques chimiques similaires sans représenter un risque pour la santé. Autrement, le remplacement du DCM par le PERC dans les nettoyeurs à freins maintient l'utilisation d'un solvant probablement cancérigène pour l'humain (2A) (IARC, 2014, 2016). Rappelons également que certains solvants présentement disponibles figurent sur la liste européenne des substances extrêmement préoccupantes ¹⁸⁷, p. ex. 1,3-dioxane et le TCE. L'utilisation de solvants inflammables,

¹⁸⁴ <https://bureau-concurrence.canada.ca/comment-nous-favorisons-concurrence/education-sensibilisation/declarations-environnementales-ecoblanchiment>

¹⁸⁵ <https://cqde.org/fr/sinformer-nouvelle/lecoblanchiment-cest-quoi/>

¹⁸⁶ Voir p.1011 à 1013 de <https://www.cdc.gov/mmwr/PDF/wk/mm5045.pdf>

¹⁸⁷ <https://echa.europa.eu/fr/candidate-list-table>

comme l'acétate d'éthyle en remplacement du DCM, est aussi une situation à analyser attentivement concernant ce nouveau risque.

La monographie actuelle s'est attardée au remplacement du DCM par d'autres solvants, bien que certains procédés alternatifs aient été mentionnés. Parmi ceux-ci :

- des méthodes mécaniques ou thermiques pour le décapage;
- des adhésifs thermofusibles ou perçage et vissage pour les colles;
- des presses numériques et nettoyage automatique pour l'imprimerie offset.

En substitution, il faut s'assurer qu'il n'y ait pas de déplacement d'un type de risque vers un autre, comme par exemple un déplacement d'un risque chimique vers un risque physique comme le bruit avec les méthodes mécaniques.

Également, les solvants aqueux et les fluides supercritiques (eau et CO₂) font partie des solutions alternatives. D'ailleurs, selon le TRI, 50 % des cas de substitution de DCM se sont tournés vers des produits aqueux¹⁸⁸. Bien que les nettoyeurs aqueux soient ininflammables, ils peuvent contenir certains additifs avec une composition assez élevée en COV (TURI, 2021).

Le choix des alternatives au DCM doit nécessairement se faire en considérant non seulement les aspects techniques et toxicologiques, mais également les coûts globaux associés au procédé. Ainsi, tel que mentionné précédemment, des essais à petite échelle sont une étape essentielle de la démarche de substitution. Comme l'indique l'U.S. EPA (*Methylene chloride; Regulation under Section 6(a) of the Toxic Substances Control Act (TSCA)*, 88 Fed. Reg., 28284 (3 mai 2023)), les différentes options de remplacement identifiées peuvent nécessiter de plus longues périodes de temps, le remplacement d'équipement ou une refonte des processus. De plus, certaines modifications apportées pourraient ne pas convenir si par exemple, elles entraînent des dommages à la surface à décapage ou encore, si la réalisation de la tâche avec le produit de remplacement nécessite un temps d'application plus long. Dans ces cas, il faudra aussi considérer les avantages indirects comme notamment, un gain sur le temps de formation en SST des travailleuses et travailleurs ou encore, des économies sur l'achat, l'entretien et le remplacement des EPI¹⁸⁹. Il est donc essentiel de passer par une démarche exhaustive de substitution en 9 étapes, tel qu'il l'a déjà été proposé (Gérin et Bégin, 2002)¹⁹⁰.

Finalement, la monographie actuelle visait à évaluer les options de rechange au DCM, qui consiste en l'étape 4 de la démarche de substitution¹⁹¹. Cependant, il ne faut pas négliger

¹⁸⁸ https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-08/TRI_SolventSubstitution.pdf

¹⁸⁹ <https://www.youtube.com/watch?v=8IG6dAZE52k>

¹⁹⁰ <https://solub.irsst.qc.ca/>

¹⁹¹ <https://solub.irsst.qc.ca/etape-4-proposition-dooptions-rechange/>

l'étape précédente qui vise à étudier de façon détaillée les procédés et les tâches où l'on trouve le solvant à remplacer¹⁹². En d'autres mots, une analyse fonctionnelle du solvant à remplacer doit être effectuée, ce qui permet d'évaluer la nécessité de celui-ci et d'envisager toute alternative sans solvant.

¹⁹² <https://solub.irsst.qc.ca/etape-3-etude-probleme-criteres-selection/>

CONCLUSION

Cette monographie vise à identifier les milieux de travail et les applications industrielles pouvant entraîner l'exposition des travailleuses et travailleurs aux vapeurs de DCM, mais aussi à expliciter les critères d'hygiène et de sécurité du travail que doivent satisfaire les options de remplacement pour maintenir la santé, la sécurité et l'intégrité physique des travailleuses et travailleurs, tout en maintenant une efficacité technique et en protégeant l'environnement. Ce projet favorisera l'utilisation de solvants verts et permettra d'éviter les mauvaises substitutions. En effet, il n'est pas toujours simple de remplacer une substance par une autre moins dangereuse; par exemple, le DCM lui-même a déjà fait l'objet de mauvaises substitutions par le 1-bromopropane, qui était associé à de graves problématiques de santé au travail (Jacobs *et al.*, 2010). Ainsi, l'analyse des options de substitution est une étape essentielle de toute démarche de substitution du DCM.

La nouvelle réglementation qui vient d'être adoptée par nos voisins du Sud *Methylene chloride; Regulation under Section 6(a) of the Toxic Substances Control Act (TSCA)*, 88 Fed. Reg., 28284 (3 mai 2023)) aura nécessairement un impact important au Canada, notamment en matière de remplacement du DCM dans de nombreuses applications industrielles et commerciales. Le gouvernement du Canada a déjà songé à se doter d'une politique-cadre en matière de gestion des produits chimiques axée sur les solutions, qui relie les approches réglementaires classiques à des mesures de soutien et à des incitatifs non réglementaires favorisant l'innovation dans le domaine de la chimie et l'utilisation de substances chimiques plus sûres (LCSP, 2018). Cependant, la nouvelle mouture de la LCPE ne contient même pas le mot « substitution » et n'a pas pris en compte des éléments importants, concernant la substitution, du document du Comité permanent de l'environnement et du développement durable de la Chambre des Communes du Canada (Schulte, 2017). Le principe de substitution aurait avantage à être la pierre angulaire de toute politique visant la santé environnementale et la santé au travail.

Les utilisations de DCM identifiées dans cette monographie ne doivent pas être considérées comme une confirmation d'utilisation actuelle du DCM pour la réalisation des tâches de travail décrites. En effet, tel que présenté à la section 4.3.3, une évolution importante et une disparition du DCM dans de nombreuses FDS des produits chimiques sur la période 2020 à 2024 ont été constatées. Par exemple, le DCM était utilisé dans différentes colles, dégrappants, nettoyants à freins, calfeutrants, mais les FDS de ces mêmes produits ne mentionnent plus la présence de ce solvant au moment de finaliser l'écriture de cette monographie en juin 2024. S'agit-il d'une bonne nouvelle pour les travailleuses et travailleurs? Seule une analyse de substitution en 9 étapes effectuée dans chaque milieu de travail pourrait permettre de le dire.

BIBLIOGRAPHIE

3M Canada. (2016). *3M™ Safest stripper™ paint and varnish remover: Safety data sheet*.
Version number: 14.00. 3M Canada.

Adhesives & Sealants Industry. (2023). The latest market and technology trends in solvent-free lamination adhesives. Adhesives & Sealants Industry.
<https://www.adhesivesmag.com/articles/100538-the-latest-market-and-technology-trends-in-solvent-free-lamination-adhesives>

Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail. (2018). *Valeurs biologiques d'exposition en milieu professionnel : le dichlorométhane*. (Saisine n° 2012-SA-0261). Anses.

Alfa Adhesives. (2023). *Safety data sheet: Simalfa 309*. Alfa Adhesives.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists. (2005). *Dichloromethane: BEI documentation*. ACGIH.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists. (2022). *TLVs® and BEIs® based on the documentation of the threshold limit values for chemical substances and physical agents & biological exposure indices*. ACGIH.

Anastas, P. T. et Warner, J. C. (1998). *Green chemistry: Theory and practice*. Oxford University Press.

Anderson, L., Yu, E. et Chen, W.-T. (2022). Chemical recycling of mixed plastics in electronic waste using solvent-based processing. *Processes* 10(1), article 66.
<https://doi.org/10.3390/pr10010066>

Anundi, H., Lind, M. L., Friis, L., Itkes, N., Langworth, S. et Edling, C. (1993). High exposures to organic solvents among graffiti removers. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 65(4), 247-251. <https://doi.org/10.1007/BF00381198>.

Arkema. (2017). *Plaques coulées et extrudées : brochure technique*. Arkema.

Asmussen, E. et Peutzfeldt, A. (2000). Substitutes for methylene chloride as dental softening agent. *European Journal of Oral Sciences*, 108(4), 335-340.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1034/j.1600-0722.2000.108004335.x>

Avis concernant certaines substances dans le cadre du Plan de gestion des produits chimiques — 2023, (2023) 157 Gaz. Can. I, 2198.

Avis obligeant l'élaboration et l'exécution de plans de prévention de la pollution à l'égard du dichlorométhane, (2003) 137 Gaz. Can. I, 3718.

Avmor. (2020). *Fiche de données de sécurité : EP75 Décapant pour graffitis*. Avmor.

- Baillargeon, M., Bourdeau, N., Patry, L. et Phénix, P. (2020). *Répertoire des risques professionnels par métier*. Centre intégré universitaire de santé et de services sociaux du Centre-Sud-de-l'Île-de-Montréal.
- Bakhiyi, B. et Zayed, J. (2014). *Les défis des emplois verts de l'industrie du photovoltaïque au Québec* (Rapport n° R-817). IRSST.
<https://pharesst.irsst.qc.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1255&context=rapports-scientifique>
- Bégin, D., Beaudry, C. et Gérin, M. (2005). *La substitution des solvants par le carbonate de propylène* (Rapport n° B-070). IRSST.
<https://pharesst.irsst.qc.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1165&context=expertises-revues>
- Bégin, D., Couture, C., Gérin, M. et Debia, M. (2020). *Solvants verts : fondements, santé, sécurité, environnement et substitution* (Rapport n° R-1089). IRSST.
<https://pharesst.irsst.qc.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1079&context=rapports-scientifique>
- Bégin, D., Debia, M. et Gérin, M. (2008). *Recension des outils de comparaison des solvants*. (Rapport n° R-567). IRSST.
<https://pharesst.irsst.qc.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1093&context=expertises-revues>
- Bégin, D. et Gérin, M. (1999). *La substitution des solvants par les esters d'acides dicarboxyliques (DBE) : adipate diméthylrique, glutarate diméthylrique, succinate diméthylrique* (Rapport n° B-056). IRSST.
<https://pharesst.irsst.qc.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1115&context=expertises-revues>
- Bégin, D. et Gérin, M. (2000). *La substitution des solvants par le d-limonène* (Rapport n° B-057). IRSST.
<https://pharesst.irsst.qc.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1114&context=expertises-revues>
- Bégin, D. et Gérin, M. (2001). *Substitution de solvants : étude de cas d'implantation* (Rapport n° R-269). IRSST.
<https://pharesst.irsst.qc.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1676&context=rapports-scientifique>
- Bégin, D. et Gérin, M. (2002). Les grandes familles de solvants organiques : utilisations et aspects physico-chimiques. Dans M. Gérin (édit.), *Solvants industriels : santé, sécurité, substitution* (p. 13-38). Masson.
- Bégin, D., Gérin, M. et Debia, M. (2016a). *Collage de mousse de polyuréthane : meuble* (Fiche de substitution par utilisation n° RF-908). IRSST.
<https://pharesst.irsst.qc.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1084&context=fiches>
- Bégin, D., Gérin, M. et Debia, M. (2016b). *Décapage de baignoires* (Fiche de substitution par utilisation n° RF-917). IRSST.
<https://pharesst.irsst.qc.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1093&context=fiches>

- Bégin, D., Gérin, M. et Debia, M. (2016c). *Décapage de graffitis* (Fiche de substitution par utilisation n° RF-913). IRSST.
<https://pharesst.irsst.qc.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1089&context=fiches>
- Bégin, D., Gérin, M. et Debia, M. (2016d). *Décapage de meubles en bois* (Fiche de substitution par utilisation n° RF-916). IRSST.
<https://pharesst.irsst.qc.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1092&context=fiches>
- Bégin, D., Gérin, M. et Debia, M. (2016e). *Nettoyage et décapage de cuves : fabrication de peinture* (Fiche de substitution par utilisation n° RF-912). IRSST.
<https://pharesst.irsst.qc.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1088&context=fiches>
- Bégin, D., Lavoué, J. et Gérin, M. (2002a). *La substitution des solvants par le diméthylsulfoxyde* (Rapport n° B-062). IRSST.
<https://pharesst.irsst.qc.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1104&context=expertises-revues>
- Bégin, D., Lavoué, J. et Gérin, M. (2002b). Les nouveaux solvants et les procédés de substitution. Dans M. Gérin (édit.), *Solvants industriels : santé, sécurité, substitution* (p. 61-110). Masson.
- Bégin, D., Moumen, M. et Gérin, M. (2005). *La substitution des solvants par l'alcool benzylique* (Rapport n° B-068). IRSST.
<https://pharesst.irsst.qc.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1066&context=expertises-revues>
- Belgian FPS of Economy and the FPS of Public Health. (2023). *Development of a strategic roadmap for the substitution of SVHC as part of a sustainable economy report on the belgian plan for chemical alternatives*. BEP4CAL.
<https://economie.fgov.be/sites/default/files/Files/Entreprises/Development-of-a-strategic-roadmap-for-the-substitution-of-svhc-as-part-of-a-sustainable-economy.pdf>
- Benaissi, K. (2013). *Le CO₂ supercritique appliqué à l'extraction végétale* (Réf. n° CHV4015 V1). Techniques de l'Ingénieur.
- Benbrahim-Tallaa, L., Lauby-Secretan, B., Loomis, D., Guyton, K. Z., Grosse, Y., El Ghissassi, F., . . . Straif, K. (2014). Carcinogenicity of perfluorooctanoic acid, tetrafluoroethylene, dichloromethane, 1,2-dichloropropane, and 1,3-propane sultone. *The Lancet Oncology*, 15(9), 924-925. <http://www.thelancet.com/journals/lanonc/article/PIIS1470-2045%2814%2970316-X/fulltext>.
- Benco. (2015). *Safety data sheet: B96 industrial paint remover*. Benco Sales.
- Benco. (s.d.). *Safety data sheet: B17 industrial paint remover*. Benco Sales.
- Berryman Products. (2015a). *Safety Data Sheet: Berryman brake parts cleaner, blend "5C-4". Product number(s) 1401, 1405 and 1455*. Berryman Products.
- Berryman Products. (2015b). *Safety data sheet: Berryman non-chlorinated SCAQMD-Compliant brake cleaner, blend "5M-SC-R". Product number(s) 2407SC*. Berryman Products.

Berryman Products. (2020). *Safety data sheet: Berryman professional chem-dip carburetor parts cleaner, blend "2AA-E", product number(s) 0901, 0905, 9055*. Berryman Products.

Bertrand, N. et Clerc, F. (2011). Panorama des expositions professionnelles à des composés organiques volatils entre 2003 et 2010. *Hygiène et sécurité du travail*, (225), 31-44.
[http://www.hst.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/HST_ND%202349/\\$File/ND2349.pdf](http://www.hst.fr/inrs-pub/inrs01.nsf/IntranetObject-accesParReference/HST_ND%202349/$File/ND2349.pdf)

Besanger, S. (19 janvier 2022). Comment recycle-t-on les panneaux solaires? *The Conversation*. <https://theconversation.com/comment-recycle-t-on-les-panneaux-solaires-174715>

Bisinotto Pereira, M., Botelho Meireles de Souza, G., Croce Romano Espinosa, D., Vitor Pavao, L., Gonçalves Alonso, C., Ferreira Cabral, V. et Cardozo-Filho, L. (2023). Simultaneous recycling of waste solar panels and treatment of persistent organic compounds via supercritical water technology. *Environmental Pollution*, 335, article 122331. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749123013337>

Black, M., Canova, M., Rydin, S., Scalet, B. M., Roudier, S. et Sancho, L. D. (2013). *Best available techniques (BAT) reference document for the tanning of hides and skins: Industrial emissions directive 2010/75/EU, integrated pollution prevention and control*. European Commission.

Boudesocque, L., Dorat, J., Pothier, J., Gueiffier, A. et Enguehard-Gueiffier, C. (2013). High performance thin layer chromatography–densitometry: A step further for quality control of cranberry extracts. *Food chemistry*, 139(1-4), 866-871.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.02.002>

Boyle, M. (2013). *Elimination of organic solvent at dynamic manufacturing*. Illinois Sustainable Technology Center.

Brasseur, G. (2010). Sérigraphie : Signaux Girod fait bonne impression. *Travail & Sécurité*, 32-33.

Brasseur, G. (2007). Substitution : le néoprène quitte le siège. *Travail & Sécurité*, 40-41.
<https://web.archive.org/web/20220319181458/https://www.travail-et-securite.fr/dms/ts/ArticleTS/TS-TS674page40/TS674page40.pdf>

Burns, L., Magnuson, K., Geyer, R. et Keller, A. A. (2016). *Pilot study to support alternatives analysis: Evaluating alternatives to methylene chloride in paint stripper*. California Department of Toxic Substances Control.

Camie-Campbell. (2015). *Safety data sheet: Camie 313B upholstery adhesive, product number 1000002466*. Camie-Campbell.

CAREX Canada. (2020). *Dichloromethane occupational exposures*. CAREX Canada.

Carl Roth. (2021). *Safety data sheet: Dichloromethane Rotidry®Sept ≥99,9 % (≤50 ppm H₂O)*. Roth Sochiel E.U.R.L.

- Castaing, G. et Bertrand, N. (2019). *Sérigraphie : guide pratique de ventilation*. INRS.
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. (2007). *Détermination des acides gras et résiniques : dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse après dérivation avec du BSTFA* (Méthode n° MA. 414 – Aci-g-r-1.0, Rév. 3). CEAEQ.
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. (2012). *Détermination des alkylphénols dans les eaux usées : extraction liquide-solide, dérivation et dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse* (Méthode n° MA. 404 – Alkylphénols 1.0). CEAEQ.
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. (2013a). *Détermination des chlorobenzènes : dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse* (Méthode n° MA 400 – Clbz 1.0, Rév. 4). CEAEQ.
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. (2013b). *Détermination des pesticides de type aryloxyacide dans les eaux, les sols, les sédiments et les tissus végétaux par passage sur cartouche C18 suivie d'une estérification : dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse* (Méthode n° MA. 400 – P. Chlp 1.0, Rév. 1). CEAEQ.
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. (2013c). *Détermination des pesticides de type organochloré : extraction avec de l'hexane et du dichlorométhane; dosage par chromatographie en phase gazeuse* (Méthode n° MA. 403 – P. Ocl 4.1). CEAEQ.
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. (2015). *Détermination des biphényles polychlorés (congénères): dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse à haute résolution* (Méthode n° MA 400 - BPCHR 1.0). CEAEQ.
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. (2016a). *Détermination des hydrocarbures pétroliers (C10 à C50) : dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un détecteur à ionisation de flamme* (Méthode n° MA. 400 – HYD. 1.1, Rév. 3). CEAEQ.
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. (2016b). *Détermination des pesticides de type organophosphoré, triazine, carbamate, urée substituée, phthalimide et pyréthrinaïde dans l'eau, les sols et les sédiments : extraction liquide-liquide; dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse* (Méthode n° MA. 400 – Pest. 1.0, Rév. 4). CEAEQ.
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. (2022). *Détermination des hydrocarbures aromatiques polycycliques : dosage par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse* (Méthode n° MA. 400 – HAP 1.1., Rév. 12). CEAEQ.
- Chaigne, B., Lasfargues, G., Marie, I., Hüttenberger, B., Lavigne, C., Marchand-Adam, S., . . . Diot, E. (2015). Primary Sjögren's syndrome and occupational risk factors: A case-

- control study. *Journal of Autoimmunimoty*, 60, 80-85.
<https://doi.org/10.1016/j.jaut.2015.04.004>
- Chemical Abstracts Service. (2024). *Dichloromethane*. CAS.
- Chen, G. L., Tan, Q., Feng, Y., Lan, H., Yang, X. et Zhou, X. (2023). Determination of 4-methyl-2-pentanol in workplace air by solvent desorption-gas chromatography. *Zhonghua Lao Dong Wei Sheng Zhi Ye Bing Za Zhi*, 41(10), 859-862.
<https://doi.org/10.3760/cma.j.cn121094-20230103-000001>
- Chen, L., Shu, J., Huang, Y., Shi, Z., Luo, H., Liu, Z. et Shen, C. (2022). Engineering solid electrolyte interphase for the application of propylene carbonate solvent for graphite anode in low temperate battery. *Applied Surface Science*, 598, article 153740.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.153740>
- Chen, L. et Tapp, L. (2009). *Evaluation of exposures in sculpture studios at a college art department* (Rapport n° 2007-0167-3078). NIOSH.
- Chen, M.-X., Chan, H.-L., Wu, T.-C., Luo, Y.-P., Meen, T.-H., Ho, C.-T. et Tsai, J.-K. (2021). Exploring influence of photovoltaic characteristics of adding different anti-solvents on perovskite solar cells. Dans T.-H. Meen (édit.), *Proceedings of the 3rd IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering 2021 (IEEE ECICE 2021)*, Yunlin, Taiwan, October 29-31, 2021 (p. 523-527). IEEE.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9645595/metrics#metrics>
- Chronopoulos, G., Cakmak, E. G., Tempany, P., Klein, G., Brinkmann, T., Zerger, B. et Roudier, S. (2020). *Best available techniques (BAT) reference document on surface treatment using organic solvents including preservation of wood and wood products with chemicals*. European Commission.
- Cierpich, H., Harrison, R. et Styles, L. (2012). *A paint maker dies from exposure to dichloromethane (methylene chloride) while cleaning a paint tank*. (Rapport n° 11CA009). California Department of Public Health.
- Centre Interprofessionnel Technique d'Études de la Pollution Atmosphérique. (2011). *Freins à la substitution des composés organiques volatils dans les procédés industriels. Marché N° 0974C0268*. CITEPA.
- Collot, D. (1998). *Les solvants dans l'industrie du cuir en Estrie*. Régie Régionale de la Santé et des Services Sociaux de l'Estrie.
- Colonna, G. R. (2010). *Fire protection guide to hazardous materials* (14^e éd.). NFPA.
- Comité européen de normalisation. (2017). *Solvants biosourcés : exigences et méthodes d'essais*. Norme EN 16766:2017 (F).
- Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail. (2005). *Répertoire toxicologique : chlorure de méthylène*. CNESST.

Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail. (2023). *Répertoire toxicologique : n-Hexane*. CNESST.

Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail. (2024). *Répertoire toxicologique : méthacrylate de méthyle*. CNESST.

Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act, U.S.C. § 103, cl. 9601.

CRC Industries. (2021). *Safety data sheet: SW-4 OzzyJuice® heavy duty degreasing solution - 5 gal*. CRC Industries.

Debia, M., Bégin, D. et Gérin, M. (2009). Comparative evaluation of overexposure potential indices used in solvent substitution. *Annals of Occupational Hygiene*, 53(4), 391-401. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mep014>

Debia, M., Bégin, D. et Gérin, M. (2011). Solvent substitution: An analysis of comprehensive hazard screening indices. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 8(6), 387-399. <https://doi.org/10.1080/15459624.2011.582791>

Décision du Conseil n° 455/2009/CE, 2009 J.O. (L 137), 3-6.

Desai, J. R. (2003). *Solvent welding of ABS and HIPS: A case study in methylene chloride substitution: Abstract of a thesis submitted to the faculty of the department of plastics engineering in partial fulfillment of the requirements of the degree of Master of Science*. University of Massachusetts.

Dickerson, A., Hansen, J., Thompson, S., Gredal, O. et Weisskopf, M. (2020). A mixtures approach to solvent exposures and amyotrophic lateral sclerosis: A population-based study in Denmark. *European Journal of Epidemiology*, 35(3), 241-249. <https://doi.org/10.1007/s10654-020-00624-5>

Directive du conseil n° 2004/37/CE, 2004 J.O. (L 158), 50-76.

DSP Singapore Holdings. (2018). *Safety data sheet: Molykote® 7415 thinner*. DSP Singapore Holdings.

Dumond. (2018). *Safety data sheet: Smart strip pro, SDS # DCI-073*. Dumond Chemicals.

Dunn, P. T., Galvin, S. et Hettenbach, K. (2004). The development of an environmentally benign synthesis of sildenafil citrate (Viagra™) and its assessment by green chemistry metrics. *Green Chemistry*, 6(1), 43-48. <https://doi.org/10.1039/B312329D>

Durrani, T., Clapp, R. et Harrison, R. S., D. (2020). Solvent-based paint and varnish removers: A focused toxicologic review of existing and alternative constituents. *Journal Applied Toxicology*, 40(10), 1325-1341.

El-Maraghy, C. M. (2023). Sustainable eco-friendly ratio-based spectrophotometric and HPTLC-densitometric methods for simultaneous analysis of co-formulated anti-migraine

- drugs with overlapped spectra. *BMC Chemistry*, 17(1), article 100.
<https://doi.org/10.1186/s13065-023-01020-2>
- Environnement Canada. (1998). *Options stratégiques pour la gestion des substances toxiques : dichlorométhane : rapport sur la consultation des intervenants*. Environnement Canada.
- Environnement Canada (2003). *Code de pratiques pour la réduction des émissions de dichlorométhane résultant de l'utilisation de décapants pour peinture dans les entreprises commerciales de remise à neuf de meubles et pour d'autres applications de décapage* (Rapport n° SPE 1/CC/4). Environnement Canada.
- Environnement Canada et Santé Canada. (1993). *Liste des substances d'intérêt prioritaire : dichlorométhane*. Environnement Canada; Santé Canada.
- Environnement et Changement climatique Canada. (2020). *Guide de déclaration à l'inventaire national des rejets de polluants 2020 et 2021*. Environnement et Changement climatique Canada.
- Environnement et Changement climatique Canada et Santé Canada. (2019). *Ébauche d'évaluation préalable : diméthoxyméthane*. Environnement et Changement climatique Canada; Santé Canada.
- Environnement et Changement climatique Canada et Santé Canada. (2022). *Cadre de gestion des risques du groupe des alcools : méthanol, butan-1-ol et alcool benzylique*. Environnement et Changement climatique Canada; Santé Canada.
- Environnement et Changement climatique Canada et Santé Canada. (2024a). *Ébauche d'évaluation : groupe des naphtas à bas point d'ébullition*. Environnement et Changement climatique Canada; Santé Canada.
- Environnement et Changement climatique Canada et Santé Canada. (2024b). *Ébauche d'évaluation : mise à jour NMP et NEP*. Environnement et Changement climatique Canada; Santé Canada.
- European Pharmacopoeia. (2020). *Hard fat* (Méthode n° 01/2020:0462). EMA.
- Executive Office of Energy and Environmental Affairs. (2016). *Designation of TURA higher & lower hazard substances in Massachusetts*. Commonwealth of Massachusetts.
- EZ Strip. (2018). *Fiche de données de sécurité : EZ Strip™ Graffiti Remover*. EZ Strip Canada.
- Fairfax, R. et Porter, E. (2006). Evaluation of worker exposure to TDI, MOCA, and methylene chloride. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 3(6), D50-D53.
<https://doi.org/10.1080/15459620600671688>
- FCA Canada. (2022). *Fiche de données de sécurité : Mopar non-chlorinated brake parts cleaner 10% VOC*. FCA Canada.
- Fleming, D. A., Woskie, S. R., Jones, J. H., Silver, S. R., Luo, L. et Bertke, S. J. (2014). Retrospective assessment of exposure to chemicals for a microelectronics and business

- machine manufacturing facility. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 11(5), 292-305. <https://doi.org/10.1080/15459624.2013.862591>
- Food and Drug Administration*, 21 C.F.R. § 173.255 (2024).
- Forsberg, K., Van den Borre, A., Henry, N. et Zeigler, J. P. (2020). *Quick selection guide to chemical protective clothing* (7^e éd.). John Wiley & Sons.
- Fournier, P., Gauvin, L. et Chambaud, L. (2023). Santé publique et santé environnementale. Dans I. Goupil-Sormany, M. Debia, P. Glorennec, J.-P. Gonzalez et N. Noisel (édit.), *Environnement et santé publique : fondements et pratiques* (p. 39-68). Presses de l'EHESP.
- Franmar. (2019). *Safety data sheet (GHS): 605PRO Blue bear multipurpose coatings remover with safenol™*. Franmar.
- Gas-Servei. (2019). *Fiche de données de sécurité R410-A*. Gas-Servei.
- Gérin, M. (2002). Solvants et prévention : nouvelles perspectives. Dans M. Gérin (édit.), *Solvants industriels : santé, sécurité, substitution* (p. 1-12). Masson.
- Gérin, M. et Bégin, D. (2002). Substitution : démarches et outils Dans M. Gérin (édit.), *Solvants industriels : santé, sécurité, substitution* (p. 39-56). Masson.
- Gérin, M., Bégin, D., Goupil, J., Garneau, R. et Sacks, S. (1995). *Substitution des solvants en milieu de travail : élaboration d'un outil pour l'intervention* (Rapport n° R-098). IRSST. <https://pharesst.irsst.qc.ca/cqi/viewcontent.cqi?article=1860&context=rappports-scientifique>
- Gouvernement du Canada. (2010). *Dichlorométhane : rapport final*. Gouvernement du Canada
- Gouvernement du Canada. (2022a). *Évaluation de la mesure du rendement pour la gestion des risques du dichlorométhane (DCM) / chlorure de méthylène*. Gouvernement du Canada.
- Gouvernement du Canada. (2022b). *Liste critique des ingrédients de cosmétiques*. Gouvernement du Canada.
- Gouvernement du Canada. (2022c). *Liste des solvants de support ou d'extraction autorisés (listes des additifs alimentaires autorisés)*. Gouvernement du Canada.
- Gouvernement du Canada. (2023). *Dichlorométhane*. Gouvernement du Canada
- Groupe CSA. (2011). *Choix, utilisation et entretien des appareils de protection respiratoire*. Norme CAN/CSA-Z94.4-F11 (C2016).
- Guidelines for carcinogen risk assessment*, 51 Fed. Reg., 33992 (24 septembre 1986).
- Hartwig, A. (2023). *List of MAK and BAT values 2023* (Rapport n° 59). Permanent Senate Commission for the Investigation of Health Hazards of Chemical Compounds in the Work Area.

- Heater, K. J., Parsons, A. B. et Olfenbuttel, R. F. (1994). *Evaluation of supercritical carbon dioxide technology to reduce solvent in spray coating applications*. EPA.
- Henkel Canada Corporation. (2021a). *Fiche de données de sécurité : Loctite MR 5009 Hi-tack gasket sealant known as Loctite® Hi-tack gasket seal. Numéro de la révision : 007.0. IDH 234910. Item 30526*. Henkel Canada Corporation.
- Henkel Canada Corporation. (2021b). *Fiche de données de sécurité : Loctite MR 5009 known as Loctite Hi TCK GS S. Numéro de la révision : 007.0. IDH 1540591. Item 1540591*. Henkel Canada Corporation.
- Henkel Canada Corporation. (2022). *Fiche de données de sécurité : Loctite SF 790 gasket remover known as Loctite® Chisel® paint stripper*. Henkel Canada Corporation.
- Henkel Canada Corporation. (2023). *Fiche de données de sécurité : Loctite MR 5009 Hi-Tack Gasket Sealant known as Loctite® Hi-Tack Gasket Seal. Numéro de la révision : 008.0. IDH 234910. Item 30526*. Henkel Canada Corporation.
- Hoang, A., Fagan, K., Cannon, D. L., Rayasam, S. D. G., Harrison, R., Shusterman, D. et Singla, V. (2021). Assessment of methylene chloride-related fatalities in the United States, 1980-2018. *JAMA Internal Medicine*, 181(6), 797-805. <https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2021.1063>
- Hoy, K. L., Nielson K. A. et Lee, C. (1993). *Liquid spray application of coatings with supercritical fluids as diluents and spraying from an orifice* (Brevet américain n° US 5,203,843). United States Patent and Trademark Office.
- Huang, H., Wang, Z., Dai, C., Guo, J. et Zhang, X. (2022). Volatile organic compounds emission in the rubber products manufacturing processes. *Environmental Research*, 212(Pt C), article 113485. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113485>
- Huang, Z., Zhou, J., Hu, C., Fu, H. et Peng, X. (2018). Role and mechanism of formic acid in stripping of paint comprising epoxy primer and polyurethane topcoat. *Journal of Coatings Technology and Research*, 15(2), 385-394. <https://doi.org/10.1007/s11998-017-9993-7>
- Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. (2023). *Chlorure de méthylène*. IRSST. <https://www.irsst.qc.ca/laboratoires/analyses/contaminants-air/substance/i/544>
- Institut national de l'environnement et des risques industriels. (2011). *Chlorure de méthylène*. INERIS.
- Institut national de l'environnement et des risques industriels. (2015). *Données technico-économiques sur les substances chimiques en France : dichlorométhane*. (Document n° DRC-15-136881-12175A). INERIS.
- Institut national de recherche et de sécurité. (2006). *Fiche d'aide à la substitution : substitution du chlorure de méthylène*. INRS.

- Institut national de recherche et de sécurité. (2010). *Fiche d'aide à la substitution : dichlorométhane et benzène, extraction d'arômes, des parfums, d'huiles essentielles*. INRS.
- Institut national de recherche et de sécurité. (2012). *Fiche d'aide à la substitution : dichlorométhane. Activité : décapage de façades / graffitis*. INRS.
- Institut national de recherche et de sécurité. (2014). *Fiche toxicologique N° 103 : 2-méthoxyéthanol*. INRS.
- Institut national de recherche et de sécurité. (2015). *Dichlorométhane M-56*. INRS.
- Institut national de recherche et de sécurité. (2020). *Les appareils de protection respiratoire : choix et utilisation* (Brochure n° ED6106). INRS.
- Institut national de recherche et de sécurité. (2021). *Fiche toxicologique n° 34 : dichlorométhane*. INRS.
- Institut national de recherche et de sécurité. (2023). *Dichlorométhane M-30*. INRS.
- International Agency for Research on Cancer. (2014). *Trichloroethylene, tetrachloroethylene, and some other chlorinated agents*. IARC.
<http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol106/index.php>
- International Agency for Research on Cancer. (2016). Dichloromethane. Dans IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans (édit.), *Some chemicals used as solvents and in polymer manufacture* (p. 177-255). IARC.
- International Agency for Research on Cancer. (2018). N,N-Dimethylformamide. Dans IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans (édit.), *Some industrial chemicals* (p. 119-170). IARC.
- International Council for Harmonisation of Technical Requirements for Pharmaceuticals for Human Use. (2021). *ICH harmonised guideline. Impurities: guideline for residual solvents Q3C(R8)*. ICH.
- International Paint. (2019). *Fiche signalétique : Devstrip 501 Paint Stripper*. Akzo Nobel Coatings Ltd.
- Inventec. (2019). *Fiche de données de sécurité : Promoclean TP 188*. FDS Réf.: 050322100, Inventec Performance Chemicals SA.
- IPS Corporation. (2020). *GHS safety data sheet: Weld-on® 3 solvent cement for bonding acrylics*. IPS Corporation.
- ITW Permatex Canada. (2015). *Safety data sheet: 161DA paint stripper 12 OZ AE*. ITW Permatex Canada.
- Jacobs, M. M., Tickner, J. et Kriebel, D. (2010). *Case study 5. Regulating methylene chloride: A cautionary tale about setting health standards one chemical at a time*.

https://www.uml.edu/docs/Lessons%20Learned%20Solutions%20for%20Workplace%20Safety%20and%20Health%2C%20full%20report_tcm18-232340.pdf

- Jain, G., Palekar, U., Awinashe, V., Mishra, S. K., Kawadkar, A. et Rahangdale, T. (2014). The effect of different chemical surface treatments of denture teeth on shear bond strength: A comparative study. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, 8(6), ZC15-ZC18. <https://doi.org/10.7860/JCDR/2014/8420.4474>
- Jargot, D. (2006). Les décapants chimiques industriels. *Hygiène et sécurité du travail : cahiers de notes documentaires*, 202, 91-96. www.inrs.fr/accueil/dms/inrs/CataloguePapier/ND/TI-PR-22/pr22.pdf
- Jig-A-Loo. (2018). *Safety data sheet: 400 G JIG1603 Jig-a-loo LB 12PK. Product # 1000020094, Version # 01*. Jig-A-Loo.
- Jig-A-Loo. (2020). *Safety data sheet: Jig-a-loo invisible all-around lubricant-JIG1601. Product #RE1000020094*. Jig-A-Loo.
- K-G Spray-Pak inc. (2014). *Fiche signalétique 0406-23-001 & 0406-23-003 M-55 Lubricant*. K-G Spray-Pak.
- Kalium Solutions Inc. (2018a). *Fiche de données de sécurité : Super décapant nouvelle génération*. Version 1. Distribution J. Des Serres.
- Kalium Solutions Inc. (2018b). *Safety data sheet: Super remover new generation*. Version 1. Distribution J. Des Serres.
- Kang, D., Lee, E.-S., Kim, T.-K., Kim, Y.-J., Lee, S., Lee, W., . . . Kim, S.-Y. (2023). Association with combined occupational hazards exposure and risk of metabolic syndrome: A workers' health examination cohort 2012–2021. *Safety and Health at Work*, 14(3), 279-286. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2023.08.006>
- Kleen-Flo Tumbler Ind Limited. (2017). *Safety Data Sheet Gasket Kleen Product code 465*. Kleen-Flo Tumbler Ind.
- Knox, K. E., Dodson, R. E., Rudel, R. A., Polsky, C. et Schwarzman, M. R. (2023). Identifying toxic consumer products: A novel data set reveals air emissions of potent carcinogens, reproductive toxicants, and developmental toxicants. *Environmental Science & Technology*, 57(19), 7454-7465. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c07247>
- Ko, Y. J., Cha, J., Jeong, W.-Y., Lee, M.-E., Cho, B.-H., Nisha, B., . . . Han, S. O. (2022). Bio-isopropanol production in *Corynebacterium glutamicum*: Metabolic redesign of synthetic bypasses and two-stage fermentation with gas stripping. *Bioresource Technology*, 354, article 127171. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127171>
- Koinecke, A., Kreuzig, R., Bahadir, M., Siebers, J. et Nolting, H. G. (1994). Investigations on the substitution of dichloromethane in pesticide residue analysis of plant materials. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 349, 301-305. <https://doi.org/10.1007/BF00323208>

- Kosmic Surf-Pro Inc. (2021). *Fiche de données de sécurité : décolleur intelligent*. Kosmic Surf-Pro.
- Kounami, N., Maeda, S., Kitagawa, A., Tomihara, H., Ushimaru, Y., Ohara, N., . . . Miyamoto, A. (2024). Early detection of occupational cholangiocarcinoma in a high-risk patient under intensive surveillance: A case study. *Surgical Case Reports*, 10, article 68. <https://doi.org/10.1186/s40792-024-01871-4>
- Kubo, S., Nakanuma, Y., Takemura, S., Sakata, C., Urata, Y., Nozawa, A., . . . Endo, G. (2014). Case series of 17 patients with cholangiocarcinoma among young adult workers of a printing company in Japan. *Journal of Hepato-Biliary-Pancreatic Sciences*, 21(7), 479-488. <https://doi.org/10.1002/jhbp.86>
- Kurowski, G., Vogt, O. et Ogonowski, J. (2017). Active ingredients in paint strippers. *Czasopismo Techniczne*, (1), 41-52. <https://www.ejournals.eu/pliki/art/8877/>
- Laboratoire R&D de Solutions GTR. (2023). *Fiche de données de sécurité: Cee-Bee® A-202*. Laboratoire R&D de Solutions GTR.
- Lara, J., Drolet, D., Perron, G., Chollot, A., Zimmermann, F., et Schmitt, N. (2011). *ProtecPo : logiciel pour la pré-sélection de matériaux de protection*. IRSST; INRS. <https://protecpo.inrs.fr/ProtecPo/jsp/Accueil.jsp?institut=IRSST>
- Le Roy, D. (2020). *Fiche pratique de sécurité ED112*. INRS.
- Lee, J. L., Chong, G. H., Ota, M., Guo, H. et Smith, R. L. J. (2024). Solvent replacement strategies for processing pharmaceuticals and bio-related compounds: A review. *Liquids*, 4(2), 352-381. <https://doi.org/10.3390/liquids4020018>
- Leonard, S., Anthony, T. R. et Ramirez, M. (2012). *Bathtub refinishing technician died from inhalation of paint stripper vapors*. The University of Iowa, College of Public Health, Department of Occupational and Environmental Health. <https://stacks.cdc.gov/view/cdc/165189>
- Les Entreprises Kleen-Flo Tumbler Limitée. (2016). *Fiche de données de sécurité : nettoyeur à carburateur et parties métalliques*. Les Entreprises Kleen-Flo Tumbler Limitée.
- Les Entreprises Kleen-Flo Tumbler Limitée. (2017a). *Fiche de données de sécurité : nettoyeur à freins et pièces*. Code de produit: 313R. Les Entreprises Kleen-Flo Tumbler Limitée.
- Les Entreprises Kleen-Flo Tumbler Limitée. (2017b). *Fiche signalétique : super peinture aerosol aluminium*. Code de produit : 4009. Les Entreprises Kleen-Flo Tumbler Limitée.
- Les Entreprises Kleen-Flo Tumbler Limitée. (2017c). *Fiche signalétique : traitement pour courroies*. Code de produit: 762. Les Entreprises Kleen-Flo Tumbler Limitée.
- Linde Canada. (2022). *Fiche de données de sécurité selon RPD, Annexe 1 Prostar™ Anti-spatter spray* Code du produit: PRS50001. Prostar.

- Lofstedt, R. (2014). The substitution principle in chemical regulation: A constructive critique. *Journal of Risk Research*, 17(5), 543-564.
<https://doi.org/10.1080/13669877.2013.841733>
- Loi canadienne sur la protection de l'environnement*, L.C. 1999, c. 33.
- Loi sur la concurrence*, L.R.C. 1985, c. C-34.
- Loi sur la qualité de l'environnement*, R.L.R.Q., c. Q-2.
- Loi sur la santé et la sécurité du travail*, R.L.R.Q., c. S-2.1.
- Loi sur le renforcement de la protection de l'environnement pour un Canada en santé*, L.C. 2023, c. 12.
- Loi sur les produits dangereux*, L.R.C. 1985, c. H-3.
- Lowell Center for Sustainable Production. (2018). *Intégration de la substitution éclairée et de l'évaluation des solutions de rechange dans le programme canadien sur les produits chimiques*. Université du Massachusetts.
- Lu, T., Reimonn, G., Morose, G., Yu, E. et Chen, W.-T. (2021). Removing acrylic conformal coating with safer solvents for re-manufacturing electronics. *Polymers*, 13(6), article 937.
<https://doi.org/10.3390/polym13060937>
- Lumia, G. (2002). *Utilisation du CO₂ supercritique comme solvant de substitution*. IN 5. Techniques de l'ingénieur. Paris: Editions T.I.
- Marek, E. M., Koslitz, S., Weiss, T., Fartasch, M., Schlüter, G. et Käferlein, H. U. B., T. (2017). Quantification of *N*-phenyl-2-naphthylamine by gas chromatography and isotope-dilution mass spectrometry and its percutaneous absorption ex vivo under workplace conditions. *Archives of Toxicology*, 91(11), 3587-3596. <https://doi.org/10.1007/s00204-017-2046-2>
- Massachusetts Toxics Use Reduction Act*, ch. 211 (Mass. 2018).
- Methylene chloride; Regulation of paint and coating removal for consumer use under TSCA Section 6(a)*, 84 Fed. Reg., 11420 (27 mars 2019) (à être codifié à 40 C.F.R. pt. 751).
- Methylene chloride; Regulation under Section 6(a) of the Toxic Substances Control Act (TSCA)*, 88 Fed. Reg., 28284 (3 mai 2023) (à être codifié à 40 C.F.R. pt. 751).
- Methylene chloride: Revision to Toxic Substances Control Act (TSCA) risk determination; Notice of availability*, 87 Fed. Reg., 67901 (10 novembre 2022).
<https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2022-11-10/pdf/2022-24533.pdf>
- Methylene chloride; Regulation under Section 6(a) of the Toxic Substances Control Act (TSCA)*, 89 Fed. Reg., 39254 (8 mai 2024) (à être codifié à 40 C.F.R. pt. 751)).
- Midwest Rubber Mfg. (2015). *Fiche signalétique : Solution chimique vulcanisante (non inflammable) 12085TF, 12086TF, 12087TF, 12089TF*. Plews & Edlemann,.

- Millipore Sigma. (2023). *Fiche de données de sécurité : dichloromethane pour la chromatographie en phase liquide LiChrosolv®*. Millipore Sigma
- Minor, B. H. (2014). *Refrigerant mixtures comprising tetrafluoropropenes, difluoromethane, and option ally difluoroethane and uses thereof* (Brevet international n° WO/2014/03962). WIPO. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2014031962>
- Miraval, S. (2022). *Les éthers de glycol : fiches solvants ED4222*. INRS.
- Morose, G., Marshall, J., Lamb, D. et Uzor, C. (2014). *Assessment of safer polysulfide and polythioether sealant removers for aerospace/defense industry applications*. Products Finishing. <http://www.pfonline.com/articles/assessment-of-safer-polysulfide-and-polythioether-sealant-removers-for-aerospacedefense-industry-applications>
- Morose, G., Marshall, J. et McCarthy, A. (2020). *Assessment of safer and effective alternatives for coating removal products* (Rapport n° 2020-001). TURI.
- Morose, G., Marshall, J., McCarthy, A., Harripersaud, V. et Giarrosso, A. (2017). *Assessment of safer and effective alternatives to methylene chloride for paint stripping products* (Rapport n° 2017-102). TURI.
- n*-Methylpyrrolidone (NMP); *Regulation under the Toxic Substances Control Act (TSCA)*, 89 Fed. Reg., 51134 (14 juin 2024) (à être codifié à 40 C.F.R. pt. 751).
- National Institute for Occupational Safety and Health. (1995). *Health hazard evaluation* (Rapport n° 91-0040-2510). NIOSH.
- National Institute for Occupational Safety and Health. (2019). *NIOSH pocket guide to chemical hazards*. NIOSH.
- National Institute for Occupational Safety and Health. (2021). Polynuclear aromatic hydrocarbons in air by GC-MS SIM, 5528. Dans *NIOSH manual of analytical methods* (5^e éd., p. 15). NIOSH.
- National Library of Medicine. (2023). *Methylene chloride*. NIH. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Methylene-Chloride>
- Nazdar Company. (2023). *Fiche de données de sécurité : Liquid tape reducer*. Nazdar Company
- NBC Meshtec Americas Inc. (2021). *Safety data sheet: Dynabond two-part high resistance frame adhesive*. NBC Meshtec Americas.
- Nieuwenhuizen, M. S. et Groeneveld, F. R. (2000). Formation of phosgene during welding activities in an atmosphere containing chlorinated hydrocarbons. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 61(4), 539-543. <https://doi.org/10.1080/15298660008984566>
- Nisse, P. (2015). Usage détourné de la gamma-butyrolactone en France : bilan 3 ans après l'application d'un arrêté d'interdiction de vente. Institut national de santé publique du

- Québec 2015 Vol. 31. https://www.inspq.qc.ca/sites/default/files/toxicologie-clinique/bit/2015bit_v31_n1_p23-29.pdf Occupational exposure to methylene chloride, 62 Fed. Reg., 1494 (10 janvier 1997) (à être codifié à 29 C.F.R. pt 1910, 1915 et 1926).
- Occupational Safety and Health Administration. (2013). *Substance safety data sheet and technical guidelines for methylene chloride*. OSHA.
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 29 C.F.R. § 1910.1052 (2024).
- Occupational Safety and Health Administration et National Institute for Occupational Safety and Health. (2013). *Methylene chloride hazards for bathtub refinishers* (N° OSHA - HA-3623-2013 et n° 2013-110). OSHA; NIOSH.
- Office of Technical Assistance and Technology. (2018). New case study: *S.E. Shires company*. Commonwealth of Massachusetts.
- Ohlgschläger, A., Menzel, K., Kate, A. T., Martinez, J. R., Frömbgen, C., Arts, J., . . . Beutel, K. (2019). Chloromethanes. Dans *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry* (p. 1-31). Wiley-VCH.
- Orapi. (2017a). *Fiche de données de sécurité: Graphene - Aerosol 650/400 ML Product code 4702A2*. Orapi
- Orapi. (2017b). *Safety data sheet: Target welders' anti-spatter*. SDS No.: 043. Orapi Canada.
- Organisation de coopération et de développement économiques. (2013). *Ligne directrice de l'OCDE pour les essais de produits chimiques - 301 : biodégradabilité facile*. OCDE.
- Organisme Professionnel de Prévention du Bâtiment et des Travaux Publics. (2019). *Décapants façades : aide au choix et prévention des risques*. OPPBTP.
- Ouellet, C. et Labrecque, C. (2023). *Guide sur la protection respiratoire : mise à jour* (Guide n° RG-1123-fr). IRSST.
<https://pharesst.irsst.qc.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1094&context=guides>
- Parlement européen. (2009). *Vers l'interdiction du dichlorométhane dans les décapants de peinture*. Parlement européen.
- Petra Automotive Products. (2023). *Fiche de données de sécurité: Mopar non-chlorinated brake parts cleaner 15 oz*. Petra Automotive Products
- PPG. (2015). *Technical data sheet: Eldorado PR-5044 neutral peroxide paint remover*. PPG Aerospace Coatings.
- PPG. (2017). *Safety data sheet: PR-5044 Eldorado neutral peroxide paint remover. Version 7*. PPG Aerospace PRC-DeSoto.
- Pratt, T. (2017). *Fiche de données de sécurité : Loctite SF 7631 paint stripper known as Loctite®chisel®paint stripper*. Numéro de révision 003.0. Henkel Canada Corporation.

Preisser, A. M., Budnik, L. T., Hampel, E. et Baur, X. (2011). Surprises perilous: Toxic health hazards for employees unloading fumigated shipping containers. *Science of the Total Environment*, 409(17), 3106-3113. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.053>

Protection of Environment, 40 C.F.R. §§ 50-90 (Subchapter C).

Protection of Environment, 40 C.F.R. § 355.1 (Subchapter J).

Ramphal, I., LaBine, A., Hazard, K., Ng, S. et Zhang, S. (2019). *Greener alternatives to dimethylformamide use in polyurethane synthetic leather*. Berkeley Center for Green Chemistry.

Rayasam, S., Singla, V., Woodruff, T., Gant, M., Hom, E., Jagai, S., Morello-Frosch, R., Robinson, J.F., Rogers, T., Schettler, T., Shusterman, D. (2019). *Comments from academics, scientists and clinicians on a commercial paint and coating removal training, certification and limited access program for methylene chloride*. University of California San Francisco.
https://prhe.ucsf.edu/sites/g/files/tkssra341f/wysiwyg/2019%202012%2030_methylene%20chloride%20risk%20evaluation_UCSF%20PRHE_EPA_comments%20and%20appendices.pdf

Recochem. (2019). *Fiche de données de sécurité : décapant pour peinture*. FDS No. 17840078. Recochem.

Recochem. (2023a). *Fiche de données de sécurité selon Règlement sur les produits dangereux (RPD), Zip-Strip heavy duty stripper, version GHS 1.0*. Recochem.

Recochem. (2023b). *Solvable nettoyeur à pinceaux et rouleaux : fiche de données de sécurité selon les exigences du SIMDUT 2015, Version Num: 8.11*. Recochem.

Recochem. (2023c). *Solvable PRO diluant à peinture : fiche de données de sécurité selon les exigences du SIMDUT 2015, Version Num: 4.7*. Recochem

Recochem. (2024). *Solvable clear coat wood preservative : fiche de données de sécurité selon les exigences du SIMDUT 2015, Version Num: 3.4*. Recochem.

Reddy, V. et Saharay, M. (2019). Solubility of caffeine in supercritical CO₂: A molecular dynamics simulation study. *The Journal of Physical Chemistry*, 123(45), 9685-9691.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b08351>

Règlement canadien sur la santé et la sécurité au travail, DORS/86-304 (Gaz. Can. II).

Règlement de la Commission n° 276/2010, 2010 J.O. (L 86), 7-12.

Règlement de la Commission n° 468/2009, 2009 J.O. (L 141), 1-2.

Règlement de la Commission n° 1907/2006, 2006 J.O. (L 396), 1-849.

Règlement de la Commission n° 2037/2000, 2000 J.O. (L 244), 1-24.

Règlement de la Commission n° 2024/197, 2024 J.O. (L 202), p. 1.

Règlement limitant la concentration en composés organiques volatils de certains produits, DORS/2021-268 (Gaz. Can. II).

Règlement modifiant le Règlement sur la santé et la sécurité du travail, 2024, Décret 280-2024 (G.O. II).

Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère, R.L.R.Q., c. Q-2, r. 4.1.

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

Règlement sur les solvants de dégraissage, DORS/2003-283 (Gaz. Can. II).

Règlement sur les produits chimiques et contenants de consommation, DORS/2001-269 (Gaz. Can. II).

Règlement sur les produits dangereux, DORS/2015-17 (Gaz. Can. II).

Règlement sur les substances appauvrissant la couche d'ozone et les halocarbures de remplacement, DORS/2016-137 (Gaz. Can. II).

Rema Tip Top AG. (2022). *Fiche de données de sécurité conformément au règlement (CE) no 1907/2006 Tip top hardener UT-R20 : code de produit 00156-0028.* Rema Tip Top AG.

Rema Tip Top Australia Pty Ltd. (2017). *Safety data sheet: Tip top hardener E40. Product code 00156-0026-AUS.* Rema Tip Top Australia Pty Ltd.

Rema Tip Top North America. (2015a). *Safety data sheet: Rema tip top. Product #: ER42/15G, ER42/30G Rev. #2.* Rema Tip Top North America.

Rema Tip Top North America. (2015b). *Safety data sheet: Rema tire repair materials.* Rema Tip Top North America.

Rema Tip Top/North America. (2023). *Safety data sheet: Rema tip top. Product #s: E40/15G, E40/30G.* Rema Tip Top North America.

RhinoTech. (2018). *RMA3000: Safety data sheet.* RhinoTech

RhinoTech. (2018). *RMA3500: Safety data sheet.* RhinoTech

Risk & Policy Analysts Limited. (2007). *Impact assessment of potential restrictions on the marketing and use of dichloromethane in paint strippers.* Commission européenne.
<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b9daf67a-98fc-4ca9-ab30-441dae1e1965>

Ritter, S. K. (2014). Seeing The Green Side Of Innovation. Chemical & Engineering News, 92(26), 24-25. Tiré de <https://cen.acs.org/articles/92/i26/Seeing-Green-Side-Innovation.html>

- 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://pharesst.irsst.qc.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1071&context=guides>
- Roelofs, C. R. et Ellenbecker, M. J. (2003). Source reduction for prevention of methylene chloride hazards: Cases from four industrial sectors. *Environmental Health*, 2, article 9.
<https://doi.org/10.1186/1476-069X-2-9>
- Rosenman, K. (2021). Deaths from methylene chloride exposure when chemicals used at home or work can kill. *JAMA Internal Medicine*, 18(6), 806-807.
<https://doi.org/10.1001/jamainternmed.2021.1058>
- Rossberg, M., Lendle, W., Pfeleiderer, G., Tögel, A., Dreher, E. L., Langer, E., . . . Beutel, K. K. (2005). Chlorinated hydrocarbons. Dans B. Elvers, S. Hawkins et W. Russey (édit.), *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry* (p. 1-184). Wiley-VCH.
- Rossberg, M., Lendle, W., Pfeleiderer, G., Tögel, A., Torkelson, T. R. et Beutel, K. K. (2012). Chloromethanes. Dans *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry* (vol. 9, p. 15-42). Wiley-VCH.
- Roviello, V., Gilhen-Baker, M. et Roviello, G. N. (2023). Graffiti paint on urban trees: A review of removal procedures and ecological and human health considerations. *Sustainability*, 15(5), article 4022. <https://doi.org/10.3390/su15054022>
- Rullman, J. (2015). *Methylene chloride exposure evaluation during active pharmaceutical ingredient manufacturing* (Mémoire de maîtrise, Montana Tech of The University of Montana).
- Rust-Oleum. (2023). *Fiche de données de sécurité : Rust-Oleum® NR.1 décapant vert*. Version 4. Rust-Oleum Europe - Martin Mathys NV.
- Santé Canada. (2012). *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : document technique : le dichlorométhane*. Santé Canada.
- Santé Canada. (2021). *Publication de la ligne directrice d'ICH Q3C (R8) impuretés : directive sur les solvants résiduels, référence 21-109767-280*. Santé Canada.
- Savogran. (2015). *Safety data sheet: Stypeeze biodegradable. SI No. 4*. Savogran.
- Schulte, D. (2017). *Un environnement sain, des Canadiens et une économie en santé : renforcer la Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999) : rapport du Comité permanent de l'environnement et du développement durable*. Chambre des Communes Canada.
- Shi, X., Zhang, J., Kong, L., Wang, L., Dou, Y., Wang, S., . . . Yang, X. (2022). A mixed solvent strategy enabling efficient all-solution-processed perovskite light-emitting diodes. *Journal of Materials Chemistry C*, 10(23), 8964-8971. <https://doi.org/10.1039/D2TC01201D>

- Shimizu, H. et Takahashi, Y. (2012). Review of adhesive techniques used in removable prosthodontic practice. *Journal of Oral Science*, 54(3), 205-211. <https://doi.org/10.2334/josnusd.54.205>
- Shinyashiki, M., Eiguren-Fernandez, A., Schmitz, D. A., Di Stefano, E., Li, N., Linak, W. P., . . . Cho, A. K. (2009). Electrophilic and redox properties of diesel exhaust particles. *Environmental Research*, 109(3), 239-244. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2008.12.008>
- Siegemund, G., Schwertfeger, W., Feiring, A., Smart, B., Behr, F., Vogel, H. et McKusick, B. (2012). Fluorine compounds, organic. Dans *Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry* (vol. 15, p. 443-494). Wiley-VCH.
- Sigma-Aldrich Canada LTD. (2023). *Fiche de données de sécurité : dichloromethane pour analyse Emsure® ACS,ISO,Reag. Ph Eur*. Sigma-Aldrich Canada.
- Sittig, M. (2007). *Pharmaceutical manufacturing encyclopedia* (3^e éd.). William Andrew Publishing.
- Solutions chimiques Deaneco. (2020). *Bulletin technique: Cee-Bee® A-202*. Solutions chimiques Deaneco.
- Space Environment Labs. - Vacseal Inc. (2020). *Safety data sheet: Vacseal® high vacuum leak sealant, Aerosol*. Space Environment Labs. – Vacseal.
- Stenzel, M. et Arnold, S. (2015). Rules and guidelines to facilitate professional judgments. Dans S. D. Jahn, W. Bullock et J. S. Ignacio (édit.), *A strategy for assessing and managing occupational exposures* (4^e éd., p. 347-360). AIHA.
- Suárez-Macías, J., Terrones-Saeta, J. M., Iglesias-Godino, F. J. et Corpas-Iglesias, F. A. (2020). Surface treatments with dichloromethane to eliminate printing lines on polycarbonate components printed by fused deposition modelling technology. *Materials*, 13(12), article 2724. <https://doi.org/10.3390/ma13122724>
- SuperDécapant inc. (2019). *Fiche technique : super décapant nouvelle génération*. SuperDécapant.
- SuperDécapant inc. (2023a). *Fiche de données de sécurité : décapant nouvelle génération*. SuperDécapant.
- SuperDécapant inc. (2023b). *Fiche de données de sécurité : décapant pour colles nouvelle génération*. SuperDécapant.
- SuperDécapant inc. (2023c). *Safety data sheet: New generation paint stripper 2022*. SuperDécapant.
- Surf-Pro. (2018). *Fiche technique : Le décolleur*. Code : BO-1960-1/BO1960-4. Surf-Pro.
- Swing Paints. (2018a). *Fiche de données de sécurité : Circa 1850 décapants à meubles*. FDS 1800, Swing Paints.

- Swing Paints. (2018b). *Safety data sheet: Circa 1850 Super D-Solver gel stripper. SDS 1846*. Swing Paints.
- Takei, S. et Hanabata, M. (2017). High-resolution nanopatterning of biodegradable polylactide by thermal nanoimprint lithography using gas permeable mold. *AIP Advances*, 7, article 035110. <https://doi.org/10.1063/1.4978448>
- Team Binzel. (2020). *Catalogue Accessoires Edition 2020/1*. Team Binzel.
- Techniweld Corporation. (2019). *Safety data sheet: Solvent based anti-spatter / Nozzle shield 1620-16*. Techniweld Corporation.
- Toxics Use Reduction Institute. (2017). *Print shop goes all green with new equipment minuteman press of Foxboro eliminates the use of solvents*. TURI.
- Toxics Use Reduction Institute. (2019). *Assabet valley technical high school auto technology program switches to bio-based degreasers*. TURI.
- Toxics Use Reduction Institute. (2021). *Alternatives to halogenated solvents used in surface cleaning*. TURI.
- Toxics Use Reduction Institute. (2022). *Product information: Ethyl 408*. TURI.
- Tri-Tex Co Inc. (2019). *Fiche de données de sécurité S1800-5PINK*. Tri-Tex Co.
- Triolet, J. (2005). Panorama de l'utilisation des solvants en France fin 2004. *Hygiène et sécurité du travail*, 199, 65-97.
- Troughton, M. J. (2008). *Handbook of plastics joining: A practical guide* (2^e éd.). William Andrew.
- United States Environmental Protection Agency. (1997). *Cleaner technologies substitutes assessment: Lithographic blanket washes*. EPA.
- United States Environmental Protection Agency. (2011). *Toxicological review of dichloromethane (methylene chloride) (CAS No. 75-09-2) in support of summary information on the Integrated Risk Information System (IRIS)* (Publication n° EPA/635/R-10/003F). EPA.
- United States Environmental Protection Agency (2020). *Risk evaluation for methylene chloride (dichloromethane, DCM) CASRN: 75-09-2* (Document n° EPA-740-R1-8010). EPA
- Veolia. (2018). *Sales specification: Reclaimed methylene chloride*. Veolia.
- Victoria Lub PTY LTD. (2021). *Safety data sheet: Graphene - Aerosol 650/400 ML Product code 4702A4*. Victoria Lub PTY.
- Villeneuve, C.-A., Marchand, G., Gardette, M., Lavoie, J., Bégin, D. et Debia, M. (2017). *Microorganismes dans les fontaines biologiques de dégraissage : évaluation de l'exposition professionnelle dans les ateliers d'entretien mécanique* (Rapport n° R-992).

IRSST. <https://pharesst.irsst.qc.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1138&context=rapports-scientifique>

Virenfeldt, M., Ravnsbæk, J., Kokholm, T., Kortegaard, P., Rasmussen, D., Donau, S. S., . . . Niga, P. (édit.). (2018). *Substitution of NMP in paint for hard PVC*. The Danish Environmental Protection Agency.

Vuorinen, A.-M., Dyer, S. R., Vallittu, P. K. et Lassila, L. V. J. (2010). Bonding of composite resin to dentin using rigid rod polymer modified primers. *The Journal of Adhesive Dentistry*, 175-182. <https://doi.org/10.3290/j.jad.a17538>

W. M. Barr. (2019). *Safety data sheet: Citristrip stripping gel*. W. M. Barr.

W.M. Barr EHS Dept. (2021). *Safety data sheet: Aircraft ultra paint remover*. W. M. Barr.

Walter Technologies pour surfaces inc. (2018). Fiche de données de sécurité: SC 400, code de produit 53-G513 (500 ml), 53-G516 (3.78 L), 53-G517 (20 L), 53-G 518 (200 L)

Walter Technologies pour surfaces inc. (2018). *Fiche de données de sécurité: Rock'n roll paste*. Walter Technologies pour surfaces.

Walter Technologies pour surfaces inc. (2022a). *Fiche de données de sécurité: E Weld 3 aerosol*. Walter Technologies pour surfaces,

Walter Technologies pour surfaces inc. (2022b). *Fiche de données de sécurité: E Weld 4*. Walter Technologies pour surfaces.

Weld-On. (2022). *Safety sata sheet acc. to 29 CFR 1910.1200 App D: Weld-On 705 Clear*. Weld-On.

Welton, T. (2015). Solvents and sustainable chemistry. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 471(2183), article 20150502. <https://doi.org/10.1098/rspa.2015.0502>

Weman, K. (2003). *Welding processes handbook*. CRC Press.

Wolf, K. et Morris, M. (2006). *Assessment, development and demonstration of alternatives for five emerging solvents*. Institute for Research and Technical Assistance.

Workplace environmental exposure level guide: n-Methyl-2-pyrrolidone. *Toxicology and Industrial Health*, 2022, 38(6), 309-329. <https://doi.org/10.1177/07482337221093838>

Wu, T. et Han, B. (2013). Supercritical carbon dioxide (CO₂) as green solvent. Dans P. T. Anastas et J. B. Zimmerman (édit.), *Innovations in green chemistry and green engineering* (p. 297-326). Springer.

Würth Canada Limited. (2014). *Fiche de données de sécurité/Fiche signalétique, Nettoyant pour freins 18,9L*. Würth Canada.

Würth France. (2022). *Fiche de données de sécurité conformément au Règlement (CE) No. 1907/2006, Nettoyant freins 20L RefilloMat*. Würth France.

xF Technologies. (2022). *Safety data sheet: Ethyl 408*. Ver 2.0. xF Technologies.

Yamada, K., Kumagai, S. et Endo, G. (2015). Chemical exposure levels in printing workers with cholangiocarcinoma (second report). *Journal of Occupational Health*, 57(3), 245-252. <https://doi.org/10.1539/joh.14-0239-OA>

Yuan, T.-F., Le, J., Wang, S.-T. et Li, Y. (2020). An LC-MS/MS method to analyze the steroid metabolome with high accuracy and from small serum samples. *Journal of Lipid Research*, 61(4), 580-586. <https://doi.org/10.1194/jlr.D119000591>

Zaid, A. N. (2020). A comprehensive review on pharmaceutical film coating: Past, present, and future. *Drug Design, Development and Therapy*, 14, 4613-4623. <https://doi.org/10.2147/DDDT.S277439>

ANNEXE A

A.I Propriétés physico-chimiques du Dichlorométhane (DCM)

Tableau 5. Propriétés physico-chimiques du DCM

Propriétés	Valeurs ¹⁹³	Références
Synonymes	Chlorure de méthylène Methylene bichloride Methylene dichloride	Reptox ¹⁹⁴
Nos CAS ¹⁹⁵	75-09-2	Chemical Abstracts Service (2024)
Numéro RTECS ¹⁹⁶	PA8050000	NIOSH (2019)
Numéro EINECS ¹⁹⁷	200-838-9	ECHA Chemicals Database ¹⁹⁸
Formule moléculaire	CH ₂ Cl ₂	National Library of Medicine (2023)
Masse moléculaire	84,93g/mol	National Library of Medicine (2023)
État physique	Liquide	National Library of Medicine (2023)
Apparence	Incolore	National Library of Medicine (2023)
Odeur	Éthérée pénétrante ou douce sucrée	National Library of Medicine (2023)
Seuil de détection olfactive	25-622 ppm	Occupational Safety and Health Administration (2013); Santé Canada (2012)
Densité	1,33 g/cm ³ à 20 ° C	National Library of Medicine (2023)
Point de fusion	-95 ° C	Chemical Abstracts Service (2024)

¹⁹³ Le facteur de conversion des unités de concentration est de 1 ppm = 3,53 mg/m³ et inversement 1 mg/m³ = 0,28 ppm (25 °C et 1013 hPa)

¹⁹⁴ https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/Pages/fiche-complete.aspx?no_produit=2899

¹⁹⁵ Numéro d'enregistrement assigné par le Chemical Abstracts Service de l'American Chemical Society (Columbus, Ohio) : <https://www.cas.org/cas-data/cas-registry>. Ce numéro permet d'obtenir facilement de l'information physicochimique et toxicologique en consultant p. ex. : le Répertoire toxicologique (<https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/Pages/repertoire-toxicologique.aspx>) et la base de données PubChem : <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>

¹⁹⁶ Registry of Toxic Effects of Chemical Substances

¹⁹⁷ European INventory of Existing Commercial chemical Substances

¹⁹⁸ <https://echa.europa.eu/fr/substance-information/-/substanceinfo/100.000.763>

Propriétés	Valeurs ¹⁹³	Références
Point d'ébullition	39,75 °C	National Library of Medicine (2023)
Tension de vapeur	435 mmHg à 25 °C	National Library of Medicine (2023)
Densité de vapeur	2,93	National Library of Medicine (2023)
Concentration de vapeur saturante	572 368 ppm	Calculée à partir de la tension de vapeur
Taux d'évaporation (acétate de butyle normal = 1)	14,5	Bégin et Gérin (2002)
Point d'éclair (pur)	-	U.S. EPA (2020)
Limite inférieure d'inflammabilité	13 %	National Library of Medicine (2023)
Limite supérieure d'inflammabilité	23 %	National Library of Medicine (2023)
Température d'auto-ignition	556 °C	National Library of Medicine (2023)
Coefficient de partage octanol/eau (log K _{ow})	1,25	EPA (2020)
Coefficient de partage octanol/air (log K _{OA})	2,27	EPA (2020)
Solubilité dans l'eau	13 mg/mL à 25 °C	National Library of Medicine (2023)
Solubilité dans les autres liquides	Soluble dans l'eau, les alcools, les éthers et la plupart des solvants organiques	National Library of Medicine (2023); INRS (2021)
Paramètres de solubilité de Hansen Composante de dispersion (δ_d) Composante polaire (δ_p) Composante de liaison hydrogène (δ_h)	18,4 (J.cm ⁻³) ^{1/2} 6,4 (J.cm ⁻³) ^{1/2} 6,2 (J.cm ⁻³) ^{1/2}	Bégin et Gérin (2002)
Stabilité	Relativement stable en absence d'humidité	National Library of Medicine (2023)
Incompatibilité	Oxydants et acides forts et métaux chimiquement actifs	National Library of Medicine (2023)
Réactivité	Sujet à l'hydrolyse	National Library of Medicine (2023)
Constante diélectrique	9,02 à 20 °C	EPA (2020)
Indice Kauri-butanol	136	Bégin et Gérin (2002)

Propriétés	Valeurs ¹⁹⁹	Références
Coefficient de Henry	$3,25 \times 10^{-3} \text{ atm.m}^3/\text{mole}$ (25 °C) ¹⁹⁹	National Library of Medicine (2023)
Chaleur latente de vaporisation	28,56	Bégin et Gérin (2002)
Tension superficielle	28,20 dyne/cm à 25 °C	National Library of Medicine (2023)
Viscosité	0,437 mPa.s à 20 °C	National Library of Medicine (2023)

¹⁹⁹ Cela indique une volatilisation rapide lorsque solubilisé.

ANNEXE B

B.1 Méthode de calcul du VHR²⁰⁰ et résultats associés à une liste de solvants

Le calcul du VHR, tel qu'illustré à l'équation suivante, est une méthode relativement simple de comparaison des solvants permettant de combiner la capacité d'un solvant à générer des vapeurs et sa VLE pour juger du risque. Plus l'indice est faible, plus le solvant est recommandable.

$$\text{VHR} = \text{Csat} / \text{VLE} \quad (1)$$

Avec Csat = concentration de vapeur saturante en parties par million (ppm)
 VLE = valeur limite d'exposition professionnelle (ppm)

$$\text{Et} \quad \text{Csat} = (\text{Pvap} / \text{Patm}) \times 10^6 \quad (2)$$

Avec Pvp = pression ou tension de vapeur du solvant à une température donnée (p. ex. 25 °C)
 Patm = pression atmosphérique à la même température
 Les deux pressions doivent être dans la même unité.

Pour les mélanges de solvants, il est possible de calculer des VHR en pondérant les VHR de chaque composant par sa fraction molaire, ce qui donne l'équation suivante :

$$\text{VHR}_m = \sum ((x_i \times \text{Csat}_i) / \text{VLE}_i) \quad (3)^{201}$$

Avec VHR_m = VHR du mélange m
 i = solvant i
 n = nombre de solvants dans le mélange m
 x_i = fraction molaire du solvant i
 VLE_i = valeur limite d'exposition professionnelle du solvant i

²⁰⁰ Les masses moléculaires et les tensions de vapeur des solvants nécessaires aux calculs peuvent être trouvées dans des banques de données telles que le RepTox (<https://reptox.cnesst.gouv.qc.ca/Pages/repertoire-toxicologique.aspx>) ou Pubchem (<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>; National Library of Medicine (2023)).

²⁰¹ Bien que la presque totalité des utilisations du DCM et des options de remplacement du DCM soient des mélanges, seule l'analyse des substances actives concernant le VHR a été rapportée dans la présente monographie. Ainsi, seules les équations 1 et 2 ont été utilisées.

Tableau 6. Liste de solvants avec leur n° CAS²⁰² correspondant et les paramètres permettant le calcul de leur VHR

Substance	No CAS	Pression de vapeur (en mmHg à 25 °C) ²⁰³	Concentration à saturation (ppm)	VLE (TWA) (ppm) ²⁰⁴	Autre valeur 8h (ppm)	Juridiction	VHR
2-(2-Butoxyéthoxy)-éthanol	112-34-5	0,06	79	ND	10	UE	8
Carbonate de propylène	108-32-7	0,045	59	ND	6	Suisse	10
Gamma-butyrolactone	96-48-0	0,45	592	ND	50	Finlande	12
Diméthylsulfoxyde	67-68-5	0,6	789	ND	50	Allemagne	16
N-Méthyl-2-pyrrolidone	872-50-4	0,345	454	ND	20	Allemagne	23
Alcool benzylique	100-51-6	0,094	124	ND	5	Allemagne	25
Éther monoéthylique de diéthylène glycol	111-90-0	0,13	171	ND	6	Allemagne	29
Éther monométhylique du diéthylène glycol	111-77-3	0,25	329	ND	10	Finlande	33
Adipate diméthylique	627-93-0	0,06	79	ND	1,5	Allemagne	53
p-Chlorotoluène	106-43-4	2,79 ²⁰⁵	3671	ND	50	Finlande	73

²⁰² Numéro d'enregistrement assigné par le Chemical Abstracts Service de l'American Chemical Society (Columbus, Ohio) : <https://www.cas.org/cas-data/cas-registry>.

²⁰³ Selon la base de données PubChem : <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/> du National Library of Medicine (2023)

²⁰⁴ Selon les fiches à jour en 2023 disponibles sur le site <https://www.acgih.org/>.

²⁰⁵ La pression de vapeur à 20 °C a été utilisée pour le calcul car aucune n'était disponible à 25 °C.

Substance	No CAS	Pression de vapeur (en mmHg à 25 °C) ²⁰³	Concentration à saturation (ppm)	VLE (TWA) (ppm) ²⁰⁴	Autre valeur 8h (ppm)	Juridiction	VHR
2-butoxyéthanol	111-76-2	0,88	1158	20	S.O.		58
o-Chlorotoluène (2-chlorotoluène)	95-49-8	3,43	4513	50	S.O.		90
Heptane et isomères	142-82-5	46	60526	400	S.O.		151
2 amino-éthanol (monoéthanolamine)	141-43-5	0,404	532	3	S.O.		177
Glutarate diméthylque	1119-40-0	0,2 ²⁰⁶	263	ND	1,2	Allemagne	219
Alcool isopropylique (isopropanol)	67-63-0	45,4	59737	200	S.O.		299
Acétate d'éthyle	141-78-6	93,2	122632	400	S.O.		307
Xylènes	1330-20-7	6,65-8,80 ²⁰⁷	8552-11578	20	S.O.		428-579
Succinate diméthylque	106-65-0	0,4	526	ND	1,2	Allemagne	439
Acétate de propyle	109-60-4	35,9	47237	100	S.O.		472
d-limonène	5989-27-5	1,98	2605	ND	5	Allemagne	521
Méthylal (diméthoxyméthane)	109-87-5	400	526316	1000	S.O.		526
Éthylbenzène	100-41-4	9,6	12632	20	S.O.		632

²⁰⁶ La pression de vapeur à 20 °C a été utilisée pour le calcul car aucune n'était disponible à 25 °C.

²⁰⁷ Plusieurs isomères ont été considérés.

Substance	No CAS	Pression de vapeur (en mmHg à 25 °C) ²⁰³	Concentration à saturation (ppm)	VLE (TWA) (ppm) ²⁰⁴	Autre valeur 8h (ppm)	Juridiction	VHR
Méthanol	67-56-1	127	167105	200	S.O.		836
PERC	127-18-4	18,2	23947	25	S.O.		958
Lactate d'éthyle ((S)-2-hydroxypropionate d'éthyle)	97-64-3	3,75	4934	ND	5	Finlande	987
Méthacrylate de méthyle	80-62-6	38,5	50658	50	S.O.		1013
N,N-Diméthylformamide	68-12-2	3,87	5092	5	S.O.		1018
Acétone (ou 2-propane ou propanone)	67-64-1	231	303947	250	S.O.		1216
Cyclohexane	110-82-7	96,9	127500	100	S.O.		1275
Diméthylamino-2-éthanol	108-01-0	3,18	4184	ND	3	Ontario	1395
Acétate de méthyle	79-20-9	216,2	284474	200	S.O.		1422
Méthyl éthyl cétone (butanone-2)	78-93-3	90,6	119211	75	S.O.		1589
Acide acétique glacial	64-19-7	15,7 ²⁰⁸	20658	10	S.O.		2066
Peroxyde d'hydrogène	7722-84-1	1,97	2592	1	S.O.		2592
n-hexane	110-54-3	153	201316	50	S.O.		4026

²⁰⁸ La pression de vapeur à 20 °C a été utilisée pour le calcul car aucune n'était disponible à 25 °C.

Substance	No CAS	Pression de vapeur (en mmHg à 25 °C) ²⁰³	Concentration à saturation (ppm)	VLE (TWA) (ppm) ²⁰⁴	Autre valeur 8h (ppm)	Juridiction	VHR
Tétrahydrofurane	109-99-9	162	213158	50	S.O.		4263
1,3-dioxolane	646-06-0	79 ²⁰⁹	103947	20	S.O.		5197
Acide formique	64-18-6	42,59	56039	5	S.O.		11208
Dichlorométhane	75-09-2	435	572368	50	S.O.		11447
1,1,1,2-Tétrafluoroéthane (norflurane)	811-97-2	4990	6565789	ND	500	Suède	13132
2-méthoxyéthanol	109-86-4	9,5	12500	0,1	S.O.		125000
Ammoniac	7664-41-7	7500	9868421	25	S.O.		394737

²⁰⁹ La pression de vapeur à 20 °C a été utilisée pour le calcul car aucune n'était disponible à 25 °C.

ANNEXE C

C.I Liste des catégories, exemples de critères de P2OASys²¹⁰ et résultats associés pour une liste de solvants

Tableau 7. Catégories²¹¹ et exemples de critères de danger utilisés dans le système étasunien P2OASys

Critère de danger	Indicateur/unité	Nombre de classes pour cotation
1 - Effets aigus chez l'humain		
Toxicité par inhalation	CL50 ²¹² ppm	5 ²¹³
Toxicité orale	DL50 ²¹⁴ orale mg/kg	5
Toxicité cutanée	DL50 cutanée mg/kg	5
Irritation respiratoire	Phrases clés	5 ²¹⁵
Irritation cutanée	Phrases clés	5
Irritation oculaire	Phrases clés	5
Limites d'exposition	PEL ²¹⁶ / TLV ²¹⁷ ppm	5
Limites d'exposition	PEL / TLV (particules) mg/m ³	5
DIVS ²¹⁸	Concentration dans l'air (ppm)	5
2 - Effets chroniques chez l'humain		
Cancérogène	Classes du CIRC ²¹⁹ ou de l'U.S. EPA (<i>Guidelines for carcinogen risk assessment</i>)	5
Mutagène/Térogène	Phrases clés	5
Effets reprotoxiques	Phrases clés	5
Effets sur le développement ou sur la reproduction	Phrases clés	5

²¹⁰ <https://p2oasys.turi.org/chemical/hazard-score-matrix>

²¹¹ Les critères présents dans chaque catégorie ne sont pas présentés de manière exhaustive; cependant, pour la plupart des catégories, les phrases de risque du SGH peuvent également être considérées.

²¹² Concentration létale cinquante.

²¹³ Ces 5 classes sont, lorsque quantitatives, divisées en intervalles.

²¹⁴ Dose létale cinquante.

²¹⁵ Ces 5 classes peuvent, lorsque qualitatives, être généralement identifiées par les mots suivants : absent (ou non classifié selon le SGH), léger, moyen, sévère, très sévère.

²¹⁶ *Permissible Exposure Limit* = valeurs limites d'exposition professionnelle à caractère légal aux États-Unis, voir : <https://www.osha.gov/annotated-pels>.

²¹⁷ *Threshold Limit Value* = recommandations de valeurs limites d'exposition professionnelle de l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists, voir : <https://www.acgih.org/data-hub/#E>.

²¹⁸ Concentration entraînant un « Danger immédiat pour la vie ou la santé » (DIVS; en anglais : « *Immediately Dangerous for Life or Health* »). Elles peuvent être obtenues en ligne : <http://www.cdc.gov/niosh/idlh/intridl4.html>.

²¹⁹ <https://monographs.iarc.who.int/monographs-available/>

Critère de danger	Indicateur/unité	Nombre de classes pour cotation
Neurotoxicité	Catégories du SGH	2 ou 3 selon si exposition ponctuelle ou répétée
Sensibilisation ou maladie respiratoire	Phrases clés	4
Effets sur le système endocrinien	Perturbateur endocrinien prioritaire selon l'UE	4
Autres effets chroniques sur les organes	Phrases clés	2
3 - Dangers écologiques		
Toxicité aquatique aigüe	CL50 dans l'eau mg/L	5
Toxicité aquatique aigüe	CE50 ²²⁰ plante mg/L	5
Toxicité aquatique chronique (rapidement dégradable)	NOAEC ²²¹ poisson (mg/L)	3
Toxicité aquatique chronique (non rapidement dégradable)	mg/L	3
4 - Dégradation environnementale et transport		
Persistence	Demi-vie dans l'air en jours	5
Persistence	Demi-vie dans l'eau en jours	5
Dégradabilité rapide	Étude de 28 jours sur le % de répartition du carbone organique dissous	5
Dégradabilité rapide	Demi-vie d'hydrolyse en jours	5
Bioconcentration/bioaccumulation	Log K _{ow} ²²² /P _{ow}	5
5 - Dangers atmosphériques		
Gaz à effet de serre	Potentiel de réchauffement global en équivalent CO ₂ (100 ans)	5
Substance appauvrissant la couche d'ozone	Unités de potentiel de déplétion de l'ozone	5
Formation de pluie acide	O/N ²²³	2
NESHAP ²²⁴	O/N	2
6 - Propriétés physiques		
Pression de vapeur	mmHg	5

²²⁰ Concentration effective cinquante = concentration aqueuse d'une substance causant plus de 5 % et moins de 50 % de réduction de croissance végétale.

²²¹ *No Observed Adverse Effect Concentration* = concentration sans effet délétère observé.

²²² K_{ow} = rapport de la concentration de la substance dans l'octan-1-ol à celle dans l'eau à l'équilibre.

²²³ Oui/non

²²⁴ *National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants*, en vertu du « *Clean Air Act* » étasunien; voir : <https://www.epa.gov/compliance/national-emission-standards-hazardous-air-pollutants-compliance-monitoring>.

Critère de danger	Indicateur/unité	Nombre de classes pour cotation
Inflammabilité (forme liquide)	NFPA ²²⁵ /HMIS ²²⁶	5
Point d'éclair (forme liquide)	°C	5
Inflammabilité (forme gazeuse)	Phrases H du SGH	2
Réactivité	NFPA/HMIS	5
pH	Unités de pH	5
Corrosivité	Phrases clé	5
Odeur	Phrases clés	5
Composé organique volatil	g/L	5
7 - Facteurs associés au processus		
Chaleur	WBGT ²²⁷ , °C	5
Bruit	dBA/h ²²⁸	5
Vibration	mm/s ²²⁹ pour une petite machine	4
Risque ergonomique	Fréquence	5
Risque ergonomique	Niveau de risque	5
Risque psychosocial	Horaire de travail	3
Système à haute pression	% de variation de pression par rapport à l'air ambiant	5
Système à haute température	% de variation de la température par rapport à l'air ambiant	5
Utilisation d'eau	% de réutilisation	5
Utilisation d'énergie	% d'énergie renouvelable	5
Potentiel d'exposition	Fréquence peu probable	3
8 - Facteurs associés au cycle de vie du produit		
Effets en amont	Phrases clés	5
Risques pour le consommateur	Phrases clés	4
Danger de mise au rebut (décharge, incinération)	Phrases clés	5
Quantité à déclarer	Livres	5
Recyclage	% recyclé en fin de vie	5
Recyclage	% de produits recyclés utilisé pour la production	5
Ressources renouvelables et non renouvelables	% de matériaux renouvelables	5

²²⁵ National Fire Protection Association.

²²⁶ *Hazardous Materials Identification System*.

²²⁷ *Wet-bulb globe temperature* = température mesurée à l'aide d'un thermomètre à globe mouillé pour l'évaluation de la contrainte thermique.

²²⁸ Pression sonore en décibel A

²²⁹ Intensité de la vibration en millimètre par seconde.

Lorsque qu'une sous-catégorie a de multiples paramètres à considérer, par exemple, classements selon le CIRC, l'ACGIH et l'OSHA dans la sous-catégorie cancérigène, la cote attribuée à cette sous-catégorie est directement la plus élevée de tous les paramètres. Cependant, la cote attribuée à une catégorie est la moyenne des 2 cotes les plus élevées parmi les sous-catégories. L'utilisateur a cependant la liberté d'adapter l'outil à sa réalité en mettant plus ou moins d'emphasis sur une catégorie en fonction de sa propre réalité et de l'application qu'il souhaite faire de la substance.

Tableau 8. Résultats de cote P2OASys pour une liste de solvants

Substance	No CAS	Cote globale	2 à 5 sous-catégories les plus contributives
Adipate diméthylque	627-93-0	3,5	Dégradation environnementale et transport, dangers écologiques
Carbonate de propylène	108-32-7	3,5	Irritation des yeux, risques à la sécurité
Glutarate diméthylque	1119-40-0	3,6	Persistance environnementale
Acétate de méthyle	79-20-9	4	Propriétés physiques, effets aigus, facteurs de cycle de vie
Éther monoéthylque de diéthylène glycol	111-90-0	4,1	Irritation des yeux, mutagène/tératogène et neurotoxique
Éther monométhylque du diéthylène glycol	111-77-3	4,3	Effets aigus, effets chroniques
Méthylal (diméthoxyméthane)	109-87-5	4,5	Propriétés physiques, facteurs de procédé, facteurs de cycle de vie
2-(2-Butoxyéthoxy)-éthanol	112-34-5	4,5	Irritation des yeux, effets sur le système endocrinien et effets chroniques sur d'autres organes
Lactate d'éthyle ((S)-2-hydroxypropionate d'éthyle)	97-64-3	4,6	Effets aigus, propriétés physiques
Alcool benzylique	100-51-6	4,8	Effets aigus, effets chroniques
Gamma-butyrolactone	96-48-0	4,9	Effets aigus, effets chroniques, propriétés physiques
Succinate diméthylque	106-65-0	4,9	Effets aigus, dégradation environnementale et transport, propriétés physiques, facteurs de cycle de vie
Éthylène glycol	107-21-1	5	Effets sur le système endocrinien, effets chroniques sur d'autres organes
Acétate d'éthyle	141-78-6	5,1	Propriétés physiques, effets aigus, facteurs de procédés, facteurs associés au cycle de vie
Alcool isopropylique (isopropanol)	67-63-0	5,1	Propriétés physiques, effets aigus, effets chroniques
Acide acétique glacial	64-19-7	5,8	Effets aigus, propriétés physiques
2-butoxyéthanol	111-76-2	5,3	Effets aigus, effets chroniques
Acétate de propyle	109-60-4	5,9	Effets aigus, propriétés physiques
Diméthylsulfoxyde	67-68-5	5,9	Facteurs associés au processus, effets aigus, dégradation environnementale et transport
d-limonène	5989-27-5	6	Effets aigus, dangers écologiques, propriétés physiques
2-méthoxyéthanol	109-86-4	6	Effets chroniques, effets aigus, facteurs de cycle de vie

Substance	No CAS	Cote globale	2 à 5 sous-catégories les plus contributives
Méthyl éthyl cétone (butanone-2)	78-93-3	6,1	Propriétés physiques, effets aigus, effets chroniques
Tétrahydrofurane	109-99-9	6,1	Propriétés physiques, effets aigus, facteurs de cycle de vie
1,3-dioxolane	646-06-0	6,1	Propriétés physiques, effets chroniques, effets aigus
Acide formique	64-18-6	6,3	Effets aigus, propriétés physiques, facteurs de cycle de vie
Méthanol	67-56-1	6,6	Propriétés physiques, effets chroniques, effets aigus
Diméthylamino-2-éthanol	108-01-0	6,6	Effets aigus, effets chroniques, propriétés physiques
N,N-Diméthylformamide	68-12-02	6,8	Dangers atmosphériques, effets chroniques, effets aigus
Cyclohexane	110-82-7	6,8	Effets aigus, dangers écologiques
Méthacrylate de méthyle	80-62-6	6,9	Très inflammable
n-hexane	110-54-3	6,9	Effets aigus, effets chroniques, dangers aquatiques
N-Méthyl-2-pyrrolidone	872-50-4	7	Propriétés physiques, effets aigus, effets chroniques et facteurs associés au cycle de vie
2 amino-éthanol	141-43-5	7,3	Effets aigus, effets chroniques, propriétés physiques
Éthylbenzène	100-41-4	7,4	Effets aigus, propriétés physiques, effets chroniques, facteurs de cycle de vie
Heptane et isomères	142-82-5	7,8	Dangers écologiques, propriétés physiques
Xylènes	1330-20-7	7,9	Facteurs de cycle de vie, propriétés physiques, effets aigus, effets chroniques, facteurs de procédé
Dichlorométhane	75-09-02	7,9	Facteurs de cycle de vie, propriétés physiques, effets chroniques, dégradation environnementale et transport
PERC	127-18-4	8,6	Effets chroniques

ANNEXE D

D.I Résultats d'exposition au DCM selon l'INRS²³⁰ pour la période 1987 à 2022

Figure 2. Statistiques descriptives des données d'exposition longue durée au DCM

Sampling objective	Personal measurements		Area measurements
Sample duration	]0, 15] min	]15, 60[min	[60, 600] min
Substance	Dichloromethane		
Period	From 1987 to 2022		
Number of results	12		
Number of results lower than the LQ	0 (0 %)		
Arithmetic mean	24.2 mg/m ³		
Arithmetic standard deviation	15.4 mg/m ³		
Geometric mean	19.2 mg/m ³		
Geometric standard deviation	2.04 mg/m ³		
Minimum	5.7 mg/m ³		
Median	20.1 mg/m ³		
95 th percentile	46.4 mg/m ³		
Maximum	49.1 mg/m ³		
Average sample duration	166 min		
Minimum sample duration	82 min		
Maximum sample duration	311 min		

²³⁰ <https://outil-expo-rch-rb.inrs.fr/Outil110/Accueil>

Figure 3. Évolution des niveaux d'exposition au DCM

