

Solvants verts **Fondements, santé, sécurité, environnement** **et substitution**

Denis Bégin
Caroline Couture
Michel Gérin
Maximilien Debia

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1089

NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

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

Mission

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

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

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

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

Pour en savoir plus

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

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

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

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2020
ISBN : 978-2-89797-111-3
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail
Mai 2020

Solvants verts

Fondements, santé, sécurité, environnement et substitution

Denis Bégin, Caroline Couture, Michel Gérin, Maximilien Debia

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

RAPPORTS
SCIENTIFIQUES

R-1089



Avis de non-responsabilité

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

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

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

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





ÉVALUATION PAR DES PAIRS

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

SOMMAIRE

L'utilisation de solvants dans de nombreuses applications (dégraissage, nettoyage, décapage, imprimerie, peintures, adhésifs, fabrication de produits pharmaceutiques) constitue une préoccupation majeure. En effet, un grand nombre d'entre eux sont associés à des effets nocifs, tant sur la santé et la sécurité des travailleurs (brûlure, cancer, dermatite, encéphalopathie, fœtotoxicité, polynévrite) que sur l'environnement et la santé de la population générale (précurseurs de smog, pollution des eaux, couche d'ozone). Par ailleurs, de plus en plus d'entreprises veulent prendre le virage vert, c.-à-d. faire en sorte que leurs activités et leurs produits s'inscrivent dans la démarche du développement durable. C'est dans ce contexte que sont apparus des solvants diversement qualifiés de verts, écologiques, biodégradables, durables. Or, il n'est pas toujours clair dans quelle mesure ces « solvants verts » sont effectivement respectueux de l'environnement ou sans danger pour ceux et celles qui sont exposés à ces produits. L'objectif de la présente étude consistait donc à produire une monographie présentant de façon synthétique et critique les connaissances sur les aspects sanitaires, sécuritaires, environnementaux, techniques, réglementaires et normatifs des solvants qualifiés comme verts.

Une recension de la littérature scientifique, technique et commerciale traitant des solvants verts a permis de les classer d'après l'origine des matières premières utilisées pour les fabriquer. Ainsi, on retrouve des solvants dérivés des glucides, comme le lactate d'éthyle et divers alcools, dont le butan-1-ol, des solvants dérivés des lipides comme les esters méthyliques d'acides gras, ou obtenus à partir de végétaux comme le d-limonène extrait de pelures d'agrumes, ou encore à partir de déchets lignocellulosiques comme le 2-méthyltétrahydrofurane. En outre, de nouvelles classes de solvants verts ont fait leur apparition, p. ex. : les solvants eutectiques profonds (liquides obtenus en mélangeant des substances solides), les liquides ioniques (sels organiques fondus), les solvants commutables (résultant du bullage de gaz carbonique dans un liquide comme l'eau), l'eau et le dioxyde de carbone supercritiques (c.-à-d. préparés à des températures et sous des pressions élevées leur conférant des propriétés de solvant organique). Par ailleurs, l'eau, dans son état liquide normal, joue un rôle comme milieu réactionnel, ainsi que dans les préparations aqueuses utilisées pour le dégraissage industriel, les revêtements, les adhésifs et les encres. Finalement, on qualifie parfois de verts un certain nombre de solvants, même s'ils sont issus de la pétrochimie, au vu de leurs bonnes performances environnementales, p. ex. : parachlorotrifluorométhylbenzène, carbonate de propylène, certains siloxanes et solvants polymériques comme certains polyéthylènes glycols.

Certaines entreprises peuvent être tentées par l'écoblanchiment ou le verdissage des solvants qu'ils produisent ou formulent. L'écoblanchiment est une opération de relations publiques menée par une organisation pour masquer ses activités polluantes et tenter de présenter un caractère écoresponsable. Par ailleurs de nombreux fabricants désirant verdir leurs produits se sont tournés vers la certification environnementale sous la forme d'étiquettes (ou labels) écologiques. Ces dernières visent à assurer une impartialité dans l'évaluation des produits et une garantie de respect de critères minimaux, tout en augmentant la transparence pour les consommateurs. Ainsi, on retrouve, en Amérique du Nord, des certifications diverses comme *Green Seal*, *Greenguard*, ECOLOGO. Ce sont généralement des formulations qui sont visées comme des peintures, des vernis, des produits nettoyants, des adhésifs, des revêtements de plancher ou des décapants. Ces étiquettes font une large part au contrôle de la teneur en composés organiques volatils (COV). L'étiquette *Safer Choice*, quant à elle, repose sur une liste

de solvants considérés comme plus ou moins verts selon divers critères et classés selon un code de couleur. De son côté, 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'agriculture. Divers labels ont été développés en Europe (EU Ecolabel, *Nordic Ecolabelling*), incluant également une norme sur les solvants biosourcés.

De nombreux règlements portant sur les substances chimiques en milieu de travail ou dans l'environnement favorisent la substitution des solvants classiques et l'utilisation de solvants verts. La Loi canadienne sur la protection de l'environnement et, au Québec, le Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère limitent notamment l'émission de COV dans divers secteurs. Au Québec, la substitution des matières dangereuses émises dans l'environnement de travail est encouragée par le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST). L'Ontario, quant à elle, bénéficie d'une Loi sur la réduction des toxiques. Mentionnons, aux États-Unis, le Clean Air Act visant notamment les COV et la Loi du Massachusetts sur la réduction des toxiques. En Europe le règlement REACH impose le principe de substitution pour une gamme de substances toxiques et encourage leur remplacement par des produits propres et durables.

On retrouve une diversité d'outils et de sources d'information pour aider au remplacement des solvants traditionnels et pouvant aider à l'évaluation et à la sélection de solvants verts, notamment le fichier de tableur P2OASys du *Toxics Use Reduction Institute* du Massachusetts, portant sur l'ensemble des substances toxiques, et le logiciel PARIS III de l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis dédié aux solvants industriels. On retrouve également des guides, de la documentation et des outils de sélection spécifiques à diverses applications comme dans l'industrie pharmaceutique, les laboratoires de chimie, les peintures, les nettoyeurs et les dégraissants.

Malgré la multiplication des étiquettes écologiques et des certifications, une confusion demeure pour définir ce qui est réellement un solvant vert. Une application stricte des critères de la chimie verte signifie d'utiliser un solvant qui serait notamment peu toxique pour les travailleurs et l'environnement, issu de ressources renouvelables et ininflammables. Comme plusieurs solvants qualifiés de verts, utilisés en remplacement des solvants traditionnels, ne sont pas sans danger pour les travailleurs, il est justifié de recommander qu'une analyse des effets potentiels sur la santé et sur la sécurité des travailleurs soit effectuée dans tous projets de substitution, pour s'assurer de ne pas faire de transfert de risque d'une catégorie d'impacts à une autre. Pour ce faire, la méthode de substitution en 9 étapes, à la base de l'utilitaire Solub, demeure la solution à appliquer, que l'on soit face à un solvant prétendument vert ou non.

Il serait imprudent pour les auteurs de ce rapport de faire des recommandations précises de solvants verts applicables à toutes les situations. Toutefois, certaines catégories de solvants doivent être favorisées comme l'eau, les solvants biosourcés tels que les EMAG, ainsi que ceux qui répondent à un maximum de critères de la chimie verte. Finalement, 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 qui, tout en étant contraignante pour les entreprises, leur offre des ressources pour les aider concrètement à réaliser leurs projets de substitution de substances toxiques.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	iii
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS	ix
1. INTRODUCTION	1
2. OBJECTIFS DE RECHERCHE	3
3. MÉTHODOLOGIE	5
4. RÉSULTATS	7
4.1 Définition de solvant vert.....	7
4.1.1 Concept de la chimie verte	7
4.1.2 Analyse du cycle de vie (ACV).....	9
4.1.3 Chimie verte et ACV appliquées aux solvants	11
4.1.4 Écoblanchiment.....	14
4.2 Catégories de solvants verts.....	17
4.2.1 Eau.....	17
4.2.2 Solvants dérivés des glucides	18
4.2.3 Solvants dérivés des lipides	19
4.2.4 Solvants issus de la lignine.....	20
4.2.5 Solvants eutectiques profonds.....	20
4.2.6 Solvants obtenus par extraction.....	21
4.2.7 Liquides ioniques.....	21
4.2.8 Dioxyde de carbone (CO ₂).....	22
4.2.9 Solvants issus de matières résiduelles	23
4.2.10 Solvants d'origine pétrochimique possédant certaines caractéristiques vertes	24
4.3 Certifications.....	28
4.3.1 Certifications nord-américaines	29
4.3.2 Certifications européennes	32
4.4 Réglementation.....	35
4.4.1 Canada.....	35
4.4.2 Québec.....	36
4.4.3 Ontario	37
4.4.4 États-Unis.....	37
4.4.5 Europe.....	38
4.5 Substitution, méthodologies et outils pour le choix d'un solvant vert	39

4.5.1	Outils s'appliquant à toutes les substances	39
4.5.2	Outils spécialisés pour les solvants	40
4.5.3	Outils spécifiques à certaines branches économiques.....	43
5.	DISCUSSION	47
5.1	Définition de solvant vert.....	47
5.2	Catégories de solvants verts.....	48
5.3	Certifications.....	49
5.4	Réglementations.....	50
5.5	Substitution, méthodologies et outils pour le choix d'un solvant vert	52
5.6	Axes potentiels de recherche et de développement.....	53
6.	CONCLUSION.....	55
	BIBLIOGRAPHIE	57
	ANNEXE A : SOLVANTS VERTS – NOMENCLATURE	77
	ANNEXE B : LISTE DES SUBSTANCES ET LEUR N^o CAS CORRESPONDANT	79

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Les douze principes de la chimie verte	8
Tableau 2.	Catégories d'impacts et critères souvent utilisés en ACV	11
Tableau 3.	Les douze critères qu'un solvant vert doit satisfaire d'après Gu et Jérôme (2013)	13
Tableau 4.	Catégories, exemples de produits et d'applications des solvants verts	27
Tableau 5.	Classes de solvants biosourcés (CEN, 2017)	34
Tableau 6.	Règlements concernant certains solvants et les COV en vertu de la LCPE	36

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

% (m/m) :	pourcentage (masse/masse)
ACGIH :	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
ACNOR :	Association canadienne de normalisation
ACV :	Analyse du cycle de vie
AICV :	Analyse de l'inventaire du cycle de vie
AIHA :	American Industrial Hygiene Association
ANSES :	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
ASI :	Adhesives & Sealants Industry
ASTM :	American Standard for Testing and Materials
CAAQS :	California Ambient Air Quality Standards
CARB :	California Air Resources Board
CAS :	Chemical Abstracts Service
CEN :	Comité européen de normalisation
CFC :	Chlorofluorocarbone
CFR :	Code of Federal Regulations
CHEM21 :	Chemical Manufacturing Methods for the 21 st Century Pharmaceutical Industries
CIR :	Cosmetic Ingredient Review
CIRAIG :	Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services
CIRC :	Centre international de recherche sur le cancer
CL ₅₀ :	Concentration létale médiane
CLP :	Classification, Labelling, Packaging (classification, étiquetage, emballage)
CMR :	Cancérogènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction
CNESST :	Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
COV :	Composé organique volatil
CRIBIQ :	Consortium de recherche et innovations en bioprocédés industriels au Québec

D4 :	Octaméthylcyclotétrasiloxane
D5 :	Décaméthylcyclopentasiloxane
Da :	Dalton
DBE :	Dibasic Esters (esters d'acides dicarboxyliques)
DCM :	Dichlorométhane (chlorure de méthylène)
DES :	Deep eutectic solvent
DfE :	Design for the Environment
DL ₅₀ :	Dose létale médiane
DMF :	N,N-Diméthylformamide
DTSC :	California Department of Toxic Substances Control
ÉICV :	Évaluation des impacts du cycle de vie
EMAG :	Ester méthylique d'acide gras
EMIM :	Acétate de 1-éthyl-3-méthylimidazolium
ESC :	Eau supercritique
EU-OSHA :	European Agency for Safety and Health at Work (Agence européenne pour la sécurité et la santé au travail)
FDS :	Fiche de données de sécurité
g O ₃ /g COV :	gramme d'ozone par gramme de COV
GS :	Green Seal
GSK :	GlaxoSmithKline
HAP :	Hazardous Air Pollutant
HFC :	Hydrofluorocarbone
HCFC :	Hydrochlorofluorocarbone
HSPiP :	Hansen Solubility Parameters in Practice
INRP :	Inventaire national des rejets de polluants
IRSST :	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
ISO :	International Organization for Standardization (Organisation internationale de normalisation)
ISST :	Information en santé et en sécurité du travail

IUPAC :	International Union of Pure and Applied Chemistry (Union internationale de chimie pure et appliquée)
LCPE :	Loi canadienne sur la protection de l'environnement
LEED :	Leadership in Energy and Environmental Design
MEK :	Methyl Ethyl Ketone (méthyléthylcétone)
MIT :	Massachusetts Institute of Technology
NADES :	Natural deep eutectic solvent
NCP :	Normes canadiennes de la publicité
NMP :	N-méthyl-2-pyrrolidone
NOEL :	No-observed-effect level
OCDE :	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
OECD :	Organisation for Economic Co-operation and Development
ONU :	Organisation des Nations unies
P2OASys :	Pollution Prevention Option Analysis System
Pa :	Pascal
PACO :	Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique
PBT :	Persistantes, bioaccumalables ou toxiques
PCBTF :	Parachlorobenzotrifluoride (parachlorotrifluorométhylbenzène)
PEG :	Poly(éthylène glycol)
PERC :	Perchloréthylène (tétrachloréthylène)
PET :	Polyéthylène téréphtalate
PFO :	Potentiel de formation d'ozone urbain ou troposphérique
PM ₁₀ :	Matière particulaire de moins de 10 microns
REACH :	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
Reptox :	Répertoire toxicologique
RSST :	Règlement sur la santé et la sécurité du travail
SCAQMD :	South Coast Air Quality Management District
SGH :	Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques

SIMDUT :	Système d'information sur les matières dangereuses utilisées au travail
SST :	Santé et sécurité du travail
STEL :	Short-term Exposure Limit
TCA :	1,1,1-Trichloroethane (1,1,1-trichloréthane)
TCE :	Trichloroethylene (trichloréthylène)
THF :	Tétrahydrofurane
THFA :	Tetrahydrofurfuryl Alcohol (alcool tétrahydrofurfurylique)
TLV :	Threshold Limit Value
TURA :	Toxics Use Reduction Act
TURI :	Toxics Use Reduction Institute
TWA :	Time-Weighted Average
UE :	Union européenne
UL :	Underwriters Laboratories
U.S. EPA:	United States Environmental Protection Agency (Agence de protection de l'environnement des États-Unis)
VHR :	Vapour Hazard Ratio
VLE :	Valeur limite d'exposition professionnelle
vPvB :	very Persistent, very Bioaccumulative (substance très persistante et très bioaccumulable)
WEEL :	Workplace Environmental Exposure Level

1. INTRODUCTION

Les solvants sont des substances chimiques qui servent à extraire, dissoudre ou suspendre d'autres substances et sont parmi les classes de substances les plus répandues dans la société (Anastas, 2002). À l'échelle mondiale, Clark, Farmer, Hunt et Sherwook (2015) rapportent une production annuelle de vingt millions de tonnes de solvants. On retrouve les solvants notamment dans certaines préparations telles que les colles, dégraissants, encres et peintures où leur présence n'est que transitoire puisque leur évaporation est voulue après leur mise en œuvre. Des applications prioritaires d'un point de vue de santé et de sécurité ont été identifiées pour le Québec, notamment : adhésif (p. ex. : colle contact dans la pose de revêtements souples), décapant (p. ex. : décapage de peinture sur des meubles en bois), dégraissant (p. ex. : fontaine de dégraissage dans les ateliers d'entretien mécanique), nettoyant (p. ex. : nettoyage des blanchets en imprimerie offset), peinture (p. ex. : pulvérisation sur les carrosseries) (Gérin, Bégin, Goupil, Gameau et Sacks, 1995; Gérin, Bégin, Goupil, Gameau et Sacks, 1996). Environ 300 000 travailleurs québécois sont exposés régulièrement aux solvants organiques (Vézina *et al.*, 2011)¹.

L'inflammabilité et l'explosivité des solvants, leur toxicité pour les travailleurs ou leurs effets sur l'environnement forcent depuis plusieurs années les gouvernements à réglementer leur utilisation et les entreprises à travailler à leur remplacement. Par exemple, l'usage du benzène et du trichloréthylène (TCE), deux cancérogènes avérés pour l'humain, a été limité alors que plusieurs réglementations contrôlent actuellement l'usage des chlorofluorocarbones (CFC) et des composés organiques volatils (COV), qui ont respectivement une part de responsabilité dans la dégradation de la couche d'ozone et dans la présence de smog photochimique (Clark et Tavener, 2007). Cependant, l'explosion causée par des solvants inflammables en 2016 à Montréal, entraînant le décès d'un vernisseur de plancher et de graves brûlures à deux autres travailleurs, démontre toujours l'actualité de la problématique des solvants (Labelle et Cyrenne, 2016). Mentionnons également les preuves démontrant la cancérogénicité de certains solvants chlorés (IARC, 2014) ainsi que les divers types de toxicité des solvants aromatiques qui sont encore largement utilisés (Bruckner, Anand et Warren, 2019).

Depuis les années 1970, la préoccupation des entreprises de « verdir » leur image est apparue. Il est depuis d'usage courant d'employer l'adjectif vert pour qualifier un produit de consommation qui respecte l'environnement. Différents auteurs utilisent aussi le concept de durabilité afin de tenir compte non seulement de la nature du produit, mais également du procédé qui permet de le produire et des trois dimensions que sont l'environnement, la société et l'économie (Anastas et Zimmerman, 2003). De nombreuses épithètes vertes sont apparues au fil des ans pour qualifier les nouveaux solvants disponibles. Ils sont ainsi qualifiés comme biodégradables, biologiques, biosourcés, écologiques, naturels, renouvelables ou durables. Or, il n'est pas toujours clair dans quelle mesure ces « solvants verts » sont effectivement respectueux de l'environnement. En outre, ce qui est bénéfique pour l'environnement n'est pas nécessairement sans danger pour ceux et celles qui sont exposés à ces produits. Une chose est certaine; les solvants verts sont de plus en plus présents dans les milieux de travail. Une étude de marché rapporte en effet un taux de croissance annuel composé de 4,3 % en poids de solvants verts/biosourcés dans la période 2015-2020, le secteur des peintures et revêtements

¹ On parle de solvant organique lorsque la molécule de solvant contient au moins un atome de carbone. L'eau, parfois qualifiée de solvant universel, n'est donc pas un solvant organique.

accaparant 44 % du marché (Anonymous, 2016). Une autre étude parle plutôt d'un taux de croissance annuel composé de plus de 8 % pour les solvants verts pour la période 2016-2020 (Technavio, 2016).

Diverses recherches ont permis de mettre au point des procédures pour la sélection d'un solvant de substitution (Bégin et Gérin, 2001; Gérin et Bégin, 2002). L'étape de comparaison des options de remplacement doit être effectuée en fonction de plusieurs considérations en lien avec les facteurs de santé et de sécurité du travail, d'environnement, de coûts, de méthodes de travail et de formation des employés (Gérin et Bégin, 2002; Shapiro, Little et White, 1994). La comparaison est donc une étape complexe de la démarche et le fait de ne pas prendre en compte l'une ou l'autre des dimensions pourrait mener à de mauvaises substitutions. Plusieurs cas sont d'ailleurs rapportés dans la littérature. Un article du New York Times, datant du 31 mars 2013, relate les effets neurologiques catastrophiques observés chez des travailleuses exposées au 1-bromopropane dans l'industrie du meuble en Caroline-du-Nord (Ichihara, Miller, Ziolkowska, Itohara et Takeuchi, 2002; Urbina, 2013). Dans ces usines, le 1-bromopropane est le solvant de base de colles servant à assembler les blocs de mousse de polyuréthane. Depuis plusieurs années, il avait remplacé le dichlorométhane (DCM), très réglementé à cause de sa toxicité². Un autre exemple de mauvaise substitution concerne l'industrie du dégraissage des pièces métalliques. Avant les années 1990, le 1,1,1-trichloréthane (TCA) était largement utilisé pour effectuer cette tâche. Solvant relativement peu toxique, le TCA a été interdit au Canada en 1996 en raison de son effet destructeur sur la couche d'ozone stratosphérique. De nombreuses entreprises l'ont alors remplacé par le TCE, beaucoup plus toxique. En 2012, le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) classait le TCE comme substance cancérigène pour l'humain (groupe 1) (IARC, 2014). Deux solutions inadéquates ont donc été choisies dans les deux exemples présentés. Dans un premier temps le DCM a été remplacé par un solvant présentant lui aussi de graves préoccupations de santé au travail et dans le deuxième cas, le TCE a remplacé le TCA, solution facile qui ne nécessitait pas le remplacement de l'appareil de dégraissage, mais sans se soucier de la santé des utilisateurs. Une substitution motivée par des considérations environnementales peut ainsi avoir des conséquences pour la santé des travailleurs lorsque l'analyse des dangers n'est pas effectuée convenablement.

Un certain nombre de monographies ont été publiées récemment sur ou en lien avec le sujet des solvants verts (Augé et Scherrmann, 2016; Clark, Hunt, Topi, Paggiola et Sherwood, 2017; Jérôme et Luque, 2017; Mohammad et Inamuddin, 2012a; Nelson, 2003; Pena-Pereira et Tobiszewski, 2017; Wypych et Wypych, 2014). Toutefois, ces documents ne détaillent pas précisément les connaissances sur les aspects de santé et de sécurité des travailleurs qui utiliseraient ces nouveaux solvants.

Le présent rapport s'appuie sur une revue exhaustive de la littérature. Après avoir cerné comment la chimie verte s'applique aux solvants, les principaux solvants verts sont présentés, classés par catégorie. Sont abordées ensuite les diverses certifications et étiquettes écologiques pertinentes en Amérique du Nord et en Europe, ainsi que le contexte réglementaire dans ces deux régions du monde. Les outils et méthodologies de substitution pouvant aider à l'évaluation et au choix d'un solvant vert sont finalement abordés.

² <http://www.irsst.qc.ca/solub/1-bromopropane-et-les-coussins-de-meubles.html>

2. OBJECTIFS DE RECHERCHE

L'objectif de cette étude consistait à produire une monographie présentant de façon synthétique et critique les connaissances sur les aspects sanitaires, sécuritaires, environnementaux, techniques, réglementaires et normatifs des solvants qualifiés comme verts. Plus précisément, la production d'une telle monographie vise à réduire la confusion dans les milieux de travail concernant les solvants verts en outillant les intervenants en santé et en sécurité du travail (SST) qui pourront ainsi mieux discerner les enjeux de SST en lien avec ces substances.

3. MÉTHODOLOGIE

Une recherche documentaire exhaustive a été réalisée dans des bases de données bibliographiques afin d'identifier les articles scientifiques et techniques ainsi que les rapports de recherche concernant les solvants verts. Les bases de données consultées sont Biological Abstracts, Current Contents Connect, Embase, Engineering Village, ISST, PubMed, Références SST, SciFinder, Toxline. La recherche de la littérature grise, de la réglementation, des normes de certification (étiquettes écologiques), des fabricants de solvants verts et de leur littérature technique dans le réseau Internet a été réalisée à l'aide du moteur de recherche généraliste Google incluant Google Scholar. L'information recueillie dans les différentes références a été soumise à une analyse critique : crédibilité, complétude et applicabilité de l'information repérée.

Les mots-clés anglais et français utilisés et spécifiques aux solvants verts sont présentés à l'annexe A. Certains termes (agrosolvant, solvant biologique, biosourcé, biotechnologique, écologique, naturel, sécuritaire) sont décrits tout au long de cette monographie. Une partie de ces mots-clés a été couplée à des mots tels que *hazard*, *toxicity*, *industrial hygiene*, et *danger* pour réaliser la recherche bibliographique.

L'annexe B liste les substances mentionnées dans cette monographie avec leur numéro d'enregistrement du *Chemical Abstracts Service* (CAS) de l'*American Chemical Society* (Columbus, OH)³.

³ Ces numéros permettent d'obtenir facilement de l'information supplémentaire sur ces substances en consultant des bases de données en ligne telles que le Répertoire toxicologique (<https://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/>) et ChemIDplus (<https://chem.nlm.nih.gov/chemidplus/>).

4. RÉSULTATS

4.1 Définition de solvant vert

4.1.1 *Concept de la chimie verte*

En 1987, le rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement (rapport Brundtland) a fait largement connaître le concept de développement durable, c.-à-d. un « développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs » (Commission mondiale sur l'environnement et le développement, 1988). En 1992, la Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement (Conférence de Rio) a débouché sur un plan de développement durable pour le 21^e siècle, appelé Action 21, incluant des recommandations visant l'accroissement de la disponibilité des matières premières renouvelables⁴ et le renforcement de la recherche relative au remplacement des produits chimiques toxiques (ONU, 1992)⁵. En 1998, Anastas et Warner énonçaient formellement les douze principes de la chimie verte. Le Tableau 1 présente une traduction libre de ces douze principes. Les cinquième et septième principes enjoignent les chimistes, dans la mesure du possible, à éliminer les solvants ou à les remplacer par des produits inoffensifs pour l'humain et l'environnement et à utiliser des matières premières renouvelables. Anastas (2002) a explicité les principes de la chimie verte pour les solvants en soulignant qu'en plus des caractéristiques techniques recherchées (p. ex. : solubilité, viscosité, volatilité) pour identifier un solvant substitutif, il fallait inclure des critères de réduction du danger en termes de toxicité, d'inflammabilité, d'explosivité, de déplétion de la couche d'ozone stratosphérique, de potentiel de formation d'ozone troposphérique et de réchauffement global.

Anastas et Zimmerman (2003) ont énoncé les douze principes de l'ingénierie verte. Le troisième principe demande à l'ingénieur de concevoir des procédés de séparation et de purification de produits chimiques ne faisant pas appel aux grandes quantités de solvants traditionnellement utilisés, alors que le septième principe vise la durabilité plutôt que l'indestructibilité. Ce dernier principe, concernant le design de produits, se traduit par une durée de vie cible durant laquelle des réparations sont possibles avec un minimum d'intrants (matériaux, énergie) et au terme de laquelle les déchets persistants et bioaccumulables associés seront limités, ce qui limite par le fait même les effets sur la santé et l'environnement. Les premier et douzième principes correspondent quant à eux pratiquement aux deux principes de la chimie verte tout juste énoncés. De plus, les auteurs mentionnent que tous ces principes sont interdépendants et qu'ils découlent de deux concepts fondamentaux, le cycle de vie et l'inhérence. Le concept de cycle de vie peut être résumé par l'expression « du berceau au tombeau » ou encore « du berceau au berceau », faisant référence aux impacts associés à la vie entière d'un produit, en débutant par l'extraction des matières premières utilisées dans sa fabrication jusqu'à son élimination ou sa réutilisation. Ce concept est traité plus en profondeur dans la section 4.1.2. Dans l'esprit d'Anastas et Zimmerman (2003), le concept d'inhérence fait appel au caractère intrinsèquement sécuritaire des matériaux, de l'énergie utilisée ou générée et des procédés mis en œuvre.

⁴ Une matière première renouvelable est une ressource naturelle qui peut être reconstituée à un taux comparable à celui de sa consommation.

⁵ <http://www.un.org/french/events/wssd/pages/cnued.html>

Tableau 1. Les douze principes de la chimie verte⁶

N°	Principes
1	Il vaut mieux éviter de générer des déchets que d'avoir à les traiter ou à les nettoyer après leur production.
2	Les méthodes de synthèse devraient être conçues pour maximiser l'incorporation dans le produit final de toutes les matières utilisées dans le processus.
3	Dans la mesure du possible, les méthodes de synthèse devraient être conçues pour utiliser et générer des substances qui présentent peu ou pas de toxicité pour la santé humaine et l'environnement.
4	Les produits chimiques doivent être conçus pour accomplir efficacement leur fonction tout en minimisant leur toxicité.
5	L'utilisation de substances accessoires (p. ex. : solvants, agents de séparation) devrait être rendue inutile dans la mesure du possible. Lorsqu'elles sont employées, ces substances devraient être de nature inoffensive.
6	Les besoins énergétiques des procédés chimiques doivent être reconnus pour leurs impacts environnementaux et économiques et doivent être minimisés. Les synthèses devraient être réalisées à température et pression ambiantes.
7	Lorsque cela est techniquement et économiquement réalisable, il vaut mieux utiliser des matières premières renouvelables plutôt que non renouvelables.
8	Les dérivatisations inutiles (groupe protecteur, ajout de protection et son retrait, modification temporaire des processus physicochimiques) doivent être évitées dans la mesure du possible.
9	Les catalyseurs (aussi sélectifs que possible) sont supérieurs aux réactifs stœchiométriques.
10	Les produits chimiques doivent être conçus de telle sorte que, à la fin de leur vie utile, ils ne persistent pas dans l'environnement et se décomposent en produits de dégradation inoffensifs.
11	Des méthodologies analytiques doivent être mises au point pour permettre une surveillance et un contrôle en temps réel avant la formation de substances dangereuses.
12	Les substances et leur forme utilisée dans un processus chimique devraient être choisies pour minimiser le potentiel d'accidents chimiques, y compris les rejets, les explosions et les incendies.

⁶ Traduction libre du texte original d'Anastas et Warner (1998).

4.1.2 Analyse du cycle de vie (ACV)

De plus en plus d'organisations ont pris position concernant le développement durable ces dernières années; en 2006, la Loi québécoise sur le développement durable a été adoptée, alors qu'en 2015, l'Organisation des Nations unies (ONU) a adopté le Programme de développement durable et ses 17 objectifs⁷. Un de ceux-ci vise à établir des modes de consommation et de production durables⁸ qui « encouragent à utiliser les ressources et l'énergie de manière efficace, à mettre en place des infrastructures durables et à assurer à tous l'accès aux services de base, des emplois verts et décents et une meilleure qualité de la vie ». L'Union européenne (UE) a également adopté une politique environnementale qui introduit des mesures en faveur d'une consommation et d'une production durables⁹. « Celles-ci doivent permettre d'améliorer la performance environnementale globale des produits tout au long de leur cycle de vie, de stimuler la demande de meilleurs produits et technologies de production et aider les consommateurs à choisir en connaissance de cause ».

Tous les secteurs industriels utilisant des solvants classiques sont donc concernés par ces changements de paradigme visant leur remplacement par des solvants verts. À titre d'exemples, des solvants issus de sources végétales ont pénétré le secteur du dégraissage métallique, le d-limonène étant le plus connu (Bégin, Lavoué et Gérin, 2002). Il ne faut pas oublier les solvants issus de la pétrochimie et qualifiés comme verts tels que le parachlorotrifluorométhylbenzène (PCBTF)¹⁰, employé notamment en remplacement des hydrocarbures aromatiques dans les peintures industrielles afin de réduire les émissions atmosphériques génératrices d'ozone troposphérique (Wolf et Morris, 2006). En théorie, un solvant vert doit respecter l'environnement et l'humain. Or, il existe des exemples de solvants présentés comme respectant l'environnement et qui se sont par la suite avérés toxiques pour les travailleurs. C'est le cas entre autres de certains hydrochlorofluorocarbones (HCFC) qui ont remplacé les CFC afin de limiter les impacts sur la couche d'ozone; des cas d'intoxications de travailleurs au 1,1-dichloro-1-fluoroéthane ont été documentés (Testud, Martin, Descotes et Conso, 2000).

Il devient donc essentiel pour les intervenants d'avoir à leur disposition divers outils pouvant être utilisés afin de se prononcer sur la vertitude¹¹ des solvants. Parmi les outils présentés à la section 4.5.2, certains permettent de comparer de façon semi-quantitative différents solvants entre eux à partir d'impacts associés à certaines étapes de leur cycle de vie. Toutefois, ces outils ne permettent pas d'apprécier le transfert de risque qui pourrait s'opérer d'une catégorie d'impacts à une autre, contrairement à une analyse complète de cycle de vie qui doit tenir compte de plusieurs critères, dite analyse du cycle de vie (ACV) multicritère (Clark *et al.*, 2017; Loubet, Tsang, Gemechu, Foulet et Sonnemann, 2017).

⁷ <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/development-agenda/>

⁸ <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/sustainable-consumption-production/>

⁹ <http://www.europarl.europa.eu/factsheets/fr/sheet/77/consommation-et-production-durables>

¹⁰ Le rapport récent du *National Toxicology Program* sur le PCBTF le considère maintenant comme un cancérigène animal confirmé (*National Toxicology Program*, 2018).

¹¹ Néologisme utilisé par Augé et Scherrmann (2016) pour traduire le terme anglais *greenness* faisant référence au degré de durabilité d'une substance, d'un procédé ou pour qualifier son degré de respect de l'environnement incluant le degré d'innocuité et de sécurité pour l'humain.

L'ACV se définit classiquement en 4 étapes en référence à la norme ISO 14040:2006 (ISO, 2006b; Loubet *et al.*, 2017) :

- La définition des objectifs et du domaine d'application est une étape importante permettant de définir la raison de l'étude et sa profondeur;
- L'analyse de l'inventaire du cycle de vie (AICV) consiste à quantifier les échanges entre le système de produits et l'environnement;
- L'évaluation des impacts du cycle de vie (ÉICV) présente pour sa part des éléments dits obligatoires (sélection, classification, caractérisation, résultats) et d'autres facultatifs (regroupement, pondération). En conséquence, il existe de nombreuses méthodes ÉICV publiées (Rosenbaum *et al.*, 2018);
- L'interprétation consiste à identifier les points significatifs à partir des phases AICV et ÉICV, à vérifier la complétude, la sensibilité et la cohérence des analyses et à dresser les conclusions et recommandations de l'ACV.

Le Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG) a développé plusieurs outils d'ACV¹². Le Tableau 2 présente les catégories d'impacts associés aux dommages et aux problèmes ainsi que les critères normalement utilisés en ACV sans considérer tous les liens existants entre ces éléments. Certains éléments peuvent ainsi être liés à différentes catégories, comme l'utilisation de l'eau p. ex. : qui est normalement associée à la catégorie des ressources naturelles, mais qui peut avoir un impact indirect sur la qualité des écosystèmes ou sur la santé humaine. Les conclusions quant à ces critères peuvent toutefois se répartir différemment à travers les étapes associées à l'élaboration d'un produit, de la provenance des matières premières associées à sa synthèse jusqu'à son élimination, en passant par son transport et son utilisation. Les critères assurent ainsi une évaluation globale du système et évitent de simplement procéder à un transfert de risque, p. ex. : de la santé vers l'environnement, ou d'une étape du cycle de vie à une autre (Zhang, Y., Bakshi et Sahle Demessie, 2008).

¹² <http://www.ciraig.org>

Tableau 2. Catégories d'impacts et critères souvent utilisés en ACV

(Augé et Scherrmann, 2016; CIRAIG, 2017; Loubet *et al.*, 2017; Rosenbaum *et al.*, 2018; Zhang, Y. *et al.*, 2008)

Impacts associés aux dommages (« endpoint »)	Impacts associés aux problèmes (« midpoint »)	Critères
Santé humaine	Toxicité humaine	Toxicité aiguë Irritation et sensibilisation de la peau Absorption cutanée Toxicité chronique (effets cancérogènes, mutagènes, reprotoxiques)
	Risques à la sécurité du processus	Inflammabilité, explosivité
	Formation de matière particulaire (PM ₁₀)	-
	Radiations ionisantes	-
Qualité des écosystèmes	Changements climatiques	Potentiel de réchauffement de la planète
	Oxydation photochimique (émission de COV)	Polluant atmosphérique et potentiel photoréactif (potentiel de formation d'ozone urbain ou troposphérique ou PFO)
	Acidification (terrestre, eau douce et marine)	Réaction/décomposition Persistance
	Eutrophisation (eau douce et marine)	Polluant de l'eau (contamination des nappes souterraines) Éventuelles restrictions réglementaires
	Écotoxicité (terrestre, eau douce et marine)	
Ressources naturelles	Appauvrissement de la couche d'ozone	Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique (PACO)
	Utilisation des ressources biotiques et abiotiques (minéral, fossiles)	Fraction potentiellement disparue (m ² /année ou m ³ /année)
	Utilisation des terres	
	Utilisation de l'eau	

4.1.3 Chimie verte et ACV appliquées aux solvants

On peut se demander quels sont les critères qu'un solvant donné doit respecter pour être qualifié comme vert. Par exemple, un solvant pratiquement atoxique chez l'humain, mais inflammable, respectant la couche d'ozone stratosphérique et ne contribuant pas à la formation d'ozone troposphérique, mais phytotoxique peut-il être considéré comme vert? Il semble que les solvants peuvent être verts à divers degrés. La littérature anglophone utilise le terme *greenness* (vertitude). Dans la littérature scientifique, technique et commerciale, on retrouve aussi de nombreuses appellations s'apparentant de près ou de loin aux solvants verts (annexe A).

Gu et Jérôme (2013) ont proposé douze critères pour qu'un solvant soit considéré comme vert (Tableau 3). Clark *et al.* (2017) se basent sur le concept de cycle de vie et sur les travaux de Jessop (2011) et de Gu et Jérôme (2013) pour évaluer la durabilité des solvants en fonction de 6 catégories ou étapes du cycle de vie, soit leur production, leur disponibilité, leur utilisation en termes de performance technique et de stabilité, leur toxicité, leur sécurité ainsi que leur fin de vie. Capello, Fischer et Hungerbühler (2007) utilisent aussi des critères de fin de vie et l'évaluation pour un même solvant peut différer selon que le solvant soit incinéré ou distillé. Les analyses des différentes options de fin de vie (émissions ou recyclage) d'un solvant sont particulières à ce solvant et, dans la littérature, ne sont pas nécessairement toujours utilisées dans le cadre d'une ACV complète, mais plutôt dans un type d'analyse très spécifique (Clark *et al.*, 2017).

Schupp, Georg et Kirstein (2017) présentent un exemple d'analyse de substitution de vernis considérant l'ACV. Les auteurs comparent une ancienne formulation de solvant incluant une coupe pétrolière (naphta) et la nouvelle dans laquelle le naphta est remplacé par différents solvants de substitution (acétate de butyle, acétate de 1-éthoxypropan-2-yl et 3-éthoxypropanoate d'éthyle). Les auteurs concluent que l'ACV qui inclut les impacts des processus de production permet de démontrer clairement l'avantage de la nouvelle formulation par rapport à l'ancienne. Les auteurs notent toutefois que lorsque seuls les effets sur la santé sont considérés, les deux formulations ne présentent pas de différences notables.

Zhang, Y. *et al.* (2008) présentent aussi une ACV pour évaluer les bénéfices d'utiliser un liquide ionique (voir section 4.2.7), généralement présenté comme vert, par rapport aux méthodes classiques de synthèse chimique impliquant différents solvants organiques. Les auteurs indiquent que le liquide ionique présente, dans leur étude de cas, de plus grands impacts par kilogramme et qu'il ne serait alors intéressant que pour synthétiser des produits à forte valeur ajoutée comme p. ex. : dans l'industrie pharmaceutique.

Il existe plusieurs systèmes de classement des solvants verts développés surtout dans l'industrie chimique et en particulier dans l'industrie pharmaceutique (voir section 4.5.3.1). Quatre grands défis ont été identifiés par Jessop (2011) concernant les solvants verts. Le premier défi concerne le besoin de développer une diversité de solvants verts qui puissent répondre à tous les besoins actuels de l'industrie. Le deuxième concerne les besoins d'identifier des méthodes pour évaluer les effets environnementaux des solvants lors de leur synthèse, de leur utilisation et de leur élimination. Les deux derniers défis sont en lien avec leur séparation et leur extraction; il serait nécessaire de trouver un moyen d'extraire les solvants polaires aprotiques actuels et de limiter les extractions des autres solvants par la distillation qui est énergivore et qui nécessite l'utilisation de solvants volatils. Il convient de souligner que certains de ces défis se posent principalement dans le contexte de l'industrie chimique et qu'ils ne sont ainsi pas tous transposables au marché général des solvants, c.-à-d. dans une optique de réduire les impacts sur la santé et l'environnement globalement.

Pour Kob (2002), les solvants fabriqués à partir de sous-produits de synthèse dans les usines chimiques sont considérés comme une classe de solvants verts, au même titre que les solvants dérivés de ressources non pétrolières. Parmi ceux-ci, on trouve les esters d'acides dicarboxyliques (DBE; adipate, glutarate et succinate diméthyliques) qui sont fabriqués à partir d'un sous-produit de la fabrication du nylon 6-6 (Bégin et Gérin, 1999b). La section 4.2 décrit plus en détail les différentes catégories de solvants verts.

Tableau 3. Les douze critères qu'un solvant vert doit satisfaire d'après Gu et Jérôme (2013)

N°	Critère
1	<u>Disponibilité</u> : un solvant vert doit être disponible à grande échelle et la capacité de production ne devrait pas fluctuer de façon importante afin d'assurer une disponibilité constante du solvant sur le marché.
2	<u>Prix</u> : le prix d'un solvant vert doit être non seulement compétitif, mais il ne devrait pas fluctuer grandement au cours du temps afin d'assurer la durabilité du processus chimique.
3	<u>Recyclabilité</u> : dans tous les processus chimiques, un solvant vert doit être entièrement recyclé, en utilisant bien sûr des procédures écoefficaces.
4	<u>Pureté</u> : les solvants de qualité technique sont préférés pour éviter les processus de purification énergivores nécessaires pour obtenir des solvants très purs.
5	<u>Synthèse</u> : les solvants verts doivent être préparés à l'aide de procédés écoénergétiques et les réactions de synthèse devraient respecter le principe d'économie d'atomes.
6	<u>Toxicité</u> : la toxicité des solvants verts doit être négligeable afin de réduire tous les risques lorsqu'ils sont manipulés par des humains ou libérés dans la nature (p. ex. : pour les soins personnels, l'entretien ménager, la peinture).
7	<u>Biodégradabilité</u> : les solvants verts devraient être biodégradables et ne devraient pas former de produits de dégradation toxiques.
8	<u>Performance</u> : un solvant vert devrait avoir des performances similaires et même supérieures (viscosité, polarité, densité, etc.) à celles des solvants actuellement employés.
9	<u>Stabilité</u> : pour une utilisation dans un processus chimique, un solvant vert doit être thermiquement et (électro)chimiquement stable.
10	<u>Inflammabilité</u> : pour des raisons de sécurité lors de la manipulation, un solvant vert devrait être ininflammable.
11	<u>Stockage</u> : un solvant vert devrait être facile à stocker et devrait satisfaire les exigences de toutes les législations relatives au transport sécuritaire par la route, le train, en bateau ou en avion.
12	<u>Renouvelabilité</u> l'utilisation de matières premières renouvelables pour la production de solvants verts devrait être favorisée en rapport avec l'empreinte carbone.

4.1.4 Écoblanchiment

Selon le Grand dictionnaire terminologique de l'Office québécois de la langue française¹³, 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 écoresponsable.¹⁴ » 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 tromperie des consommateurs concernant les pratiques environnementales des organisations ou les bénéfices environnementaux d'un produit ou d'un service. Il peut donc prendre différentes formes et peut aussi être connu sous le nom de « spin vert », « écart de performance de divulgation » ou « actions symboliques », car les performances environnementales associées au produit ou à l'entreprise ne sont pas à la hauteur de ce qui est proclamé par l'entreprise (De Jong, Harkink et Barth, 2018).

Le concept d'écoblanchiment est apparu au début du siècle actuel, mais la standardisation des outils pour évaluer l'impact réel d'un produit et l'arrivée des écoétiquettes auraient freiné l'écoblanchiment (Lachapelle, 2009; TerraChoice, 2010). Cependant, de fausses étiquettes font leur apparition, ce qui consiste en l'un des sept « péchés » de l'écoblanchiment ou « lavage vert » identifiés par TerraChoice (2010)¹⁵, maintenant UL¹⁶ (voir le détail dans l'encadré 1). Bien que cette publication traite principalement des produits de consommation courants, 95 % des produits commettraient un de ces sept « péchés », ce qui donne une idée de l'ampleur du problème de l'écoblanchiment.

En plus de s'autoproclamer vertes, une autre stratégie qui peut être utilisée par les organisations est l'utilisation de mots à la mode tels que biodégradable ou recyclable ou par l'utilisation d'images sans que la notion de vertitude ne soit explicitement revendiquée, mais suggérée. Cette stratégie a été qualifiée d'écoblanchiment exécutoire (De Jong *et al.*, 2018; Elving et Van Vuuren, 2011). Deux exemples d'écoblanchiment sont détaillés dans l'encadré 2.

¹³ http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=8365406

¹⁴ 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. »

¹⁵ <http://sinsofgreenwashing.com/>

¹⁶ <https://industries.ul.com/environnement/>

Encadré 1 : Typologie de l'écoblanchiment

La société TerraChoice (2010) (maintenant UL) a proposé sept variantes d'écoblanchiment possibles pour les produits de consommation :

Compromis caché : affirmation selon laquelle un produit est vert en se basant sur un nombre déraisonnablement restreint de critères, p. ex. : « de source végétale ».

Absence de preuve : prétention écologique qui ne peut être étayée par une documentation facilement accessible ou par l'agrément d'une tierce partie, p. ex. : « fabriqué à partir de matières recyclées ».

Imprécision : prétention mal ou vaguement définie, p. ex. : « entièrement naturel ».

Non-pertinence : prétention sans importance ou inutile, p. ex. : « sans CFC » (de toute façon interdits par la loi)

Moindre de deux maux : prétention véridique, mais qui détourne l'attention sur un aspect plus important, p. ex. : « toluène vert »

Mensonge : prétention écologique fautive, p. ex. : affirmer qu'une préparation est homologuée ECOLOGO alors qu'elle ne l'est pas.

Culte de l'étiquette mensongère : prétention qui laisse entendre par un mot ou une image qu'une préparation est homologuée par une tierce partie alors qu'elle ne l'est pas.

Encadré 2 : Études de cas d'écoblanchiment

1^{er} cas d'écoblanchiment

Un article paru dans une revue commerciale spécialisée dans les adhésifs et les scellants présente une nouvelle gamme de solvants du fabricant canadien *TBF Environmental* (ASI, 2015). Qualifiés comme verts, ces solvants seraient « biodégradables, sans benzène, non cancérigènes, exempts de polluants atmosphériques dangereux, d'ingrédients dangereux pour l'environnement ou de substances appauvrissant la couche d'ozone ». En particulier, le ZemaSol aurait obtenu la certification « Clean Air Solvent » du *South Coast Air Quality Management District* (SCAQMD) en raison du fait qu'il contient très peu de COV. Le ZemaSol™ serait sécuritaire et moins toxique pour les travailleurs comparativement aux solvants classiques comme le xylène qu'il vise à remplacer. Or, la consultation de la fiche de données de sécurité (FDS) du ZemaSol indique que son point d'éclair est de 4 °C et qu'il contient > 80 % d'acétate de méthyle (TBF, 2014), ce qui en fait une préparation très inflammable. De plus, la tension de vapeur du ZemaSol est très élevée (TBF, 2015) (19,7 kPa à 20 °C) de sorte que son utilisation en circuit ouvert expose potentiellement l'utilisateur à des niveaux importants de vapeur d'acétate de méthyle. Rappelons que la *Threshold Limit Value-Time-Weighted Average* (TLV-TWA) et la *Threshold Limit Value-Short Term Exposure Limit* (TLV-STEL) de l'*American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH) pour l'acétate de méthyle sont respectivement de 200 ppm et 250 ppm. Ces valeurs limites visent à prévenir les céphalées, les étourdissements, la nausée et la dégénérescence des cellules ganglionnaires de la rétine (ACGIH, 2013). En conclusion, le ZemaSol™ est moins dangereux pour l'environnement et peut être moins toxique pour les travailleurs que les solvants classiques, mais son inflammabilité et sa volatilité font en sorte que l'on ne peut le qualifier de solvant plus sécuritaire pour les travailleurs.

2^e cas d'écoblanchiment

Un fournisseur québécois propose un décapant à peinture appelé « Super Eco Décapant », à base de N,N-diméthylformamide (DMF). La publicité* en ligne indique que la préparation est « entièrement biodégradable », « écoresponsable » et qu'elle « satisfait toute personne sensible à l'environnement ». Le site Web en question ne donne aucune preuve des prétentions vertes affichées, comme p. ex. : une note qui indiquerait que le décapant respecte l'essai sur la biodégradabilité n° 301 de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) (OCDE, 1992). En outre, le DMF est classé par le CIRC comme probablement cancérigène pour l'humain (IARC, 2018), alors que la FDS du décapant indique erronément qu'« aucun des composants sont inscrits (sic) comme étant cancérigènes (sic) par l'ACGIH, IARC, OSHA ou NTP » (ICC The Compliance Center Inc., 2018). Rappelons que l'ACGIH classe le DMF comme cancérigène animal confirmé (ACGIH, 2018).

* https://www.superremover.com/fr_CA/produits/super-eco-decapant/

Au Québec, le *Plan d'action pour la croissance et les technologies propres : vers une économie plus verte et prospère*, vise à accroître la compétitivité de l'économie québécoise tout en réduisant son empreinte environnementale. Le plan stipule notamment la mesure 10 concernant l'encadrement du marché des produits et services écoresponsables. On y trouve des mesures que le Gouvernement du Québec a l'intention de prendre en raison de « l'absence d'encadrement en ce qui a trait aux autodéclarations des entreprises sur la performance environnementale de leurs produits, ce qui conduit à des abus, tels que l'écoblanchiment (greenwashing) » et « la difficulté pour les PME d'investir dans des certifications environnementales sans savoir si celles-ci constitueront un argument de vente suffisant et crédible aux yeux des consommateurs ». La mesure du gouvernement vise notamment la création d'un guide sur les bonnes pratiques de marketing écoresponsable, la détermination de balises pour encadrer les déclarations environnementales sur les produits, l'élaboration et la mise en œuvre de mécanismes de lutte à l'écoblanchiment ainsi que la réalisation d'un projet pilote sur l'affichage environnemental des produits pour aider les consommateurs à faire des choix écoresponsables (Gouvernement du Québec, 2018b).

L'association canadienne de normalisation (ACNOR), en collaboration avec le Bureau de la concurrence du Canada, a produit un guide pour l'industrie et les publicitaires concernant les autodéclarations environnementales (ACNOR, 2008). Ce guide indique comment mettre en place des pratiques exemplaires en matière d'autodéclarations environnementales. Le guide donne aussi des exemples d'approches à privilégier et à éviter dans les déclarations environnementales courantes et explique comment éviter les déclarations trompeuses ou mensongères relativement à un avantage environnemental implicite ou explicite. Le guide indique ainsi qu'il « ne faut pas faire de déclaration environnementale vague ou imprécise ou qui implique de façon générale qu'un produit est bénéfique ou inoffensif du point de vue de l'environnement ». On y retrouve des exemples concrets de déclarations vagues ou trompeuses devant être évitées. Par exemple, il faut éviter une phrase comme « ce produit est sans danger pour la couche d'ozone », mais plutôt privilégier une phrase plus précise comme « dans ce produit, les agents propulseurs ont été remplacés par une solution moins nocive pour la couche d'ozone ».

4.2 Catégories de solvants verts

Cette section présente les grandes catégories de solvants verts. Les exemples de solvants présentés sont décrits en fonction des matières premières à partir desquelles ils sont produits.

4.2.1 Eau

Ne contenant pas d'atome de carbone, l'eau n'est pas un solvant organique, mais c'est néanmoins le premier solvant vert auquel on pense lorsqu'il est question de remplacer des solvants organiques dangereux. Ressource renouvelable atoxique par excellence, l'eau est utilisée comme milieu réactionnel dans nombre de réactions chimiques (Breslow, 2010; Scherrmann, Malacria, Goddard et Ollivier, 2008). Dans la plupart des cas de dégraissage industriel, les solvants organiques traditionnels peuvent être avantageusement remplacés par des préparations aqueuses (Lavoué, Bégin et Gérin, 2003). Les revêtements en phase aqueuse ont largement remplacé les peintures à base de solvants d'origine pétrolière pour le bâtiment. Par contre, les peintures anticorrosion à base de solvants traditionnels dominent encore le marché. Or, des revêtements en phase aqueuse pour le métal de plus en plus performants permettent d'envisager leur remplacement (Boggs, 2016; Flecksteiner, John et Giorgio, 2016).

L'eau a également remplacé les solvants organiques dans d'autres domaines importants, p. ex. : les adhésifs et les encres (Bégin *et al.*, 2002).

DeSimone (2002) considère que l'eau est un bon solvant substitutif dans les applications émissives, c.-à-d. celles où l'eau doit s'évaporer, comme dans les peintures. Ce serait une moins bonne solution lorsque l'eau est utilisée comme milieu réactionnel ou dans les bains de teinture en raison des effluents aqueux difficiles à décontaminer (DeSimone, 2002). Par contre, l'eau commutable (voir section 4.2.8.2) est intéressante, car son utilisation comme milieu réactionnel évite la distillation énergivore du solvant organique (Jessop, 2011).

4.2.1.1 Eau supercritique

Un fluide supercritique est une substance maintenue à une pression et à une température au-dessus de leur valeur critique¹⁷. L'eau supercritique (ESC) est obtenue à une température de 374,2 °C et à une pression de 22,05 MPa (Martín et Cocero, 2016). Elle se comporte comme un gaz dense possédant un pouvoir de dissolution équivalant à celui des solvants organiques de faible polarité. À l'inverse, la solubilité des sels inorganiques dans l'ESC est radicalement réduite (Martín et Cocero, 2016). L'ESC est utilisée comme milieu réactionnel, notamment dans les procédés d'oxydation pour la destruction des substances toxiques telles que celles retrouvées dans les effluents aqueux industriels (Marcus, 2012). Faisant appel à la capacité de l'ESC de briser les liens chimiques des polymères, la société japonaise Kobe Steel a mis au point un procédé pour le recyclage du polyéthylène téréphtalate (PET) (Brunner, 2014), notamment utilisé dans la fabrication des bouteilles d'eau. L'utilisation de l'eau supercritique comporte deux principaux défis techniques, soit la corrosion et le dépôt de sels (Martín et Cocero, 2016).

4.2.2 Solvants dérivés des glucides¹⁸

Le bioéthanol est fabriqué industriellement par fermentation des sucres et de l'amidon, un des plus vieux procédés chimiques connus, mais également à partir de la cellulose. Kosaric *et al.* (2012) indiquent que dans la plupart des pays, l'éthanol fermentaire est utilisé dans les boissons alcoolisées et pour l'obtention de produits chimiques de spécialité alors que l'éthanol obtenu par synthèse chimique est utilisé dans les procédés industriels. L'éthanol serait le deuxième solvant le plus utilisé après l'eau. On le retrouve ainsi utilisé dans les articles de toilette, les cosmétiques, certains nettoyants et revêtements (gomme-laque) (Kosaric *et al.*, 2012). L'ACGIH recommande une valeur limite de courte durée (STEL¹⁹) de 1000 ppm pour prévenir l'irritation des voies respiratoires supérieures (ACGIH, 2018). Le biobutanol (alcool butylique, divers isomères) est également produit par fermentation des sucres (Benali,

¹⁷ Point critique : la température et la pression auxquelles les propriétés intensives d'un liquide et de sa vapeur (p. ex. : densité, capacité calorifique) deviennent égales. C'est la température la plus élevée (température critique) et la pression la plus élevée (pression critique) auxquelles une phase gazeuse et une phase liquide d'un composé donné peuvent coexister. Température critique : température caractéristique de chaque gaz au-dessus de laquelle il n'est pas possible de le liquéfier. Pression critique : la pression minimale qui suffirait pour liquéfier une substance à sa température critique. Au-dessus de la pression critique, l'élévation de la température ne provoquera pas la vaporisation d'un fluide en un système à deux phases [traduction libre] (IUPAC, 2014).

¹⁸ La littérature anglophone utilise l'expression *carbohydrates*, traduite autrefois en français par hydrates de carbone pour désigner les glucides.

¹⁹ *Threshold Limit Value – Short-Term Exposure Limit* (15 min).

Boumghar et Benyagoub, 2015). L'isobutanol et le ter-butanol sont utilisés comme solvants dans les peintures (Benali *et al.*, 2015). Le butan-1-ol, utilisé comme solvant notamment dans les peintures, nettoyants et dégraissants, a fait l'objet d'une recommandation de valeur limite d'exposition professionnelle (VLE) de courte durée (15 min) de 100 mg/m³ (33 ppm) par l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) afin de prévenir l'irritation des muqueuses oculaires et des voies aériennes supérieures. L'Anses ne propose pas de VLE pondérée sur 8 h, en l'absence de données probantes sur des effets systémiques spécifiques de cet alcool à moyen et à long terme (Anses, 2017). L'ACGIH recommande depuis 1998 une VLE sur 8 h de 20 ppm (60 mg/m³) de butan-1-ol pour prévenir l'irritation des yeux et des voies respiratoires supérieures (ACGIH, 2018).

Le lactate d'éthyle, fabriqué à partir d'acide lactique obtenu de l'amidon de maïs est notamment utilisé sous forme de mélange avec d'autres solvants dans certains décapants et nettoyants (Bégin, Heng et Gérin, 2005). Le Répertoire toxicologique (RepTox) de la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) classe ce solvant comme un liquide inflammable (point d'éclair 46 °C) et un irritant oculaire sévère en vertu des critères du Système d'information sur les matières dangereuses utilisées au travail (SIMDUT 2015) (RepTox, 2008). En Europe, la Finlande, les Pays-Bas et la Suède possèdent des VLE respectivement de 25 mg/m³ (8 h) et 49 mg/m³ (15 min), 20 mg/m³ (8 h), 25 mg/m³ (8 h) et 50 mg/m³ (15 min). 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 (Bégin, Heng, *et al.*, 2005).

L'alcool tétrahydrofurfurylique (THFA) est obtenu de l'hémicellulose²⁰. Bohnert, Carter, Hand et Powers (1996) ont breveté un mélange comprenant le THFA combiné au d-limonène, utilisable pour le nettoyage de salissures polaires ou non, souillant des pièces électriques et mécaniques. Dans un autre brevet, Bergemann, Opre et Henneberry (2000) proposent un décapant à peinture à base de THFA combiné à un ester méthylique d'acide gras (EMAG) et à du lactate d'éthyle (Bergemann *et al.*, 2000). Le THFA entraîne des effets toxiques sur l'appareil reproducteur des rats mâles. Il provoque aussi des effets sur le développement embryonnaire et fœtal chez le rat (INRS, 2016). Basé sur les *No-observed-effect level* (NOEL) de deux études subchroniques chez le rat et le chien, l'*American Industrial Hygiene Association* a recommandé en 1993 une VLE (8 h) de 2 ppm pour le THFA afin de prévenir la dégénérescence testiculaire (AIHA, 1993).

4.2.3 Solvants dérivés des lipides

Les lipides (triglycérides) sont hydrolysés pour donner des acides gras et du glycérol (glycérine). Les acides gras peuvent être estérifiés avec un alcool pour donner des esters d'acides gras, p. ex. : des EMAG si l'estérification est réalisée avec le méthanol. Le glycérol issu de l'hydrolyse des lipides est utilisable comme solvant en chimie de synthèse tout comme certains de ses dérivés (Gu et Jérôme, 2013).

Les EMAG sont utilisés comme solvants de dégraissage de pièces métalliques (Diallo, F., Bégin et Gérin, 2010). Johansson et Johansson (2007) ont étudié leur emploi comme diluant réactif

²⁰ Variété de cellulose hydrolysable en milieu acide provenant des rafles de maïs, de la sciure de bois et de la bagasse.

dans les enduits pour le laquage en continu de bandes métalliques (p. ex. : le revêtement intérieur des boîtes de conserve), réduisant significativement la quantité de solvant volatil dans ce type de revêtement.

Faiblement toxiques, les EMAG utilisés en milieu de travail ne présentent pas de problèmes majeurs. En outre, ils ont très peu d'effets dommageables sur l'environnement (Diallo, F. *et al.*, 2010). Généralement dérivé du gaz naturel ou du pétrole, le méthanol utilisé pour produire les EMAG peut aussi être obtenu par d'autres voies, notamment par gazéification thermochimique de la biomasse et de déchets ménagers (Lavoie J.M., Marie-Rose et Lynch, 2013).

Les lipides peuvent eux-mêmes être utilisés comme solvants. En effet, Yara-Varón *et al.* (2017) ont récemment publié un article de revue concernant l'emploi des huiles végétales comme solvants pour extraire diverses substances naturelles telles que l'astaxanthine (3,3'-dihydroxy- β -carotène-4,4'-dione), un terpène utilisé notamment comme antioxydant dans l'industrie alimentaire.

4.2.4 Solvants issus de la lignine

Azadi *et al.* (2012) proposent une méthode de dépolymérisation de la lignine aboutissant à la production de deux solvants de type phénol alkylé : 4-propyl-2,6-diméthoxyphénol et 1-propyl-3-méthoxy-4-hydroxybenzène. Liao, Dewaele, Verboekend et Sels (2017) ont recensé les diverses méthodes d'obtention des phénols alkylés à partir de la biomasse et de la lignine en particulier, leurs propriétés et utilisations comme solvants. Leur usage est concentré dans le domaine de la chimie industrielle, p. ex. : en synthèse et en extraction.

4.2.5 Solvants eutectiques profonds

En combinant certaines substances dans des proportions données, il est possible d'obtenir un mélange dont le point de fusion est inférieur à ceux des constituants. C'est ce qu'on appelle un mélange eutectique. Plusieurs substances solides ainsi mélangées deviennent des liquides utilisables comme solvants, particulièrement lorsque la dépression du point de fusion est très grande, d'où l'expression solvant eutectique profond (*deep eutectic solvent*, DES). Une des substances les plus utilisées pour obtenir des DES est le sel d'ammonium quaternaire appelé chlorure de choline²¹ (chlorure de triméthyl-hydroxyéthylammonium). Smith, Abbott et Ryder (2014) rapportent qu'un mélange d'urée (point de fusion : 133 °C) et de chlorure de choline (point de fusion : 302 °C) dans un rapport molaire 2:1 possède un point de fusion égal à 12 °C. Plusieurs auteurs ont publié des revues de littérature concernant les solvants eutectiques profonds et leurs applications en électrochimie, procédés de séparation, catalyse, synthèse, préparation de matériaux et biotechnologie (Francisco, van den Bruinhorst et Kroon, 2013; Paiva *et al.*, 2014; Smith *et al.*, 2014; Zhang, Q., De Oliveira Vigier, Royer et Jérôme, 2012).

Wazeer, Hayyan et Hadj-Kali (2017) soutiennent que les composants des DES sont généralement atoxiques et biodégradables. Hayyan *et al.* (2013) rapportent que les DES qu'ils

²¹ La choline est une substance présente dans les tissus animaux et végétaux, surtout sous la forme d'esters comme l'acétylcholine, un neurotransmetteur.

ont étudiés²² étaient plus toxiques que leurs composants pris individuellement sur l'artémia, un petit crustacé, ce qui pourrait être expliqué par une forme de synergie.

Certains DES sont composés entièrement de substances issues de ressources renouvelables, d'où l'acronyme NADES (*natural deep eutectic solvent*). Ces derniers seraient généralement moins toxiques que les autres DES (Wazeer *et al.*, 2017).

4.2.6 Solvants obtenus par extraction

Les solvants faisant partie d'une classe diversifiée de substances naturelles appelées terpènes²³ sont obtenus par extraction de certaines parties de végétaux. Tous les terpènes se présentent structurellement comme des multiples de l'isoprène de formule brute $(C_5H_8)_n$. Le d-limonène, un monoterpène²⁴, est l'un des solvants les plus connus de cette classe tout comme la térébenthine²⁵. Le d-limonène est extrait des pelures d'agrumes alors que la térébenthine provient des pins (sève, souche) et comme sous-produits de la fabrication du papier par le procédé Kraft (Sell, 2006). Le d-limonène a fait l'objet d'une monographie de Bégin et Gérin (1999a), décrivant notamment ses applications et sa toxicologie industrielle. La térébenthine est un mélange de terpènes de composition variable en fonction de sa provenance et de la méthode de production. Au Canada et aux États-Unis, on y retrouve une fourchette de concentrations massiques de 40 à 65 % d' α -pinène et de 20 à 35 % de β -pinène, mais également de 2 à 20 % de d-limonène (Gscheidmeier et Fleig, 2000). L' α -pinène peut remplacer le n-hexane pour l'extraction de l'huile végétale et comme solvant substitutif pour extraire des molécules telles que les caroténoïdes utilisés notamment comme additifs alimentaires (Boutekedjiret, Vian et Chemat, 2014). La térébenthine, utilisée anciennement comme solvant dans les revêtements organiques, est aujourd'hui largement remplacée par les hydrocarbures pétroliers (Gscheidmeier et Fleig, 2000). De nos jours, elle est principalement utilisée comme source de ses constituants, notamment l' α -pinène et le β -pinène (Haneke, 2002). La térébenthine est un irritant pour la peau, les yeux et les voies respiratoires supérieures. C'est également un sensibilisant cutané (RepTox, 2004). Elle est d'ailleurs considérée comme telle dans le Règlement sur la santé et la sécurité du travail (RSST) (Gouvernement du Québec, 2017). Haneke (2002) a publié une revue de la littérature toxicologique concernant la térébenthine.

4.2.7 Liquides ioniques

Les liquides ioniques sont des sels organiques fondus, généralement fluides à la température ambiante. Les cations les plus populaires, substitués diversement, comprennent notamment l'imidazolium, le pyridinium, l'ammonium et le phosphonium. Les anions comprennent p. ex. : les halogénures, le tétrafluoroborate, l'hexafluorophosphate et le nitrate (Bubalo, Vidović, Redovniković et Jokić, 2015). Bubalo *et al.* (2015) soutiennent que les liquides ioniques sont ininflammables, stables chimiquement, électrochimiquement et thermiquement, leur volatilité

²² Chlorure de choline associé séparément aux quatre molécules suivantes : glycérine, éthylène glycol, triéthylène glycol, urée.

²³ Le camphre et les carotènes sont des exemples de terpènes, sans être des solvants.

²⁴ Nom générique des terpènes de formule moléculaire $C_{10}H_{16}$ (autres terpènes : sesquiterpènes $C_{15}H_{24}$, diterpènes $C_{20}H_{32}$, triterpènes $C_{30}H_{48}$, etc.).

²⁵ Plusieurs auteurs font la distinction entre les termes *térébenthine* et *essence de térébenthine*, le premier se référant aux oléorésines extraites des conifères alors que le deuxième est le produit volatil obtenu par distillation des sucs oléorésineux provenant des diverses variétés de pin.

étant négligeable. C'est d'ailleurs ce qui pousse à les appeler solvants verts, car leur faible volatilité permet de limiter les émissions de COV, comparativement aux solvants conventionnels (Zhang, Y. *et al.*, 2008). Diallo, Len, Morgan et Marlair (2012) affirment cependant que la terminologie utilisée dans la littérature pour décrire les propriétés physicochimiques des liquides ioniques peut être mystifiante. Ils soutiennent ainsi que l'affirmation selon laquelle les liquides ioniques sont ininflammables devrait obligatoirement être rapportée en indiquant qu'elle s'applique spécifiquement en vertu des critères du Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques (SGH)²⁶ (point d'éclair). En outre, leur volatilité devrait être présentée comme généralement faible à très faible, alors que leur stabilité thermique devrait être qualifiée comme plutôt bonne à très bonne (Diallo *et al.*, 2012).

Les liquides ioniques trouvent de nombreuses applications en chimie industrielle (Mohammad et Inamuddin, 2012b), particulièrement en électrodéposition (Endres, Abbott et MacFarlane, 2017). Par ailleurs, concernant les travaux où les solvants classiques sont utilisés en circuit ouvert, Yerty, Klingenberg, Berman et Voevodin (2012) ainsi que Klingenberg, Berman et Voevodin (2013) rapportent une étude sur le potentiel de l'acétate de 1-éthyl-3-méthylimidazolium (EMIM) et de l'éthylsulfate d'EMIM, comparativement au lactate de 2-éthylhexyle, pour le dégraissage de pièces métalliques souillées de graisse au disulfure de molybdène. Le lactate était considéré comme ayant une performance équivalente à celle du HFE-7100²⁷, un hydrofluoroéther utilisé pour le dégraissage en phase vapeur dans l'atelier d'entretien où les essais avaient lieu. Les auteurs concluent que le lactate et l'acétate avaient une performance de dégraissage acceptable alors que l'éthylsulfate avait une performance inférieure à ces deux esters (Klingenberg *et al.*, 2013; Yerty *et al.*, 2012).

Les liquides ioniques ont d'abord été présentés comme les solvants verts du futur (Earle et Seddon, 2000), mais leur étoile a pâli dans les années 2000 en raison notamment de leur écotoxicité et de leur faible biodégradabilité (Bubalo, Radošević, Redovniković, Halambek et Srček, 2014; Zhu, S. *et al.*, 2009). En outre, les matières premières généralement utilisées pour leur fabrication sont non renouvelables, comme c'est le cas pour l'imidazole et les alcanes halogénés, dérivés du pétrole (Bubalo *et al.*, 2014). Cependant, des liquides ioniques issus de ressources renouvelables et biodégradables ont fait leur apparition (Hulsbosch, De Vos, Binnemans et Ameloot, 2016; Imperato, König et Chiappe, 2007).

4.2.8 Dioxyde de carbone (CO₂)

4.2.8.1 CO₂ supercritique

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). 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.

²⁶ http://www.unece.org/fr/trans/danger/publi/ghs/ghs_welcome_f.html

²⁷ Maintenant connu sous l'appellation *Novec™ 7100 Engineered Fluid*, fabriqué par la société 3M : <http://multimedia.3m.com/mws/media/199818O/3mtm-novectm-7100-engineered-fluid.pdf>

Le CO₂ supercritique est utilisé pour extraire diverses substances de végétaux, notamment la caféine, la nicotine, les aromatisants, les parfums, les huiles essentielles et les lipides (Benaissi, 2013). Diverses réactions chimiques peuvent être réalisées dans le CO₂ supercritique (Wu et Han, 2013).

Hoy, Nielson et Lee (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, Parsons et Olfenbuttel, 1994).

Mis en œuvre dans une machine sous pression, le CO₂ supercritique est utilisé pour le nettoyage à sec en remplacement du tétrachloréthylène (PERC) (Bégin, Gérin et Debia, 2016). 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).

Une firme néerlandaise²⁸ a mis au point une technologie pour teindre les tissus sans utilisation d'eau ou de substances chimiques autre que le colorant, par l'emploi du CO₂ supercritique (Ritter, 2014). Cette technologie est utilisée avantageusement par un fabricant taiwanais²⁹.

4.2.8.2 Solvants commutables

Le bullage de CO₂ dans l'eau ou dans un solvant organique a pour effet de modifier certaines propriétés du liquide telles que sa polarité, sa force ionique et son caractère hydrophile (Jessop, Mercer et Heldebrant, 2012). À titre d'exemple, il est ainsi possible de faire en sorte qu'un solvant organique forme un mélange homogène avec l'eau, autrement immiscible. En outre, le processus est réversible. Jessop *et al.* (2012) ont développé cette technologie qui a le potentiel d'être utilisée en chimie de synthèse, en extraction et en séparation de diverses substances. Le degré de *vertitude* de cette technologie se mesure par l'économie d'énergie et de matériaux qu'elle permet; ainsi, un des avantages des solvants commutables est la réutilisation du solvant et de l'eau (Jessop *et al.*, 2012).

4.2.9 Solvants issus de matières résiduelles

Les bioraffineries de 1^{re} génération exploitent des substances d'origine alimentaire telles que l'amidon et les huiles végétales (Benyagoub et Lachance, 2012). À titre d'exemple, le maïs-grain est utilisé pour fabriquer de l'éthanol dans une usine québécoise située à Varennes. Les bioraffineries de 2^e génération utilisent plutôt les résidus ou déchets générés par diverses industries comme matière première pour la fabrication de leurs solvants. Byrne, F. *et al.* (2017) recensent les technologies disponibles pour fabriquer divers solvants à partir des déchets alimentaires et industriels.

²⁸ <http://www.dyecoo.com/>

²⁹ <https://news.nike.com/news/nike-colordry>

Le 2-méthyltétrahydrofurane, provenant de déchets lignocellulosiques, aurait le potentiel de remplacer le tétrahydrofurane, le toluène, le DCM et l'éther diéthylique dans certaines applications (Byrne, F. *et al.*, 2017). Des esters de l'acide lévulinique de même source auraient le potentiel de remplacer le DCM dans les nettoyeurs et les décapants à peinture (Byrne, F. *et al.*, 2017; Rieth, Tjosaas et Yontz, 2014).

Les huiles de cuisson usées peuvent être utilisées pour produire des EMAG (Byrne, F. *et al.*, 2017). Le glycérol, obtenu comme sous-produit de la synthèse de ces derniers, peut servir à son tour à produire différents solvants tels que le 2,2-diméthyl-1,3-dioxolane-4-méthanol, utilisable comme solvant dans la formulation d'encre et de nettoyeurs (Byrne, F. *et al.*, 2017).

Les terpènes décrits plus haut sont obtenus à partir de résidus ou déchets d'autres industries (Byrne, F. *et al.*, 2017).

La fabrication d'éthanol par fermentation des sucres entraîne la production d'un résidu appelé huile de fusel, un mélange composé principalement d'isomères de l'alcool amylique tels que l'alcool isoamylique (3-méthyl-1-butanol) (Kosaric *et al.*, 2012). Bandres, de Caro, Thiebaud-Roux et Borredon (2011) ont utilisé cet alcool issu d'une huile de fusel dérivée de betterave et de blé pour fabriquer de l'acétate d'isoamyle, du carbonate d'isoamyle et de méthyle (méthyl 3-méthylbutyl carbonate) et de l'isovalérate d'éthyle (éthyl 2-méthylpropyl carbonate). Ces solvants verts ont ensuite été utilisés pour fabriquer un vernis à ongles. En utilisant la méthode recommandée par l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis pour le calcul des émissions de COV dans la fabrication des revêtements organiques, Bandres *et al.* (2011) ont calculé la quantité de COV générée par la fabrication du vernis à ongles avec les solvants verts, tels que l'acétate d'éthyle, l'acétate de butyle et l'isopropanol, comparativement à celle générée en utilisant les solvants pétrochimiques traditionnels pour la fabrication de ce type de vernis. Les auteurs rapportent une diminution minimale de 68 % de COV en utilisant les solvants dérivés de l'huile de fusel (Bandres *et al.*, 2011).

Une société québécoise a développé et mis en œuvre un procédé de gazéification thermochimique à partir d'ordures ménagères et autres déchets lignocellulosiques, permettant la production de méthanol et d'éthanol (Lavoie J.M. *et al.*, 2013).

4.2.10 Solvants d'origine pétrochimique possédant certaines caractéristiques vertes

Notamment en raison du prix élevé des nouveaux solvants durables, Clark *et al.* (2017) listent vingt-cinq solvants jugés acceptables actuellement pour remplacer des solvants dangereux même s'ils sont dérivés de la pétrochimie. Parmi ceux-ci, on retrouve le carbonate de propylène et des DBE. Le carbonate de propylène et les DBE ont fait l'objet de monographies sur la substitution des solvants (Bégin, Beaudry et Gérin, 2005; Bégin et Gérin, 1999b). Le carbonate de propylène et deux DBE sont considérés comme verts dans le guide de sélection des solvants du fabricant GlaxoSmithKline (*GSK Solvent Sustainability Guide*), utilisé dans l'industrie pharmaceutique (Alder *et al.*, 2016). À noter que le carbonate de propylène peut aussi être produit à partir de ressources renouvelables (Vriet et Mouloungui, 2008). Par contre, les DBE apparus ces dernières années sur le marché (Deroo, 2010) semblent toujours être obtenus en valorisant des sous-produits de la synthèse des polyamides, dérivés du pétrole, comme c'était le cas pour les DBE originaux (Bégin et Gérin, 1999b).

D'autres solvants pétrochimiques sont qualifiés diversement de solvants verts, tels que certains hydrocarbures halogénés comme le PCBTF³⁰. Ce dernier est utilisé depuis le début des années 1990 dans les peintures pour remplacer les solvants précurseurs de smog (Anderson, 2005). Ce solvant est prisé parce qu'il n'est pas listé comme un composé organique volatil (COV) participant à des réactions photochimiques atmosphériques dans la Loi canadienne sur la protection de l'environnement (LCPE; annexe 1)³¹ (Gouvernement du Canada, 2018b).

Les siloxanes³² sont des composés contenant des atomes de silicium, d'oxygène, de carbone et d'hydrogène. Ils sont connus en industrie, surtout sous la forme de polymères (silicones, R-SiO-R'), notamment pour leur stabilité thermique et leurs propriétés élastiques et antiadhésives. Le début des années 1990 a vu apparaître des siloxanes de faible poids moléculaire (méthylsiloxanes), utilisables comme solvants dans le nettoyage de précision, en remplacement des solvants appauvrissant la couche d'ozone stratosphérique (Burow, 1993). Les méthylsiloxanes peuvent être considérés comme verts à plusieurs égards d'après Ab Rani *et al.* (2014). Ces auteurs ont en effet calculé le degré de *vertitude* de sept méthylsiloxanes en utilisant la méthodologie, légèrement modifiée de Capello *et al.* (2007), résumée par Bégin, Debia et Gérin (2008) (§ 3.7.1), qui prend en compte une dizaine de paramètres sécuritaires, sanitaires et environnementaux. Le dodécaméthylpentasiloxane, l'octaméthylcyclotétrasiloxane (D4) et le décaméthylcyclopentasiloxane (D5) seraient à rejeter alors que les solvants hexaméthylsiloxane, octaméthyltrisiloxane, décaméthyltétrasiloxane, et poly(diméthylsiloxane) seraient acceptables selon cette méthodologie (Ab Rani *et al.*, 2014).

Une dernière catégorie de solvants pétrochimiques qualifiables comme verts concerne les solvants polymériques. L'Union internationale de chimie pure et appliquée, mieux connue d'après son acronyme anglais IUPAC, définit de la façon suivante l'expression solvant polymérique (*polymer solvent*) : un polymère qui agit comme un solvant pour les composés de faible masse molaire (IUPAC, 2014). En chimie industrielle, les poly(éthylène glycols)³³ (PEG, H(OCH₂CH₂)_nOH) constituent l'une des familles de solvants polymériques les plus utilisées (Clarke, Tu, Levers, Brohl et Hallett, 2018). Les PEG, dont le poids moléculaire est en deçà de 600 Da, sont des liquides visqueux à la température ambiante alors que les PEG plus lourds sont des solides cireux (Chen, Spear, Huddleston et Rogers, 2005). Les PEG sont largement utilisés dans les cosmétiques (CIR, 2010). Les PEG peuvent être employés comme solvants en chimie industrielle pour les séparations, les extractions et les synthèses organiques (Clarke *et al.*, 2018). Solubles dans l'eau et facilement biodégradables, les PEG liquides ont l'avantage d'avoir une volatilité négligeable (< 0,01 mmHg ou < 1,3 Pa @ 20 °C) (Dow, 2017). Les PEG sont synthétisés à partir d'éthylène glycol et d'oxyde d'éthylène, deux molécules issues de la pétrochimie (Forkner *et al.*, 2005). De l'éthylène glycol de source renouvelable (cellulose) est cependant disponible sur le marché (Zhu, Y., Romain et Williams, 2016). Les PEG seraient faiblement irritants pour la peau et les yeux (CIR, 2010). L'*American Industrial Hygiene Association* a proposé une valeur limite d'exposition professionnelle (*Workplace Environmental Exposure Level*, WEEL 8 h)³⁴ de 10 mg/m³ pour les aérosols de PEG (poids moléculaire > 200 Da) (AIHA, 2009).

³⁰ Le rapport récent du *National Toxicology Program* sur le PCBTF le considère maintenant comme un cancérigène animal confirmé (*National Toxicology Program*, 2018).

³¹ <http://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/C-15.31/page-52.html>

³² Chimiquement, un siloxane est un produit de condensation avec perte d'eau des silanols (SiR₃-OH)

³³ Aussi appelés poly(oxyde d'éthylène) ou poly(oxyéthylène).

³⁴ <https://www.tera.org/OARS/WEELs.pdf>

En résumé, le Tableau 4 présente les grandes catégories de solvants verts avec des exemples de solvants ou de produits contenant ces solvants pour chacune des catégories, ainsi que des domaines d'application.

Tableau 4. Catégories, exemples de produits et d'applications des solvants verts

Catégorie	Exemple	Exemples d'application
Eau	Eau	Nettoyants aqueux (Lavoué <i>et al.</i> , 2003), peintures en phase aqueuse (Charretton, Falcy, Triolet et Lebreton, 2006)
Solvants dérivés des glucides	γ -Butyrolactone	Décapant de masque lithographique (électronique, circuits imprimés) (Bhatt, Ksenak, Papatomas, Shurtleff et Wagner, 1996)
Solvants dérivés des lipides	Soyate de méthyle	Dégraissant et nettoyant de surfaces métalliques (Diallo, F. <i>et al.</i> , 2010)
Solvants dérivés de la lignine	Phénols alkylés	Extraction par solvant (Liao <i>et al.</i> , 2017)
Solvants eutectiques profonds	Chlorure de choline + chlorure chromique	Chromage (dépôt électrolytique de chrome) (Smith <i>et al.</i> , 2014)
Solvants obtenus par extraction	d-Limonène	Dégraissant (Bégin et Gérin, 1999a)
Liquides ioniques	Acétate de 1,5-diazabicyclo[4.3.0]non-5-ène	Dissolution de la cellulose (fabrication de fibre textile cellulosique) (Michud <i>et al.</i> , 2015)
Dioxyde de carbone	CO ₂ liquide	Nettoyage à sec (Bégin <i>et al.</i> , 2016)
Solvants issus de matières résiduelles	2-Méthyltétrahydrofurane	Synthèse chimique (Vaddula, Yalla et Gonzalez, 2014)
Solvants d'origine pétrochimique	Carbonate de propylène	Nettoyage d'outils (fabrication d'objets en fibre de verre) (Bégin, Beaudry, <i>et al.</i> , 2005)

4.3 Certifications

De nombreux fabricants désirant « verdir » leurs produits se sont tournés vers la certification environnementale sous la forme d'étiquettes écologiques (écoétiquettes). La certification vise à assurer une impartialité dans l'évaluation des préparations commerciales et à garantir le respect de critères minimaux, tout en augmentant la transparence pour les consommateurs.

Afin d'encadrer ces processus de certification, l'Organisation internationale de normalisation (ISO) a développé la série de normes ISO 14020, 14021, 14024 et 14025 qui visent l'établissement de critères pour l'étiquetage et pour les déclarations environnementales. La première norme (ISO 14020) établit certains principes généraux, la norme ISO 14021:2016³⁵ est plutôt une norme visant l'autodéclaration (étiquetage de type II) alors que la norme ISO 14024:2018³⁶ concerne l'étiquetage approuvé par un organisme indépendant de certification (label environnemental de type I). Quant à ISO 14025, elle vise à établir les principes et modes opératoires pour les déclarations environnementales de Type III qui présentent des informations environnementales quantifiées et validées sur le cycle de vie d'un produit. Ce type de déclaration est principalement destiné à une communication interentreprises pour permettre des comparaisons de la performance environnementale de préparations données remplissant la même fonction (ISO, 2006a).

Il existe aujourd'hui un foisonnement de prétentions vertes affichées par les fabricants de préparations commerciales contenant des solvants. Concernant les préparations nettoyantes, Boivin, Durif et Drouillard (2010) ont recensé tous les nettoyants vendus dans 32 bannières au Québec. Leur enquête a permis d'identifier 1205 produits vendus sous 133 marques et comportant 52 écoétiquettes différentes. Parmi ces dernières, seules 3 écoétiquettes, appelées « ecolabels officiels », provenaient d'organisations se soumettant à l'évaluation d'une tierce partie. Quatorze labels établis par des critères provenant d'une tierce partie, mais non soumis à une vérification et 35 ecolabels maison possédant leur propre système de vérification avaient aussi été répertoriés.

Des répertoires d'écoétiquettes existent, que ce soit à l'échelle internationale³⁷, nationale³⁸ ou locale³⁹, et couvrent différents domaines d'application. Sans prétention d'exhaustivité, les étiquettes présentées dans les prochaines sections concernent spécifiquement celles où des préparations commerciales peuvent contenir des solvants.

³⁵ <https://www.iso.org/fr/standard/66652.html>

³⁶ <https://www.iso.org/fr/standard/72458.html>

³⁷ <http://www.ecolabelindex.com/>

³⁸ <http://www.ic.gc.ca/eic/site/oca-bc.nsf/fra/ca02523.html>

³⁹ <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/developpement/ecoetiquette/index.asp>

4.3.1 Certifications nord-américaines

4.3.1.1 Green Seal

*Green Seal*⁴⁰ est un programme de certification environnementale états-unien qui a vu le jour en 1989 afin d'aider le consommateur à faire des choix éclairés en matière de produits durables. *Green Seal* est également la raison sociale de l'organisme à but non lucratif, qui a été soumis à une vérification en 2015 et qui respecte les normes ISO 14020 et ISO 14024⁴¹, qui certifie plus de 400 produits, mais également des services à partir de 33 normes. Parmi celles-ci, deux concernent spécifiquement les peintures et revêtements (GS-11 et GS-43) (*Green Seal*, 2013b, 2015), cinq concernent les produits nettoyeurs (GS-34, GS-37, GS-40, GS-51 et GS-53) (*Green Seal*, 2017a, 2017b, 2017c, 2017d, 2017e) et une se rapporte aux adhésifs pour usage commercial (GS-36) (*Green Seal*, 2013a). La plupart des normes établissent, en faisant référence à certaines normes de l'*American Standard for Testing and Materials* (ASTM) et de l'OCDE, des critères précis dans les domaines de l'efficacité du produit, de la santé et de l'environnement ainsi que des exigences en matière de l'utilisation du logo *Green Seal* (étiquetage) et de formation des utilisateurs.

Les normes *Green Seal* considèrent la toxicité des préparations commerciales. Par exemple, dans la norme GS-40, la toxicité des produits est évaluée en prenant en compte des valeurs toxicologiques de référence comme la dose létale médiane (DL₅₀) chez l'animal. Pour évaluer la toxicité aiguë des mélanges, un calcul de « toxicité » est proposé afin de tenir compte de chaque ingrédient en considérant l'additivité des effets. Seuls les ingrédients pourvus d'une pression de vapeur plus grande que 1 mmHg à 20° C⁴² sont considérés dans le calcul. Les substances cancérigènes, mutagènes et/ou toxiques pour la reproduction ne doivent pas être utilisées. On considère que les préparations entraînent des dommages à la peau et aux yeux si leur pH est inférieur à 2,5 ou supérieur à 11. La norme GS-40 proscrit les sensibilisants cutanés (*Green Seal*, 2017c).

Les préparations non diluées ne doivent pas être allumables. La norme GS-34 précise que les produits non dilués doivent avoir des points d'éclair supérieurs à 60° C alors que la norme GS-40 indique que les points d'éclair des produits non dilués doivent être supérieurs à 66 °C ou alors, ces derniers ne doivent pas entretenir une flamme lorsque mis à l'essai en vertu de la norme ASTM D4206 (*Green Seal*, 2017a, 2017c).

Pour l'environnement, certaines normes font référence aux concentrations maximales de COV à ne pas dépasser dans la préparation selon le type d'application (*Green Seal*, 2017a, 2017d); certaines sont basées sur les valeurs établies par le *California Air Resources Board* (CARB)⁴³. Ces valeurs visent entre autres à respecter les critères de qualité de l'air ambiant de la Californie (ou CAAQS pour *California Ambient Air Quality Standards*)⁴⁴. Par exemple, la norme GS-34 stipule que les concentrations maximales de COV ne doivent pas excéder le plus bas des deux critères suivants : 5 % en poids ou la valeur établie par le CARB (*Green Seal*, 2017a).

⁴⁰ <http://www.greenseal.org/>

⁴¹ <https://www.greenseal.org/standards/development/>

⁴² Dans le système international, correspondant à 133,3 Pa

⁴³ <https://www.arb.ca.gov/coatings/arch/rules/VOClimits.pdf>

⁴⁴ <https://www.arb.ca.gov/research/aaqs/caaqs/caaqs.htm>

De plus, les substances ne doivent pas entraîner de déplétion de la couche d'ozone, l'eutrophisation ni la toxicité aquatique ou la bioaccumulation dans l'environnement. Ainsi, dans la norme GS-34, les ingrédients doivent satisfaire à des critères de biodégradation aquatique mesurés selon des normes ISO ou OCDE (*Green Seal*, 2017a).

4.3.1.2 Greenguard

Cette certification, relevant de la compagnie états-unienne privée *Underwriters Laboratories* (UL), vise spécifiquement la certification des produits à faible concentration en COV et est applicable pour une multitude de produits incluant des nettoyeurs, des adhésifs, des scellants, des revêtements et des peintures⁴⁵.

Dans la norme UL 2821 portant spécifiquement sur les matériaux de construction, de finition et de fournitures, des concentrations et des taux d'émission maximaux en COV sont identifiés afin d'attribuer la classification *Greenguard* ou *Greenguard Gold*, plus sévère (UL, 2018). Ces normes garantissent aux occupants sensibles, pouvant être des enfants ou des adultes, des niveaux de concentration de COV qui ne dépasseront pas 1/100 des TLV de l'ACGIH ni la moitié des niveaux d'exposition chronique de référence de la Californie (OEHHA, 2016). Concernant la norme *Greenguard* portant sur les émissions de substances chimiques associées aux nettoyeurs (UL 2820 (UL, 2013)), les critères à ne pas dépasser en termes de COV sont également exprimés en concentrations en mg/m³ durant leur utilisation, soit 5 mg/m³ pour le court terme (4 h) et 0,22 mg/m³ pour le long terme (14 h).

4.3.1.3 ECOLOGO

Cette étiquette, parfois encore désignée sous le nom de Choix environnemental, a été créée en 1988 par Environnement Canada et vise à identifier des produits permettant de réduire les impacts environnementaux. La certification a été vendue à une compagnie canadienne en 1995 puis à la compagnie *Underwriters Laboratories* en 2010 pour devenir l'étiquette UL ECOLOGO⁴⁶. Depuis que cette société états-unienne a fait l'acquisition complète du programme, elle n'utilise plus les logos créés originalement par Environnement Canada; UL a créé son propre logo UL ECOLOGO et toute la documentation est désormais disponible uniquement en anglais. Cette certification s'applique à une grande variété de catégories de produits qui incluent des produits de nettoyage et d'hygiène personnelle, des peintures et vernis, des adhésifs et des revêtements de plancher qui peuvent contenir des solvants⁴⁷. Six mille cinq cent soixante-dix-neuf produits possédaient l'étiquette environnementale ECOLOGO en 2019. Le programme ECOLOGO respecte la norme ISO 14024.

Les produits listés et bénéficiant de l'étiquette ECOLOGO doivent satisfaire différents critères identifiés dans des normes UL spécifiques. Plusieurs normes UL concernent des préparations pouvant contenir des solvants comme les suivantes : UL 2759 (nettoyants de surfaces dures) (UL, 2011d); UL 2761 (scellants et produits de calfeutrage) (UL, 2011c); UL 2762 (adhésifs) (UL, 2011a); UL 2767 (décapants pour peinture et vernis) (UL, 2011b); UL 2792 (composés biologiques nettoyeurs et dégraissants) (UL, 2012b); UL 2768 (revêtements de surface architecturale) (UL, 2011e).

⁴⁵ <http://greenguard.org/en/index.aspx>

⁴⁶ <http://industries.ul.com/environment/certificationvalidation-marks/ecologo-product-certification>

⁴⁷ <https://spot.ul.com/main-app/products/catalog/?keywords=&filter=Certification:ECOLOGO%2520Certification>

La norme UL 2767 pour les décapants de peintures et vernis indique ainsi que la préparation qui satisfait ses critères a été formulée sans DCM, est techniquement performante, possède une documentation permettant de maximiser sa performance et décrivant les méthodes d'élimination, contient une concentration de COV n'excédant pas 250 g/L, est biodégradable comme défini par les exigences de l'une des six méthodes publiées par l'OCDE, et n'est pas toxique pour la vie aquatique avec une concentration létale médiane (CL₅₀) excédant 100 mg/L (UL, 2011b). À noter que le document fournit une liste de 32 substances et familles de substances (p. ex. : perfluorocarbones, siloxanes) qui ne doivent pas être considérées comme des COV en raison de leur faible réactivité photochimique. L'acétone, le PERC et plusieurs CFC, hydrofluorocarbones (HFC) et HCFC se retrouvent dans cette liste d'exclusions. Notons également que certaines substances listées comme n'étant pas des COV, notamment les CFC, sont désormais interdites afin de protéger la couche d'ozone stratosphérique (Gouvernement du Canada, 2018d).

La norme UL 2768 liste plusieurs substances qui ne doivent pas être utilisées pour la formulation des revêtements, dont les composés aromatiques, les composés halogénés, le 2-butoxyéthanol ou encore la 2-butanone (MEK). À noter, que les revêtements pour le bâtiment certifiés ECOLOGO doivent aussi avoir un point d'éclair de 61°C ou plus et des concentrations en COV inférieures aux valeurs limites repères indiquées dans la norme UL 2768 (p. ex. : ≤ 250g/L pour un vernis) (UL, 2011e).

4.3.1.4 Safer Choice Label

L'étiquette *Safer Choice* (anciennement connue sous le nom de « Design for the Environment » ou DfE) s'adresse directement aux consommateurs afin de les orienter dans des choix de produits de consommation (p. ex. : nettoyeurs) moins dangereux pour la santé et l'environnement⁴⁸. Les manufacturiers qui souhaitent utiliser cette étiquette doivent être évalués par une tierce partie (U.S. EPA, 2015).

Le programme d'écoétiquetage *Safer Choice* de l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (U.S. EPA) propose notamment une série de critères d'évaluation des dangers pour choisir des solvants plus sûrs (U.S. EPA, 2009) : cancérogénicité, toxicité aiguë, reprotoxicité, toxicité sur le développement, toxicité subchronique, neurotoxicité, devenir environnemental, écotoxicité. Le cycle de vie d'un solvant et sa renouvelabilité ne font pas partie des critères retenus.

Le site Web⁴⁹ de l'organisme publie une liste de 72 solvants considérés plus ou moins verts en les classant dans l'une des quatre catégories suivantes :

- 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;

⁴⁸ <https://www.epa.gov/saferchoice/learn-about-safer-choice-label>

⁴⁹ <https://www.epa.gov/saferchoice/safer-ingredients> (cliquer sur l'élément *Solvents* dans la liste)

- 4- **Carré gris** : la substance est inacceptable comme ingrédient dans une préparation visant l'agrément du programme *Safer Choice*.

Le d-limonène et le propylène glycol y sont identifiés comme des substances présentant certains dangers (triangle jaune) alors que des solvants comme les esters méthyliques d'huile de soja et l'huile de paraffine sont identifiés comme des solvants peu préoccupants (cercle vert).

4.3.1.5 BioPreferred

Le ministère de l'agriculture états-unien (U.S. DA) a mis en place une norme, connue sous le nom de *BioPreferred*⁵⁰, ayant pour but d'augmenter l'utilisation de produits biosourcés par un programme d'identification volontaire de ceux-ci par les manufacturiers et de réduire la dépendance de la population au pétrole. Il existe en effet une liste de 109 catégories de produits, pour lesquelles une composition minimale en produits biosourcés est indiquée sur leur étiquette. D'une part, les agences fédérales et leurs sous-traitants ont l'obligation de s'alimenter en produits qui respectent ce contenu. D'autre part, cela permet aux consommateurs de repérer, à l'aide d'une étiquette, les produits reconnus par ce programme du U.S. DA, qui joue un rôle de tierce partie.

Le contenu en produits biosourcés est calculé en accord avec la norme ASTM D6866 (ASTM, 2016, essais de contenus d'origine biologique) en tenant compte uniquement de la composition en carbone organique, c.-à-d. en faisant le ratio du carbone organique « récent » au carbone organique total (incluant le « vieux » carbone organique qui est directement associé aux dérivés du pétrole ou du charbon, p. ex.). Le carbone organique « récent » est quant à lui associé à des matériaux renouvelables issus de la biomasse. Le minimum de contenu en produits biosourcés varie de 7 % (tapis) à 97 % (désodorisant et purificateur d'air) selon la catégorie de produits (U.S. DA, 2018).

4.3.2 Certifications européennes

Bien que des normes européennes existent dans le cadre de la composition ou de l'origine de divers produits de consommation et qu'elles soient encadrées par certaines réglementations, aucune définition normalisée n'existe pour le terme « solvant vert ». Ces normes tentent plutôt de normaliser ce qui est défini par « substances présentes dans la nature » dans le Règlement REACH (*Registration, Evaluation and Authorization of CHemicals*) (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2006).

4.3.2.1 Ecolabel

La certification européenne EU Ecolabel⁵¹ est encadrée par le Règlement (CE) N° 66/2010 du parlement européen et du conseil du 25 novembre 2009, établissant le label écologique de l'UE (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2010b), qui s'inscrit dans le cadre de la politique de la Communauté en matière de consommation et de production durables (Amanatidis, 2018). L'Ecolabel respecte la norme ISO 14024.

⁵⁰ <https://www.biopreferred.gov/BioPreferred/>

⁵¹ http://ec.europa.eu/environment/ecolabel/index_en.htm

La certification vise les biens de consommation courante pour individus ou entreprises, dont les critères sont établis par catégorie de produits (nettoyants, lubrifiants, etc.). De manière générale, les critères tiennent compte du cycle de vie complet des produits et donc de leur incidence sur les changements climatiques, sur la nature et la biodiversité, sur la consommation d'énergie et de ressources, sur la production de déchets, sur les émissions dans l'environnement, sur la pollution et sur l'utilisation et le rejet de substances dangereuses. L'UE établit par la suite des critères spécifiques du label écologique par groupe de produits. Ainsi, la Décision de la commission du 28 mai 2014 établit les critères écologiques pour l'attribution du label écologique de l'Union européenne aux peintures et aux vernis d'intérieur ou d'extérieur (Commission européenne, 2014).

Parmi ces critères figurent la teneur en COV et en composés organiques semi-volatils (COSV). Des restrictions des substances et mélanges dangereux se basent sur les mentions de danger et phrases de risque du SGH et sur des restrictions applicables aux substances extrêmement préoccupantes qui répondent aux critères énoncés à l'article 57 du règlement REACH (p. ex. : les substances cancérigènes de catégorie 1 ou 2 ou encore les substances toxiques pour la reproduction, de catégorie 1 ou 2) sont aussi indiquées. « Le produit fini, y compris tous les ingrédients ajoutés volontairement, présents en concentration supérieure à 0,01 %, ne doit pas, sauf dérogation expresse indiquée à l'appendice, contenir de substances ou de mélanges classés toxiques, dangereux pour l'environnement, sensibilisants respiratoires ou cutanés, cancérigènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction conformément au règlement REACH ou à la directive 67/548/CEE [...] » (Commission européenne, 2014).

Ainsi, une préparation commerciale contenant une concentration égale ou supérieure à 0,01 % en poids de d-limonène n'obtiendrait pas la certification puisque ce solvant peut provoquer une allergie cutanée (mention de danger H317; phrase de risque R43). Selon la même règle, une préparation contenant le solvant N-méthyl-2-pyrrolidone (NMP) identifié comme une substance pouvant nuire au fœtus (mention de danger H360D; phrase de risque R61) serait exclue de la certification.

4.3.2.2 Nordic Ecolabelling⁵²

Les critères associés aux différents produits auxquels les étiquettes *Nordic Ecolabelling* sont apposées tiennent compte de l'ACV. En effet, de manière générale, les exigences en matière environnementale couvrent tant les produits utilisés et leur toxicité que leur biodégradabilité, alors que certaines exigences sont également précisées quant au type d'emballage utilisé. Plus précisément, des limites de contenu ou d'émission de COV sont parfois précisées, alors que l'ajout intentionnel de certains produits est interdit. Il s'agit de substances organiques halogénées ou de perturbateurs endocriniens potentiels de catégorie 1 et 2 sur la liste européenne des substances prioritaires à étudier pour leurs effets sur le système endocrinien (Nordic Ecolabelling, 2018). Ces exigences particulières réfèrent parfois même à des exigences réglementaires telles que REACH (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2006) et le CLP (*Classification, Labelling, Packaging*) (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2008), en ce qui a trait au classement des substances toxiques p. ex., ou à certaines directives ou règlements concernant des substances toxiques spécifiques (Conseil de l'Union européenne, 1999; Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2004) ou la mise en marché de certains produits (Conseil de l'Union européenne, 2012).

⁵² <http://www.nordic-ecolabel.org/>

À titre d'exemple, certaines fiches *Nordic Ecolabelling* sont spécifiques aux nettoyeurs et dégraissants industriels (*Nordic Ecolabelling*, 2016) ainsi qu'aux peintures et vernis intérieurs (*Nordic Ecolabelling*, 2015).

4.3.2.3 Solvants biosourcés

Bien que le terme biosourcé ne soit pas spécifique aux solvants, la norme EN 16766:2017 s'applique spécifiquement et exclusivement aux solvants. Cette norme européenne, adoptée le 6 septembre 2017 par le Comité européen de normalisation (CEN) et dont la révision est prévue en novembre 2022, exige la caractérisation de plusieurs éléments (CEN, 2017). Parmi ceux-ci, la performance d'un solvant s'y trouve et elle se réfère à plusieurs caractéristiques techniques : composition chimique, pouvoir de dissolution, caractéristiques de distillation, taux d'évaporation, couleur, masse volumique et viscosité cinétique. Les méthodes de caractérisation et la température à laquelle celles-ci ont été effectuées doivent être fournies pour chaque caractéristique technique. Les autres éléments qui doivent être identifiés sont : les informations générales sur l'usage des solvants, certaines exigences en matière de santé, de sécurité et d'environnement, la teneur biosourcée et la durabilité. Cette dernière inclut, lorsqu'applicable, la norme selon laquelle l'ACV doit être effectuée.

La teneur biosourcée s'exprime de deux façons. La première est la teneur en carbone biosourcé obtenue par la méthode de mesurage du carbone 14 (^{14}C) alors que la seconde est la teneur biosourcée obtenue soit par une analyse au radiocarbone et une analyse élémentaire ou à partir d'un bilan-matières, chacune déterminée selon d'autres normes spécifiques du CEN. Les deux s'expriment en % (m/m) et les 3 seuils identifiés (≥ 95 , ≥ 50 , ≥ 25) mènent à l'identification de 3 classes de solvants biosourcés (A, B, et C) qui elles, sont basées sur la classification correspondant à la plus faible teneur, soit la teneur biosourcée ou la teneur en carbone biosourcé. Une reproduction du tableau des classes de solvants biosourcés apparaît dans le Tableau 5.

Tableau 5. Classes de solvants biosourcés (CEN, 2017)

Classe de solvants biosourcés	Teneur en carbone biosourcé % (m/m)	Teneur biosourcée % (m/m)	Commentaire
A	≥ 95	≥ 95	Applicable pour les solvants lorsque la totalité des matières premières peut être considérée comme biosourcée
B	≥ 50	≥ 50	Applicable pour les solvants lorsque la majeure partie des matières premières peut être considérée comme biosourcée
C	≥ 25	≥ 25	Applicable pour les solvants lorsqu'une faible partie des matières premières est biosourcée

Pour permettre une harmonisation avec d'autres produits biosourcés et pour être en phase avec d'autres juridictions (p. ex. : U.S. DA), un seuil minimal de teneur en carbone biosourcé de 25 % a été fixé alors qu'à l'autre extrémité, un seuil maximal de 95 % a été fixé en raison des capacités de reproductibilité des méthodes d'essai (un solvant biosourcé à 100 % n'est pas

réaliste). Le contenant d'un solvant biosourcé doit également porter une étiquette indiquant sa classe (CEN, 2017).

4.4 Réglementation

Il n'existe pas de réglementation ou d'élément de règlement qui s'appliquerait spécifiquement aux solvants verts. En fait, tous les règlements concernant les substances chimiques s'appliquent en théorie aux solvants verts tout comme ils s'appliquent aux solvants en général. Seules quelques réglementations qui pourraient favoriser la substitution des solvants classiques, ou en limiter l'utilisation au profit des solvants de remplacement, sont présentées dans les prochaines sections.

4.4.1 Canada

L'article 10.16 du *Règlement canadien sur la santé et la sécurité au travail* concerne la substitution de substances pour les entreprises sous juridiction fédérale (Gouvernement du Canada, 2018c). 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 ».

L'annexe 1 de la LCPE donne la liste des substances toxiques, c.-à-d. celles qui sont susceptibles d'avoir un effet nocif sur l'environnement ou sur la diversité biologique, de mettre en danger l'environnement essentiel à la vie ou de constituer un danger pour la vie ou la santé humaine (article 64) (Gouvernement du Canada, 2018b). Cette liste comprend notamment des solvants tels que le benzène, le 2-butoxyéthanol et le DCM. La liste comprend aussi les composés organiques volatils (COV), c.-à-d. les substances participant à des réactions photochimiques atmosphériques à l'exclusion d'une série de substances volatiles dont les réactions photochimiques sont considérées comme faibles (ECCC, 2017). La grande majorité des solvants organiques sont des COV. La liste d'exclusion des COV de la LCPE comprend des solvants possédant certaines caractéristiques vertes (voir section 4.2.10) tels que le carbonate de propylène et le carbonate de diméthyle (Vriet et Mouloungui, 2008).

La LCPE (articles 57 à 60) permet notamment d'exiger des *Plans de prévention de la pollution* aux émetteurs de substances toxiques au Canada (Gouvernement du Canada, 2018b). À titre d'exemple, le DCM a fait l'objet d'une telle exigence en 2003 pour certaines utilisations telles que le décapage d'aéronefs et le nettoyage industriel (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. Le but du gouvernement était de réduire de 85 % les émissions de DCM dans l'environnement au 1^{er} janvier 2007.

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).

Divers règlements ont été promulgués en vertu de la LCPE afin de réduire l'impact des substances toxiques sur l'environnement et la santé. Le Tableau 6 présente les règlements concernant spécifiquement certains solvants et les COV.

Tableau 6. Règlements concernant certains solvants et les COV en vertu de la LCPE

Règlements issus de la LCPE	Objet
Règlement sur les solvants de dégraissage (Gouvernement du Canada, 2018i)	Le règlement limite et encadre l'utilisation du TCE et du PERC
Règlement sur le 2-butoxyéthanol (Gouvernement du Canada, 2018g)	Le règlement limite la concentration de 2-butoxyéthanol dans divers nettoyeurs, décapants, détachants, diluants et peintures utilisables à l'intérieur
Règlement sur le tétrachloroéthylène (utilisation pour le nettoyage à sec et rapports) (Gouvernement du Canada, 2018h)	Le règlement encadre l'importation, le recyclage, la vente et l'utilisation du PERC
Règlement fédéral sur les halocarbures (2003) (Gouvernement du Canada, 2018d)	Sauf par l'obtention d'un permis, le règlement interdit l'utilisation de plusieurs halocarbures comme solvants
Règlement sur les substances appauvrissant la couche d'ozone et les halocarbures de remplacement (Gouvernement du Canada, 2018j)	Le règlement met en application au Canada le Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrissent la couche d'ozone, ce qui implique p. ex. : l'interdiction d'utiliser le trichlorotrifluoroéthane (CFC-113)
Règlement limitant la concentration en composés organiques volatils (COV) des revêtements architecturaux (Gouvernement du Canada, 2018f)	Le règlement fixe les concentrations maximales de COV pour 53 catégories de revêtements architecturaux tels que les peintures, teintures et scellants
Règlement limitant la concentration en composés organiques volatils (COV) des produits de finition automobile (Gouvernement du Canada, 2018e)	Le règlement fixe les concentrations maximales de COV pour 14 catégories de produits de finition automobile incluant les apprêts, revêtements et nettoyeurs

4.4.2 Québec

L'article 39 du RSST réfère au principe de réduction à la source et de substitution. En effet, « les matières dangereuses qui sont sources de gaz, de fumées, de vapeurs, de poussières ou de brouillards doivent être remplacées par des matières qui ne le sont pas ou, encore, qui le sont moins » (Gouvernement du Québec, 2017).

Le Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère (RAA) (Gouvernement du Québec, 2018c), pris en vertu de la *Loi sur la qualité de l'environnement* (Gouvernement du Québec, 2018a), 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), p. ex. : l'acétate de méthyle, le DCM et le PCBTF. Les articles 19 à 43 visent spécifiquement les solvants organiques utilisés dans les activités telles que la fabrication et l'application des peintures et l'imprimerie.

Comme norme générale, le RAA limite les émissions atmosphériques de solvants organiques d'une installation donnée à 100 kg par jour. Cependant les émissions de COV peuvent excéder

cette limite si la source d'émission comporte un système permettant de réduire quotidiennement ≥ 90 % des COV émis (article 19). Cette dernière disposition comporte des exceptions. À titre d'exemple, les imprimeries offset sans séchage à chaud de l'encre peuvent excéder la limite de 100 kg par jour dans le cas où leur émission de COV est réduite de ≥ 70 % (article 26).

Le RAA limite les émissions atmosphériques à 15 kg de COV par jour pour les établissements où l'on applique des peintures (article 27). Cette disposition comporte de nombreuses exceptions en fonction du secteur industriel considéré. Ainsi, pour l'application de peintures sur des meubles en bois, la limite prescrite à l'article 27 peut être excédée si l'entreprise utilise certains types de revêtements, p. ex. : une couche de finition laquée dont la teneur maximale en COV est fixée à 780 g/L de produit appliqué (article 32).

Pour les entreprises de nettoyage à sec utilisant du PERC, les émissions de COV sont limitées à 20 kg sur 1000 kg de textile nettoyé alors que pour celles utilisant des coupes pétrolières, la limite est fixée à 65 kg de COV sur 1000 kg de textile nettoyé (articles 41 et 42).

4.4.3 Ontario

Le *Règlement de l'Ontario 455/09* (Government of Ontario, 2018), pris en application de la *Loi de 2009 sur la réduction des toxiques* (Gouvernement de l'Ontario, 2018), exige des propriétaires et des exploitants des installations visées à, notamment, quantifier les substances toxiques qu'ils utilisent ou génèrent et à préparer des plans comprenant des avenues pour la réduction de l'utilisation de ces substances. La substitution peut faire partie des plans exigés par le règlement comme moyen de réduire l'utilisation et la création des substances toxiques (article 17). Les installations visées par le règlement sont celles qui doivent fournir des données au Gouvernement du Canada en vertu de *l'Inventaire national des rejets de polluants* (INRP) de la LCPE. Les COV, comme classe de substances de l'INRP, sont cependant exclus du règlement ontarien. Les substances visées par ce dernier incluent notamment des solvants aliphatiques comme le n-hexane, aromatiques comme le toluène et chlorés comme le TCE. Afin d'aider les entreprises à évaluer des substances chimiques moins dangereuses pour la santé et l'environnement, le Gouvernement de l'Ontario a publié une monographie sur le sujet (MECC, 2012). Le 18 avril 2019, le Gouvernement de l'Ontario a décidé d'abroger la Loi de 2009 sur la réduction des toxiques et de tous ses règlements connexes le 31 décembre 2021 (Gouvernement de l'Ontario, 2019).

4.4.4 États-Unis

La réglementation fédérale des États-Unis (chapitre 1, 40 *Code of Federal Regulations* (CFR)) traite du *Clean Air Act* qui régleme les émissions atmosphériques de produits chimiques (*Government of the United States*, 2001f). Cette loi autorise l'U.S. EPA à établir des normes nationales de qualité de l'air ambiant (*National Ambient Air Quality Standards*; NAAQS), des normes nationales d'émission pour les polluants atmosphériques dangereux (*National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants*; NESHAP) ou encore des normes nationales d'émissions de COV qui peuvent être spécifiques à des types d'industrie (p. ex. : produits de finition pour réparation automobile (*Government of the United States*, 2001a, 2001b) ou imprimerie (*Government of the United States*, 2001e)) ou à des catégories de produits (p. ex. : nettoyants aux solvants halogénés (*Government of the United States*, 2001d)). La réglementation 40 CFR indique aussi les limites de concentrations de COV dans différentes préparations (p. ex. : produits de consommation (*Government of the United States*, 2001c)).

La section 51.100 de la réglementation 40 CFR définit les COV comme des substances participant à des réactions photochimiques atmosphériques à l'exclusion d'une série de substances volatiles dont les réactions photochimiques sont considérées comme faibles (*Government of the United States*, 2001f). Cette définition se retrouve aussi dans les certifications nord-américaines ECOLOGO (p. ex. : UL 2801 (UL, 2012a) et UL 2767 (UL, 2011b)). La méthode d'estimation du potentiel de formation d'ozone troposphérique appelée *Maximum Incremental Reactivity* (MIR, réactivité différentielle maximale) a été introduite dans certaines réglementations, notamment en Californie⁵³. Le MIR s'exprime en g O₃/g COV. Le MIR permet de radier de la liste des solvants comme l'acétone ou le DCM en raison de leur faible potentiel de réactivité photochimique.

Le *Toxics Use Reduction Act* (TURA) de l'État du Massachusetts⁵⁴ possède un programme d'accompagnement des entreprises utilisant des produits chimiques présentant des dangers pour les travailleurs et l'environnement. Les compagnies doivent produire un document, le « TUR plan »⁵⁵, qui rapporte notamment les paramètres d'utilisation de la substance toxique ainsi qu'un programme détaillé des options de remplacement disponibles avec un échéancier de mise en œuvre. Le TURA prévoit aussi un accompagnement des compagnies par l'intermédiaire du *Toxics Use Reduction Institute* (TURI) en offrant de la formation spécialisée. De nombreux solvants appartenant à différentes familles chimiques sont listés dans le TURA comme le 1-bromopropane, le TCE et le DMF, identifiés comme des substances hautement toxiques (*DEP*, 2019).

La Californie se distingue aussi parmi les États américains de par ses règlements favorisant le remplacement des substances chimiques traditionnelles, incluant des solvants, par des options de remplacement plus vertes. Le département 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 diméthylque comme une option de remplacement qualifiée de « verte ».

4.4.5 Europe

Le règlement REACH, officiellement connu sous le nom de Règlement (CE) No 1907/2006 et en vigueur depuis le 1^{er} juin 2007, concerne l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2006). Il institue également une agence européenne des produits chimiques et précise la responsabilité des fabricants, importateurs et utilisateurs des différentes substances mises sur le marché ou utilisées. L'agence centralise les informations physicochimiques, toxicologiques et les propriétés écotoxicologiques de ces substances. De plus, REACH impose la substitution des substances hautement préoccupantes (les substances cancérigènes, 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. En fait, l'étape d'autorisation des substances

⁵³ <https://www.arb.ca.gov/regact/conspro/aerocoat/aerocoat.htm>

⁵⁴ <https://malegislature.gov/Laws/GeneralLaws/PartI/TitleII/Chapter21I>

⁵⁵ https://www.turi.org/Our_Work/Training/Toxics_Use_Reduction_Planning/Developing_TUR_Plans

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 travailleurs contre les risques liés à l'exposition à des agents cancérigènes 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 (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2004).

En ce qui concerne les COV, l'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). D'autres définitions existent en Europe, mais pour des cas particuliers (Commission européenne, 2014).

4.5 Substitution, méthodologies et outils pour le choix d'un solvant vert

Des chercheurs de l'Université de Montréal ont publié en 2008 une revue de la littérature concernant une quarantaine d'outils et sources d'information pour réaliser des projets de substitution de substances toxiques (Diallo, F., Bégin, Debia et Gérin, 2008). Par la suite, d'autres auteurs ont publié des revues semblables couvrant le plus souvent les mêmes outils et sources d'information (Jacobs, Malloy, Tickner et Edwards, 2016; Kuczynski et Geyer, 2010; OECD, 2013; Whittaker et Heine, 2013). Divers organismes ont aussi publié des procédures et démarches de substitution visant les substances chimiques dangereuses (Gilbert *et al.*, 2012; INERIS, 2017; Lavoie E.T. *et al.*, 2010; NRC, 2014; OSHA, 2013; Reihlen, Bunke, Gruhlke, Groß et Blum, 2016). Ces outils, procédures et démarches s'appliquent aux substances chimiques en général et pas uniquement aux solvants. Ils incorporent, à divers degrés dans leur analyse de substitution, des aspects qui doivent être pris en compte pour juger de la vertitude d'une substance, p. ex. : son devenir environnemental et son écotoxicité. Il existe des guides, méthodologies et outils conçus spécifiquement pour s'attaquer à la problématique du remplacement des solvants, proposant notamment des solvants verts substitutifs. Le site Web Solub⁵⁶, constitue l'un de ces outils proposant une démarche en neuf étapes pour réaliser un projet de substitution des solvants (Blanchet, 2016; Gérin, Bégin, d'Amours et Savoie, 2012; Thivierge, 2012). Une sélection d'outils est présentée ci-dessous. Certains sont généraux alors que d'autres ne s'appliquent qu'à certains domaines.

4.5.1 Outils s'appliquant à toutes les substances

4.5.1.1 P2OASys

Bégin *et al.* (2008) ont décrit les caractéristiques et fonctions du fichier de tableur P2OASys (*Pollution Prevention Option Analysis System*) produit par le TURI (Bégin *et al.*, 2008). Cet outil sert à comparer des substances chimiques pures ou des mélanges des points de vue environnemental et sanitaire. P2OASys est maintenant utilisable en ligne⁵⁷. En outre, l'outil contient désormais une base de données alimentée par le personnel du TURI. Cette base de

⁵⁶ <https://www.irsst.qc.ca/solub/>

⁵⁷ <https://p2oasys.turi.org>

données contient notamment des solvants traditionnels, p. ex. : le DCM et le n-hexane, des solvants verts, p. ex. : le laurate de méthyle et l' α -terpinéol ainsi que des mélanges commerciaux de solvants. Pour chacune de ces substances, la base de données renvoie les valeurs des paramètres utilisés dans le tableur P2OASys. Pour comparer un solvant ou une préparation commerciale qui est absent de la base de données, l'internaute doit saisir les valeurs des paramètres demandés pour l'évaluation à partir de sa FDS, de sa fiche technique ou de sources externes indiquées par le tableur P2OASys.

4.5.1.2 Design for the Environment (DfE)

En 1991, l'U.S. EPA créait son programme *Design for the Environment*⁵⁸ (DfE), maintenant intégré au programme *Safer Choice* (voir la section 4.3.1.4). Dans le cadre du DfE, l'agence publiait cinq ans plus tard une méthodologie détaillée pour comparer les risques environnementaux et sanitaires, la performance, les coûts et la conservation des ressources en ce qui concerne les solutions de rechange aux substances chimiques utilisées par secteur industriel (Kincaid, Meline et Davis, 1996). Par la suite, l'U.S. EPA publiait des analyses de substitution avec cette méthode pour plusieurs secteurs industriels incluant des procédés mettant en œuvre des solvants tels que l'impression offset (U.S. EPA, 1997) et le nettoyage à sec (U.S. EPA, 1998).

4.5.2 Outils spécialisés pour les solvants

4.5.2.1 Vapour Hazard Ratio (VHR)

Le rapport de danger de vapeur (*Vapour Hazard Ratio*, VHR) est une méthode simple de comparaison des solvants. Puisque les solvants ont des volatilités différentes, il n'est pas possible de comparer directement leur VLE. Le VHR permet cette comparaison en corrigeant pour la volatilité des solvants. Il se définit par l'équation suivante :

$$VHR = \frac{C_{sat}}{VLE}$$

où

C_{sat} = concentration de vapeur saturante en parties par million (ppm)

VLE = valeur limite réglementaire, p. ex. : celles du RSST (Gouvernement du Québec, 2017) ou basée uniquement sur des critères sanitaires, p. ex. : les TLV de l'ACGIH (ACGIH, 2018), en ppm

et

$$C_{sat} = \frac{P}{P_{atm}} \cdot 10^6$$

⁵⁸ Cette expression peut être traduite par le terme écoconception, c.-à-d. « Conception de produits ou de procédés caractérisée par la préoccupation de réduire les atteintes négatives à l'environnement tout au long de leur cycle de vie » (http://www.granddictionnaire.com/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=2068587).

où

P = pression de vapeur du solvant à une température donnée, p. ex. : 25 °C

P_{atm} = pression atmosphérique à la même température

Il est possible de calculer des VHR pour des mélanges de solvants en pondérant par la fraction molaire, ce qui donne l'équation suivante :

$$VHR_m = \sum_{i=1}^n \frac{x_i C_{sat}}{VLE_i}$$

où

VHR_m = VHR du mélange m

i = solvant i

n = nombre de solvants dans le mélange m

x_i = fraction molaire du solvant i (le rapport du nombre de moles du solvant i au nombre total de moles du mélange m)

VLE_i = valeur limite du solvant i

Les masses moléculaires et les pressions de vapeur des solvants nécessaires aux calculs peuvent être trouvées dans des banques de données telles que le Répertoire toxicologique⁵⁹.

L'utilisation du VHR est illustrée dans une étude de cas de substitution de solvant pour le nettoyage de disjoncteurs haute tension (Debia, Bégin et Gérin, 2008).

4.5.2.2 PARIS III

Bégin *et al.* (2008) ont résumé la littérature décrivant le logiciel PARIS II (*Program for Assisting the Replacement of Industrial Solvents*) développé par l'U.S. EPA (Bégin *et al.*, 2008). Cette version du logiciel n'était pas commercialement disponible à l'époque (2008). Il semblait toutefois prometteur en comprenant à la fois un module pour identifier un solvant substitutif possédant une performance technique proche du solvant à remplacer et des routines calculant des indices permettant de comparer les solvants quant à leurs impacts sur l'environnement et la santé (Bégin *et al.*, 2008). Debia, Bégin et Gérin (2011) ont étudié l'« indice air » de PARIS II, mesurant l'impact potentiel des solvants sur la santé humaine et l'environnement en raison de leur présence dans l'air. Ils critiquent le fait que cet indice ne prend en compte que la valeur limite d'exposition (VLE) et la DL₅₀ d'un solvant pour l'évaluation de son impact sanitaire par inhalation (Debia *et al.*, 2011).

La dernière version du logiciel (PARIS III) est parue en 2014. PARIS III utilise la même stratégie de calcul pour identifier les solvants substitutifs et les mêmes algorithmes pour générer les indices d'impacts environnementaux et sanitaires des solvants que la version précédente. Alors que la base de données de PARIS II contenait 1685 substances (Bégin *et al.*, 2008), PARIS III

⁵⁹ <http://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/pages/repertoire-toxicologique.aspx>

en contient 4000 (U.S. EPA, 2014). PARIS III est téléchargeable gratuitement à partir du site Web de l'U.S. EPA⁶⁰.

4.5.2.3 Hansen Solubility Parameters in Practice (HSPiP)

Le paramètre de solubilité (δ) est une mesure des forces d'attraction entre les molécules d'une substance. Il est défini par l'équation suivante, où ΔE est l'énergie molaire de vaporisation et V est le volume molaire (Gamsjäger, Lorimer, Scharlin et Shaw, 2008) :

$$\delta = \left(\frac{\Delta E}{V}\right)^{1/2}$$

Considérant que l'énergie de vaporisation, c.-à-d. l'énergie cohésive totale est la résultante de trois composantes, énergie de dispersion, énergie polaire et énergie par liaison hydrogène, Hansen a proposé l'équation suivante définissant le paramètre de solubilité total (δ_t) (Hansen, 1969) :

$$\delta_t = (\delta_d^2 + \delta_p^2 + \delta_h^2)^{1/2}$$

où :

δ_d^2 = composante résultant des forces de dispersion

δ_p^2 = composante résultant des forces polaires

δ_h^2 = composante résultant des liaisons hydrogène

Un solvant dissout bien un soluté lorsque leurs paramètres de solubilité sont identiques ou très proches. Les paramètres de solubilité ont de nombreuses applications, notamment pour la formulation des peintures et des nettoyants et en substitution des solvants (Hansen, 2007). L'utilisation des paramètres de solubilité de Hansen est facilitée par le logiciel HSPiP⁶¹. Morose, Marshall, McCarthy, Harripersaud et Giarrosso (2017) ont utilisé cet outil pour identifier rapidement des solvants performants et moins toxiques pour remplacer le DCM et la NMP dans les décapants à peinture (Morose *et al.*, 2017). En substitution des solvants, HSPiP est essentiellement un outil permettant d'étudier les qualités techniques des solvants, particulièrement leur pouvoir de solubilisation. L'utilisateur doit se tourner vers d'autres sources d'information ou d'autres outils pour étudier les propriétés environnementales et sanitaires des solvants.

⁶⁰ <https://www.epa.gov/chemical-research/program-assisting-replacement-industrial-solvents-paris-iii>

⁶¹ <https://www.pirika.com/ENG/HSP/E-Book/index.html>
<https://www.hansen-solubility.com/HSPiP/>

4.5.3 Outils spécifiques à certaines branches économiques

4.5.3.1 Industrie pharmaceutique

Motivé par le volume important de solvants utilisés, l'un des secteurs industriels le plus florissants en substitution des solvants depuis les années 1990 est celui de la synthèse des principes actifs des produits pharmaceutiques. Plusieurs travaux ont en effet été publiés, s'adressant d'abord aux chimistes et ingénieurs-chimistes de cette industrie. Les guides se présentent sous la forme de tableaux en couleur présentant des matrices où le premier axe est constitué d'une liste de solvants classés par famille et le deuxième axe liste les critères considérés dans le choix d'un solvant. À l'intersection d'un solvant et d'un critère se trouve une couleur, p. ex. : vert pour solvant recommandé, jaune pour solvant utilisable, mais préoccupant et rouge pour solvant à éviter, et parfois un score sur une échelle de 1 à 10, allant du meilleur au pire ou l'inverse. Les critères se rapportent à la sécurité (p. ex. : point d'éclair, propension à la formation de peroxydes organiques), à la santé (p. ex. : cancérogénicité, reprotoxicité) et à l'environnement (p. ex. : potentiel de formation d'ozone troposphérique, biodégradabilité).

Byrne *et al.* (2016) ont procédé à une analyse critique de neuf guides et outils de sélection des solvants dans l'industrie pharmaceutique : quatre guides produits par des fabricants de produits pharmaceutiques, soit AstraZeneca (Hargreaves et Manley, 2008), GSK (Curzons, Constable et Cunningham, 1999; Henderson *et al.*, 2011; Jiménez-González, Curzons, Constable et Cunningham, 2005), Pfizer (Alfonsi *et al.*, 2008) et Sanofi (Prat *et al.*, 2013), trois guides élaborés par des universitaires, soit ETH Zurich (Capello *et al.*, 2007; Sugiyama, Fischer et Hungerbühler, 2006), Rowan (Slater et Savelski, 2007) et Gdańsk (Tobiszewski, Tsakovski, Simeonov, Namieśnik et Pena-Pereira, 2015), deux guides combinant ceux des fabricants, soit ACS-GCI (ACS, 2011) et CHEM21 (Prat *et al.*, 2016). Les deux outils élaborés par Capello *et al.* (2007) et par Slater et Savelski (2007) ont fait l'objet d'une analyse par Bégin *et al.* (2008). Le lecteur est référé à l'article en accès libre de Byrne *et al.* (2016) et au fichier supplémentaire qui l'accompagne où l'on retrouve les conclusions (codes de couleurs) pour 102 solvants considérés par les guides des fabricants GSK, Pfizer et Sanofi ainsi que les scores de sécurité, santé et environnement pour 52 solvants des guides ACS-GCI, AstraZeneca, CHEM21, GSK et Sanofi. La logique de la détermination des couleurs et des scores n'est pas toujours expliquée pour les guides des fabricants pharmaceutiques (Byrne *et al.*, 2016). Un article publié la même année que celui de Byrne *et al.* (2016) offre cependant une explication complète et détaillée du processus de détermination des couleurs et des scores dans le guide de choix des solvants du fabricant GSK, avec un tableau pour 154 solvants (Alder *et al.*, 2016). Parmi les guides élaborés par les fabricants, celui de GSK est celui qui prend en compte le plus grand nombre de critères de choix incluant un score pour l'ACV des solvants considérés (Alder *et al.*, 2016).

L'une des conclusions de Byrne *et al.* (2016) est qu'il manque cruellement de données toxicologiques et environnementales pour les nouveaux solvants, souvent issus de ressources renouvelables, ce qui a parfois pour conséquence de les faire apparaître négativement dans les guides. Les conclusions peuvent aussi être contradictoires d'un guide à l'autre, les auteurs donnant l'exemple de la MEK qui est recommandée dans le guide de Pfizer, alors que celui de GSK fait ressortir des « problèmes majeurs » pour ce solvant (Byrne *et al.*, 2016). L'évaluation de GSK est cependant moins défavorable dans son guide le plus récent, où la MEK est classée comme un solvant comportant uniquement « certains problèmes connus » (Alder *et al.*, 2016).

Les guides créés pour l'industrie pharmaceutique ont tendance à rétrograder les solvants possédant un point d'ébullition élevé. Cela s'explique par le fait que le solvant doit généralement être évaporé à la fin d'une réaction chimique, d'où l'insistance pour des solvants à faibles points d'ébullition afin de minimiser l'énergie requise pour son élimination par distillation (Byrne *et al.*, 2016).

4.5.3.2 Laboratoires de chimie

Green Alternatives Wizard⁶²

Le *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) offre une application en ligne appelée *Green Alternatives Wizard*⁶². Ce « magicien des solutions de rechange vertes » est une base de données offerte aux chercheurs du MIT pour les aider à remplacer les solvants dangereux dans leurs laboratoires par des produits ou procédés moins dangereux (MIT, 2006). L'internaute peut effectuer sa recherche par solvant à remplacer, par procédé à remplacer ou à modifier, par substance substitutive ou par procédé de rechange. Cet outil est utile pour les laboratoires de recherche en chimie. Il propose certains solvants verts, p. ex. : lactate d'éthyle, soyate de méthyle, CO₂ supercritique, mais également d'autres solvants et des solutions de rechange sans solvant. Les solutions proposées sont accompagnées d'une référence bibliographique permettant au chercheur de documenter la solution identifiée.

Sans être à proprement parler des outils tels que logiciels et banques de données, la littérature scientifique foisonne de documentation, particulièrement dans le domaine des solvants verts utilisables dans les laboratoires de chimie (Clark *et al.*, 2017; de la Guardia et Garrigues, 2012; Jérôme et Luque, 2017; Kerton et Marriott, 2013; Mohammad et Inamuddin, 2012a; Pena-Pereira et Tobiszewski, 2017).

4.5.3.3 Peintures

Des fabricants de solvants proposent des logiciels permettant la reformulation et la substitution des mélanges de solvants utilisés dans les peintures (Beers, Koppes et Rupert, 1998; Ramey, 2006; Wiersma, 2014). Certains fabricants réservent leur outil à leurs clients, comme c'est le cas pour le logiciel Shell BlendPro Live⁶³. Pour sa part, le fabricant Eastman Chemical (Kingsport, TN) propose un outil gratuit en ligne⁶⁴ permettant de comparer une centaine de solvants entre eux et de reformuler les mélanges de solvants. Ces outils permettent uniquement d'obtenir des mélanges de solvants substitutifs ayant une performance proche des solvants à remplacer, p. ex. : un taux d'évaporation donné. L'utilisateur doit utiliser d'autres ressources pour obtenir des données environnementales et sanitaires en rapport avec les solvants.

⁶² Le MIT a récemment retiré cette application de son site Web. Le contenu de la base de données de l'application peut cependant être téléchargé à l'adresse Web suivante :
http://fscimage.fishersci.com/cmsassets/downloads/segment/ScienceEducation/pdf/green_Chemical_CrossRef.pdf

⁶³ <https://blendpro-live.com/>

⁶⁴ http://www.eastman.com/Markets/Coatings/Pages/Formulation_Tools.aspx

Sous l'impulsion de la réglementation environnementale dans diverses juridictions, enjoignant les entreprises à réduire leurs émissions de COV et de HAP⁶⁵, de nombreux articles ont été publiés, démontrant la faisabilité de remplacer les solvants traditionnels par des solvants plus ou moins verts dans les revêtements (Bricout, Chappat, Deneuvillers et Harnois, 2012; Cooper, Galick, Harris, Pourreau et Rodriguez, 2001; Hare, 2000; Hoang *et al.*, 2003; Johansson et Johansson, 2008; Martí, Molina, Alemán et Armelin, 2013; O'Donoghue et Datta, 2009; Ramey, 2006).

4.5.3.4 Nettoyants et dégraissants

Marshall et Wilcox (2015) ont passé en revue les méthodologies d'évaluation de la sécurité, du degré de vertitude et de la performance des produits de nettoyage, incluant les dégraissants. Ils résument les caractéristiques des outils et programmes suivants : P2OASys, *Green Screen*⁶⁶, DfE (maintenant renommé⁶⁷ *Safer Choice*), *Green Seal*. P2OASys, décrit plus haut, ressort comme le plus complet, mais comme *Green Screen*, il n'identifie pas les produits de rechange, tâche qui doit être réalisée préalablement par l'utilisateur de ces deux outils. Les deux autres systèmes sont des programmes d'écoétiquetage déjà décrits dans la section 4.3.

Le SCAQMD (Diamond Bar, CA) publie en ligne une liste de solvants appelée *Certified Clean Air Solvents*⁶⁸, utilisables comme nettoyants ou dégraissants. Ces préparations commerciales ont été testées dans les laboratoires du SCAQMD afin de s'assurer qu'elles respectent les règlements⁶⁹ du sud de la Californie.

⁶⁵ *Hazardous Air Pollutant* : polluant atmosphérique dangereux aux États-Unis en vertu du *Clean Air Act*. Il y avait initialement 188 HAP (<https://www3.epa.gov/ttn/atw/188polls.html>), mais certaines substances ont par la suite été retirées, notamment les solvants butan-2-one et 2-butoxyéthanol.

⁶⁶ Cet outil a fait l'objet d'une revue par Diallo *et al.* (2008).

⁶⁷ <https://www.epa.gov/saferchoice/history-safer-choice-and-design-environment>

⁶⁸ <http://www.aqmd.gov/home/programs/business/business-detail?title=certified-clean-air-solvents&parent=certified-products>

⁶⁹ <http://www.aqmd.gov/home/programs/business/business-detail?title=cas-cert&parent=certification-programs-training>

5. DISCUSSION

5.1 Définition de solvant vert

Les solvants verts constituent un ensemble de substances ne possédant pas de définition généralement acceptée et ne sont associés à aucune liste normalisée. La vertitude reste aussi un concept élastique utilisé autant par les scientifiques pour évaluer le degré de protection de l'environnement offert par un solvant donné que par les fabricants et leur service des ventes et de marketing. L'expression solvant vert est donc équivoque et même galvaudée, en l'absence de définition normalisée. Durif, Boivin et Julien (2010) notent d'ailleurs l'absence de définition d'un produit vert et indiquent que les chercheurs, les industriels et les utilisateurs n'ont pas la même définition d'un produit vert. Toutefois, les solvants verts sont généralement présentés comme des solvants peu dangereux pour la santé, la sécurité et l'environnement, devant être priorités pour le remplacement des solvants traditionnels. Kob (2002) critique le fait que la plupart du temps, les compagnies utilisent des notions vagues, générales pour décrire la vertitude d'un solvant. Il propose d'utiliser des termes plus précis et décrit un solvant vert idéal comme celui qui a une toxicité humaine et aquatique faible, qui est biodégradable et qui ne laisse pas d'empreinte environnementale, qui peut être recyclé ou réutilisé, qui ne contribue pas à la déplétion de la couche d'ozone, qui n'est pas considéré comme un COV, qui a un point d'éclair élevé et qui est produit à partir de matières renouvelables ou dérivé de matières déjà existantes.

Les douze critères, proposés par Gu et Jérôme (2013) et adaptés des douze principes de la chimie verte (voir Tableau 1), fixent les exigences que devrait satisfaire un solvant vert (voir Tableau 3). Le 12^e critère recommande l'utilisation de matières premières renouvelables. Pour déterminer si un solvant donné est vert, il faudrait donc connaître l'origine des matières premières utilisées. Il en découle que les solvants synthétisés à partir de molécules issues du pétrole, du gaz naturel ou de schiste ne devraient pas être favorisés. En accord avec le 10^e critère, un solvant vert devrait aussi être, autant que possible, ininflammable. Il est toutefois pratiquement impossible de satisfaire simultanément tous les critères de Gu et Jérôme (2013). Pour répondre au critère numéro 10, il faudrait un solvant halogéné⁷⁰, qui ne remplirait alors pas forcément les critères de vertitude, car il est souvent toxique et fabriqué à partir de ressources non renouvelables. Il y a ainsi une question de compromis dans le choix des solvants.

Les ACV sont reconnues comme des approches permettant d'évaluer globalement la performance environnementale des solvants. Ces analyses peuvent notamment identifier des points plus préoccupants dans le cycle de vie comme la toxicité des substances pour les travailleurs ou la toxicité environnementale lorsque le polluant est relâché dans l'environnement (Loubet *et al.*, 2017). Les auteurs identifient toutefois plusieurs défis concernant les ACV appliquées aux solvants, en particulier le besoin d'améliorer la cohérence des évaluations environnementales, p. ex. : dans la mise à l'échelle industrielle des données obtenues en laboratoire.

⁷⁰ Gu et Jérôme (2013) utilisent l'expression « should not be flammable » dans le libellé du critère n° 10, ce qui pourrait théoriquement permettre l'utilisation d'un solvant classé comme « liquide combustible » selon la terminologie du SGH, soit un solvant dont le point d'éclair est > 60 °C et ≤ 93 °C (Nations unies, 2017).

De façon plus spécifique, Clark *et al.* (2017) fournissent une liste de 40 solvants biosourcés et une liste de 25 solvants pétrochimiques dans leur livre sur les solvants durables. Pour chacun, des propriétés physicochimiques et les effets sur la santé et sur l'environnement sont rapportés en fonction des 12 critères des solvants verts tels que proposés par Gu et Jérôme (2013). Bégin *et al.* (2002) rapportent les propriétés physicochimiques, les remarques d'hygiène et de sécurité du travail et de l'environnement pour quatorze solvants substitutifs, incluant le lactate d'éthyle, le soya de méthyle et le d-limonène. Bien que décrits comme solvants substitutifs, les auteurs rapportent des effets pour la santé des travailleurs comme des allergies cutanées et de l'hépatotoxicité pour le d-limonène, ainsi que de l'irritation des muqueuses pour le lactate d'éthyle. De la même façon, Clark *et al.* (2017) rapportent que des solvants perçus comme verts, comme l'éthanol et l'acétate d'éthyle, sont en réalité des liquides très inflammables. Au final, ces auteurs mentionnent qu'il est difficile de conclure sur la vertitude ou la durabilité d'un solvant particulier, car cela dépend toujours du contexte d'utilisation de celui-ci.

Le concept de solvants verts est appelé à évoluer. Non seulement la définition change selon le contexte d'utilisation, mais celle-ci pourrait également changer en fonction de l'évolution des connaissances et des technologies disponibles. Un solvant qui serait considéré vert parce qu'il a été fabriqué à partir de ressources renouvelables et non à partir d'hydrocarbures fossiles pourrait être différemment évalué lorsque jugé sous l'angle du développement durable. En effet, le fait d'être produit à partir des mêmes matières que des denrées alimentaires pourrait être jugé problématique, car il ne tient pas compte d'un des piliers fondamentaux du développement durable qu'est l'aspect social. C'est également le cas pour l'aspect économique. En effet, l'une des faiblesses de la notion d'ACV relevée par Clark *et al.* (2017) est que seule la durabilité environnementale est considérée dans le processus.

5.2 Catégories de solvants verts

Malgré la présence significative de quelques solvants verts sur le marché, p. ex. : d-limonène, soya de méthyle, lactate d'éthyle, le développement de cette filière de la chimie verte souffre de la présence prépondérante des solvants organiques d'origine fossile. Marion et Jérôme (2018) proposent deux explications pour cette situation. La première serait l'efficacité et le rendement des procédés développés depuis longtemps par la pétrochimie, le plus souvent moins dispendieux. La deuxième explication, du moins en Europe, viendrait du coût élevé et des délais d'autorisation exigés par la législation REACH. Cela favoriserait la synthèse de molécules existantes à partir de ressources renouvelables (Marion et Jérôme, 2018). Le *Conseil européen des fédérations de l'industrie chimique* a d'ailleurs commandité une étude concernant la synthèse de molécules classiques comme le méthanol, l'éthanol, le benzène, le toluène et les xylènes en substituant le CO₂ au pétrole comme matière première (Bazzanella et Ausfelder, 2017).

Une grande diversité de nouveaux solvants est aussi proposée en remplacement des solvants traditionnels. Des préparations à base d'eau peuvent notamment remplacer des solvants traditionnels. L'Agence européenne pour la sécurité et la santé au travail (EU-OSHA) précise que « les produits à base d'eau sont souvent mis en avant comme une option de remplacement écologique aux peintures, adhésifs, agents imperméabilisants et huiles de décoffrage à base de solvants » dans le but de réduire l'exposition aux COV et, par le fait même, les effets qui y sont associés (EU-OSHA, 2013a). Dans le cas des effets potentiels de dermatose allergique et d'irritation ou de sensibilisation dues à l'utilisation de formulations aqueuses contenant certains produits réactifs, l'EU-OSHA propose de réduire le risque de contact cutané en utilisant des

équipements de protection individuelle adéquats. Malgré ces limites, les préparations aqueuses restent des options de remplacement à favoriser, réduisant à la source les risques associés aux solvants traditionnels (EU-OSHA, 2013b). Cependant, les substitutions aqueuses sont surtout réalisables dans les procédés en circuit ouvert, c.-à-d. là où le solvant doit s'évaporer, alors que ce n'est pas toujours le cas en synthèse chimique.

Des fabricants synthétisent des solvants aromatiques à partir de glucides (Moore, 2015; Virent, 2015); c'est entre autres le cas du xylène. Bien que ces solvants soient produits à partir de ressources renouvelables, leur toxicité reste la même que celle des solvants pétrochimiques correspondants (Virent, 2016). Ces solvants présentent aussi les mêmes propriétés physicochimiques et donc les mêmes risques pour la sécurité des travailleurs, soient les risques d'incendie et d'explosion. Il faut aussi être prudent avec la notion de solvants issus de ressources renouvelables ou solvants biosourcés, car ceux-ci ne le sont pas nécessairement à 100 %. Selon le recensement de Clark *et al.* (2017), 74 % des solvants biosourcés de leur liste sont de catégorie A, 18 % de catégorie B et 8 % de catégorie C (voir Tableau 5).

Il n'est pas possible pour les auteurs de ce rapport de faire des recommandations précises de solvants verts applicables à toutes les situations. En effet, chaque situation exige des compromis, le choix du solvant substitutif se faisant en fonction de nombreux critères relatifs aussi bien à la SST et à l'environnement qu'aux questions techniques, financières et organisationnelles.

5.3 Certifications

Tout d'abord, les normes environnementales comme ECOLOGO et *Green Seal*[®] concernent exclusivement des préparations commerciales (des produits finis qui sont des mélanges) dont certaines peuvent contenir des solvants. En Amérique du Nord, seuls les programmes *Safer Choice* de l'U.S. EPA et *BioPreferred* du U.S. DA évaluent des solvants purs, par opposition à des mélanges. Quoiqu'il en soit, ces diverses certifications visent à assurer une impartialité dans l'évaluation des produits et une garantie de respect de critères minimaux, tout en augmentant la transparence pour les consommateurs. Toutefois, les différentes certifications applicables aux solvants ne visent pas nécessairement le même objectif. L'étiquette verte *Greenguard* se base essentiellement sur le contenu en COV des produits et ne considère pas les dimensions de la SST. Ciblée différemment, la certification *BioPreferred* vise uniquement à garantir un contenu minimal en produits biosourcés. À l'inverse, des certifications comme ECOLOGO, *Green Seal*[®] ou *Safer Choice* considèrent aussi bien des critères de santé, de sécurité que d'environnement. Les deux dernières certifications prennent en compte différents paramètres comme la cancérogénicité (classement du CIRC) ou les substances persistantes, bioaccumulables et toxiques (substances PBT). À noter que les définitions des différents critères ne sont pas toujours les mêmes. Selon *Green Seal*[®], un COV est une substance qui a une pression de vapeur plus grande que 0,1 mmHg (13,3 Pa) à 20 °C et sous une pression atmosphérique de 101,3 kPa (Green Seal, 2017a) alors que pour ECOLOGO, un COV est une substance organique participant à des réactions photochimiques atmosphériques, à l'exception d'une liste de substances dont la réactivité photochimique est jugée négligeable (UL, 2011e).

Les certifications ne sont donc pas toutes équivalentes et dans certains cas, des produits possédant une certification donnée ne pourraient satisfaire aux exigences d'une autre certification. Ainsi, l'adhésif Wilsonart[®] 1700/1701 est certifié *Greenguard* et *Greenguard Gold* (UL, 2010; Wilsonart LLC, 2013). Cet adhésif ne pourrait obtenir la certification ECOLOGO

puisqu'il contient du p-chlorotrifluorométhylbenzène, un solvant aromatique et halogéné ne pouvant se retrouver dans la composition d'un adhésif certifié en vertu de la norme UL 2762 (UL, 2011a). En outre, des produits avec une certification donnée ne sont pas non plus systématiquement sans danger pour les travailleurs. En effet, la FDS du même adhésif indique qu'il a un point d'éclair de 3,3 °C (Wilsonart LLC, 2016), c.-à-d. une préparation très inflammable selon le SGH (Nations unies, 2017).

Également, bien que l'impact environnemental de la plupart des solvants biosourcés soit limité par leur nature biodégradable, sous réserve des quantités étant larguées dans l'environnement, la plupart sont des COV qui, une fois dans l'atmosphère, peuvent contribuer à la production d'ozone troposphérique. Ainsi, ils peuvent entraîner des risques à la santé, particulièrement chez les personnes souffrant d'asthme ou d'insuffisance respiratoire. D'autres risques à la santé, associés à ce type de solvants comme à ceux des solvants pétrochimiques, sont bien connus, p. ex. : conjonctivite, dermite, syndrome ébrieux. Il en est de même pour les risques d'incendie ou d'explosion lorsque l'on pense à l'éthanol ou à certains dérivés terpéniques ou glucidiques, particulièrement lorsqu'ils sont utilisés à chaud (Patrascu, 2012).

Les certifications, notamment *Greenguard et BioPreferred*, ne garantissent donc pas que le produit ou la préparation soit sans danger pour les travailleurs. Pour un usage professionnel au Québec, les produits certifiés *Green Seal*[®], *Safer Choice* ou *ECOLOGO* devraient être privilégiés.

Finalement, puisqu'il n'existe pas de norme au Canada ou au Québec concernant les biosolvants comme celle du Comité européen de normalisation (CEN, 2017), il pourrait être profitable que l'Office des normes générales du Canada⁷¹ ou le Bureau de normalisation du Québec⁷² développent une telle norme. L'existence d'une norme canadienne ou québécoise favoriserait l'utilisation des biosolvants.

5.4 Réglementations

La question environnementale des solvants verts est fortement liée à la notion de COV, notamment pour les fabricants de peintures qui sont assujettis aux règlements limitant les COV dans les peintures architecturales et pour l'automobile. Au Canada, les substances toxiques sont listées dans l'annexe 1 de la LCPE (Gouvernement du Canada, 2018a). La liste comprend les COV, c.-à-d. les substances participant à des réactions photochimiques atmosphériques à l'exclusion d'une série de substances volatiles dont les réactions photochimiques sont considérées comme faibles. Cette façon de définir les COV et de radier de la liste des solvants comme l'acétone, le DCM ou encore le carbonate de propylène en raison de leur faible potentiel de réactivité photochimique est en accord avec la façon de procéder aux États-Unis. En Europe, un COV a une définition différente, c.-à-d. basée sur la pression de vapeur du composé, comme vu à la section 4.4.5. Ainsi, les solvants peuvent être classés différemment selon la réglementation en vigueur. La réglementation de l'Union européenne a pour conséquence de considérer un plus grand nombre de solvants classiques comme des COV, comparativement à la réglementation en vigueur au Canada et aux États-Unis. Cela contribue à leur remplacement par des substances moins volatiles, limitant l'exposition professionnelle par la voie respiratoire. Le contact cutané peut alors devenir la première préoccupation en santé au

⁷¹ <https://www.tpsgc-pwgsc.gc.ca/ongc-cgsb/index-fra.html>

⁷² <https://www.bnq.gc.ca/fr/>

travail comme dans l'exemple de la NMP peu volatile qui avait remplacé le DCM très volatil dans les décapants à peinture avant qu'elle soit reconnue fœtotoxique.

De plus, les concentrations maximales permises de COV dans différents produits sont variables selon les pays ou États. Ainsi, les concentrations maximales de COV dans les peintures architecturales en Californie sont différentes de celles en vigueur au Canada et en Europe. Pour les peintures antirouille dans le sud de la Californie, la limite est fixée à 100 g/L (SCAQMD, 2016) alors qu'au Canada, la limite est fixée à 400 g/L pour ces revêtements (Gouvernement du Canada, 2018f). En outre, sans être une exigence réglementaire, l'attribution du label écologique en Europe pour les peintures architecturales antirouille exige une limite fixée à 80 g/L de COV (Commission européenne, 2014). Les limites plus strictes en COV favorisent l'utilisation de solvants qui ne sont pas des COV, comme l'eau.

Un produit exempt de COV ne garantit pas un caractère ininflammable. Il pourrait p. ex. contenir de l'acétone (exclue de la liste des COV au Canada comme aux États-Unis) et donc avoir un point d'éclair très faible. À l'inverse, de nombreux solvants présentés comme verts sont eux-mêmes des COV par réglementation fédérale, tels le d-limonène et les DBE.

Les solvants qui se retrouvent dans la liste publiée par le gouvernement de la Californie et abordée à la section 4.5.3.4 sont réputés respecter la réglementation environnementale de l'État de la Californie quant à la protection de l'air atmosphérique. Toutefois, il ne faut pas considérer les solvants de cette liste sans danger pour les travailleurs. Les intervenants en hygiène du travail devraient être prudents et ne pas considérer que l'aspect vert, car le fait de respecter la réglementation d'un État américain réputé pour le caractère sévère de sa réglementation environnementale n'empêche pas que l'on puisse se retrouver avec une préparation commerciale potentiellement problématique du point de vue de l'hygiène du travail. Ainsi la préparation aqueuse dégraissante « Americlean 30MPA » qui est listée comme « *Certified Clean Air Solvent* » possède un pH entre 12,5 et 13,0, ce qui en fait un produit corrosif à cause de la présence de méta-silicate de sodium (ARSP, 2016).

Peu d'éléments réglementaires favorisent l'utilisation de solvants verts au Québec, contrairement à des règlements que l'on retrouve dans d'autres provinces ou États comme l'Ontario, le Massachusetts et la Californie. De plus, lorsque la réglementation appuie des organisations d'aide aux entreprises comme le TURI au Massachusetts ou le programme sur les produits de consommation plus sûrs (*Safer Consumer Products*) du *California Department of Toxic Substances Control* (DTSC), ces entreprises ont accès à différentes ressources techniques pour les aider à réaliser des projets de substitution de substances toxiques, incluant les solvants dangereux. Les auteurs du présent rapport recommandent p. ex. au législateur canadien d'interdire l'utilisation du DCM dans les décapants à peinture en modifiant à cet effet le Règlement sur certaines substances toxiques interdites (Gouvernement du Canada, 2019). Une telle prohibition du DCM est en vigueur dans l'UE (Parlement européen et Conseil de l'Union européenne, 2009). Comme dans cette dernière, cette interdiction aurait notamment l'effet d'encourager l'utilisation de solvants moins dangereux et dans certains cas plus verts, tels que les DBE dans les préparations décapantes (Zarogiannis, Nwaogu, Tuffnell et Lucas, 2007). En plus de protéger la santé des travailleurs, cette restriction aurait l'avantage de favoriser la santé publique, car ce genre de préparation est largement utilisé par les consommateurs.

Les auteurs de ce rapport appuient fermement les recommandations du Rapport du Comité permanent de l'environnement et du développement durable de la Chambre des Communes du Canada quant aux modifications à apporter à la LCPE (Schulte, 2017). Ce rapport recommande notamment que les autorités canadiennes « évaluent et gèrent les substances conformément à la LCPE selon une approche fondée sur le cycle de vie ». En outre, le rapport propose l'introduction du principe de substitution dans la LCPE « de manière à imposer l'obligation impérative d'évaluer les solutions de rechange dans le cadre des évaluations préalables des substances existantes ».

5.5 Substitution, méthodologies et outils pour le choix d'un solvant vert

Diverses recherches ont permis de mettre au point des procédures pour la sélection d'un solvant de substitution, notamment une méthode de substitution en 9 étapes (Bégin et Gérin, 2001; Gérin et Bégin, 2002). L'étape de comparaison des options de remplacement doit être effectuée en fonction de plusieurs considérations en lien avec les facteurs de SST, d'environnement, de coûts, de méthodes de travail et de formation des employés (Gérin et Bégin, 2002; Shapiro *et al.*, 1994). Des indices de comparaison, basés sur des paramètres physicochimiques, sanitaires et/ou environnementaux des substances, permettent de guider le choix de solvants.

Le VHR est un indice utilisé dans le domaine de l'hygiène industrielle afin d'évaluer le potentiel de surexposition aux différents solvants (Debia, Bégin et Gérin, 2009). Les limites principales de cet outil résident dans le fait qu'il ne considère que la voie d'inhalation des vapeurs de solvants et ne s'applique qu'aux substances possédant des VLE. De plus, le VHR ne prend pas en compte les effets des solvants sur l'environnement. D'autres outils plus complets, appelés indices globaux de hiérarchisation des dangers et intégrant plusieurs dimensions de la substitution mises en équations paramétriques, ont été identifiés comme pouvant être utiles à un hygiéniste industriel ou à un intervenant en SST qui réalise des projets de substitution de solvants.

Debia *et al.* (2011) rappellent que PARIS II⁷³ a l'avantage d'être un outil qui intègre des paramètres de sécurité tel que le point d'éclair, que des évaluations peuvent être faites pour des mélanges non idéaux et qu'un module technique permet la sélection de solvants de rechange ayant des propriétés physicochimiques comparables et appropriées. De plus, des facteurs de pondération peuvent être appliqués par l'utilisateur pour ajuster l'importance relative des différentes catégories de paramètres. Le logiciel PARIS III est donc un outil d'intérêt pour les intervenants désirant évaluer des indices d'impact environnementaux et sanitaires des solvants. Ce logiciel est aussi favorisé par sa gratuité et sa base de données de 4000 substances.

Les mêmes auteurs considèrent qu'en l'absence de l'utilisation des facteurs de pondération, P2OASys sous-estime certains paramètres associés à la sécurité, comme la tension de vapeur et l'inflammabilité. 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, toujours sans l'utilisation des facteurs de

⁷³ PARIS III utilise la même stratégie de calcul pour identifier les solvants substitutifs et les mêmes algorithmes pour générer les indices d'impacts environnementaux et sanitaires des solvants que la version précédente PARIS II.

pondération. Les auteurs concluent que cet indice, utilisé sans pondération, est donc largement orienté vers la prévention de la pollution.

Les outils comme P2OAsys nécessitent des connaissances avancées et peuvent être chronophages; ils ne sont donc pas facilement utilisables par tous les intervenants en SST. De plus, 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 travailleurs. Par exemple, le remplacement du TCA (substance appauvrissant la couche d'ozone) par le 1-bromopropane était souhaitable selon l'indice de risque de P2OASys (*Debia et al., 2011*). Or, le 1-bromopropane possède un VHR plus de 30 fois supérieur à celui du TCA, entraînant ainsi un potentiel de dépassement de la VLE beaucoup plus élevé et donc, un risque sanitaire plus important. Cette substitution ne serait donc pas souhaitable. Gérin et Bégin (2002) mentionnaient d'ailleurs qu'il faut éviter que la substitution motivée par des considérations environnementales ne se traduise par des effets pervers pour la santé des travailleurs.

Les facteurs considérés dans les outils rejoignent certains des principes de la chimie verte ou encore les critères utilisés dans les certifications comme *Green Seal*[®] et *Safer Choice*. Clarke *et al.* (2018) soutiennent qu'il ne faut pas considérer les douze principes de la chimie verte comme des commandements, mais qu'il faut avoir une approche holistique. Tout est donc une question de compromis entre différentes catégories d'impact lors du choix du meilleur solvant.

5.6 Axes potentiels de recherche et de développement

Des solutions de rechange aux hydrocarbures fossiles existent et des recherches sont en cours afin de favoriser l'utilisation de biosolvants plus durables et respectueux de l'environnement (OECD, 2019). Il y a beaucoup de recherches universitaires publiées et en cours sur l'utilisation des solvants verts en chimie et en génie chimique. Cela inclut notamment leur utilisation dans les réactions chimiques (Augé et Scherrmann, 2016; Cseri, Razali, Pogany et Szekely, 2018; Mohammad et Inamuddin, 2012a), la séparation des produits réactionnels (Pena-Pereira et Tobiszewski, 2017) et l'extraction de molécules d'intérêt à partir de la biomasse (Chemat et Vian, 2014; Koudous, Kunz et Strube, 2015). La plupart de ces processus ont lieu en circuit fermé, exposant généralement peu les travailleurs aux vapeurs des solvants mis en œuvre. Les problèmes de surexposition des travailleurs aux solvants se retrouvent cependant le plus souvent dans les procédés en circuit ouvert tels que l'application des peintures industrielles, le dégraissage des surfaces métalliques et l'industrie de l'imprimerie (Gérin *et al.*, 1995). Il serait donc approprié que les organismes subventionnaires financent de la recherche sur les solvants verts pour ces branches industrielles et procédés, à l'instar des recherches européennes ReSolve⁷⁴ et ECOBIOFOR⁷⁵. ReSolve, piloté par l'Université de York en Angleterre, vise à remplacer la NMP et le toluène par des substances moins dangereuses dérivées des glucides alors qu'ECOBIOFOR a exploré les avenues de la chimie verte pour synthétiser les solvants pétrochimiques les plus utilisés actuellement dans les peintures industrielles. Le projet SolvSafe, antérieur aux deux autres et visant notamment la réduction des émissions de COV, a également débouché sur des avancées dans les domaines du dégraissage de surfaces métalliques et des peintures (Estévez, 2009).

⁷⁴ <http://resolve-bbi.eu/>

⁷⁵ <https://cordis.europa.eu/project/rcn/188526/reporting/en>

La notion de substitution éclairée (*Informed Substitution*), qui renvoie aux besoins de développer des méthodologies de substitution et des outils d'évaluation des options de remplacement, a été proposée (Jacobs *et al.*, 2016). Ces méthodologies doivent éviter de mettre en place des options de remplacement inadéquates pouvant avoir des conséquences sur la santé humaine et sur l'environnement. Jacobs *et al.* (2016) suggèrent que les études de cas sont des outils de la substitution éclairée qui offrent des leçons concrètes en améliorant le processus d'évaluation des options de remplacement.

Au Québec, la filière lignocellulosique pourrait avoir de l'avenir pour la production de divers biosolvants en raison de l'importance des industries forestière et papetière. Mentionnons p. ex. l'existence des bioraffineries de 2^e génération, où les résidus (écorce, copeaux et sciure) pourraient être mieux valorisés plutôt que d'utiliser uniquement cette biomasse comme combustible.

Plusieurs auteurs ont déploré l'absence ou le peu de données environnementales, sanitaires et sécuritaires concernant les solvants verts (Bubalo *et al.*, 2015; Byrne, F. P. *et al.*, 2016; Capello *et al.*, 2007). Clark *et al.* (2017) argumentent pour l'obtention de données complètes en toxicologie des solvants verts en donnant l'exemple de la NMP, d'abord jugée non toxique en vertu d'une DL₅₀ élevée, alors que l'on sait aujourd'hui qu'il s'agit d'une substance toxique pour la reproduction. Jacobs *et al.* (2016) soutiennent qu'il faut encourager la recherche en toxicologie prédictive pour combler les données manquantes. Dans leur pratique, les hygiénistes du travail souffrent souvent de l'absence de VLE pour les nouveaux solvants incluant les solvants verts, malgré l'existence de méthodologies pour dériver de telles valeurs pour les substances peu étudiées (ECETOC, 2006). Il faut donc encourager le développement de méthodologies et surtout d'outils permettant aux intervenants d'apprécier rapidement le risque chimique lié aux nouveaux solvants, qu'ils soient verts ou non.

6. CONCLUSION

La littérature regorge d'exemples de mauvaises substitutions lorsqu'il est question des substances chimiques. Le vaste domaine des solvants organiques n'est pas en reste. L'une des raisons est souvent le manque de données toxicologiques concernant les nouvelles substances, le cas du 1-bromopropane dans les adhésifs pulvérisés étant l'un des plus connus, mais il arrive également que l'on remplace un solvant toxique par un solvant dangereux, le cas du n-hexane dans les nettoyeurs à freins en remplacement du PERC étant également bien documenté (Harrison *et al.*, 2001).

Un solvant vert est en principe une substance qui respecte avant tout l'environnement, mais en pratique, l'humain n'est pas nécessairement protégé : bien qu'il ne soit pas considéré comme un COV dans la réglementation aux États-Unis et au Canada, tout en étant relativement peu toxique, l'acétone est extrêmement inflammable. Pour éviter les transferts de risque de l'environnement vers le milieu de travail et vice versa dans un projet de substitution, il est absolument nécessaire de procéder avec méthode afin de prendre en compte toutes les dimensions de la substitution : SST, environnement, coûts, faisabilité technique, facteurs humains et organisationnels. Cette monographie a tenté de démontrer qu'il faut penser à la dimension de la durabilité des substances et des procédés dans les projets de substitution. Il devient alors encore plus évident que les compromis sont incontournables dans le choix ultime d'une solution de remplacement.

Il n'existe pas d'outil infallible sous la forme de logiciel ou autre pour trouver la meilleure solution de rechange à l'utilisation d'un solvant problématique. Tout solvant, qu'il soit ou non qualifié comme vert doit passer au crible d'une analyse rigoureuse telle que celle de la démarche de substitution en neuf étapes proposée par Gérin et Bégin (2002). L'application systématique d'une telle méthode de prévention est une condition *sine qua non* pour éviter d'aggraver la situation initiale.

Il serait imprudent pour les auteurs de ce rapport de faire des recommandations précises de solvants verts applicables à toutes les situations. Toutefois, certaines catégories de solvants doivent être favorisées comme l'eau, les solvants biosourcés, pour peu que leur innocuité ait été documentée, tels que les EMAG ainsi que ceux qui répondent à un maximum de critères de la chimie verte.

Par ailleurs, comme le soulignent Marion et Jérôme (2018) à propos des solvants biosourcés, le développement et la mise en marché des solvants verts prendront du temps et auront un coût financier important. Cette situation plaiderait en faveur d'une sensibilité accrue des pouvoirs publics et des consommateurs. Finalement, 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 qui, tout en étant contraignante pour les entreprises, leur offre des ressources pour les aider concrètement à réaliser leurs projets de substitution de substances toxiques.

BIBLIOGRAPHIE

- Ab Rani, M. A., Borduas, N., Colquhoun, V., Hanley, R., Johnson, H., Larger, S., . . . Xing, J.-Y. (2014). The potential of methylsiloxanes as solvents for synthetic chemistry applications. *Green Chemistry*, 16(3), 1282–1296.
- Abou-Shehada, S., Clark, J. H., Paggiola, G. et Sherwood, J. (2016). Tunable solvents: Shades of green. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 99, 88-96.
- ACGIH. (2013). *Methyl Acetate. In: Documentation of the Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices*. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- ACGIH. (2018). *TLVs® and BEIs® Based on the Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices*. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- ACNOR. (2008). *Déclarations environnementales : Guide pour l'industrie et les publicitaires. PLUS 14021*. Établi en association avec le Bureau de la concurrence Canada. Mississauga, ON: Association canadienne de normalisation.
- ACS. (2011). *ACS GCI Pharmaceutical Roundtable Solvent Selection Guide*. Version 2.0. Washington, DC: American Chemical Society Green Chemistry Institute Pharmaceutical Roundtable. Tiré de <http://www.acs.org/content/dam/acsorg/greenchemistry/industriainnovation/roundtable/a-cs-gci-pr-solvent-selection-guide.pdf>
- AIHA. (1993). *Workplace Environmental Exposure Level Guide: Tetrahydrofurfuryl Alcohol*. Fairfax, VA: American Industrial Hygiene Association.
- AIHA. (2009). *Workplace Environmental Exposure Level: Polyethylene Glycol*. Fairfax, VA: American Industrial Hygiene Association.
- Alder, C. M., Hayler, J. D., Henderson, R. K., Redman, A. M., Shukla, L., Shuster, L. E. et Sneddon, H. F. (2016). Updating and further expanding GSK's solvent sustainability guide. *Green Chemistry*, 18(13), 3879-3890.
- Alfonsi, K., Colberg, J., Dunn, P. J., Fevig, T., Jennings, S., Johnson, T. A., . . . Stefaniak, M. (2008). Green chemistry tools to influence a medicinal chemistry and research chemistry based organisation. *Green Chemistry*, 10(1), 31-36.
- Amanatidis, G. (2018). *Consommation et production durables. Fiches techniques sur l'Union européenne*. Bruxelles: Union européenne.
- Anastas, P. T. (2002). Green Chemistry as Applied to Solvents. Dans M. A. Abraham et L. Moens (Édit.), *Clean Solvents - Alternative Media for Chemical Reactions and Processing* (p. 1-9). Washington, DC: American Chemical Society (ACS Symposium Series 819).
- Anastas, P. T. et Warner, J. C. (1998). *Green Chemistry: Theory and Practice*. New York: Oxford University Press.
- Anastas, P. T. et Zimmerman, J. B. (2003). Design Through the 12 Principles of Green Engineering. *Environmental Science & Technology*, 37(5), 94A–101A.
- Anderson, S. (2005). It's not easy being GREEN and it's not CHEAP either. *Coatings Magazine*, 27(1), 31-32.
- Anonymous. (2016). New Report Covers Biobased Solvents Market. *Paint & Coatings Industry*, 32(7), 8.
- Anses. (2017). *Valeurs limites d'exposition en milieu professionnel : Le butan-1-ol*. Maisons-Alfort: Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail.

- ARSP. (2016). *Safety Data Sheet: Americlean 30MPA*. Palos Verdes Estates, CA: American Research Specialty Products.
- ASI. (2015). Non-Toxic Solvents: Can “green” solvents be on a par with their conventional toxic counterparts? *Adhesives & Sealants Industry*, 22(7), 43-44. Tiré de <https://www.adhesivesmag.com/articles/94003-advancing-adhesives-non-toxic-solvents>
- Augé, J. et Scherrmann, M.-C. (2016). *Chimie verte - Concepts et applications*. Les Ulis et Paris: EDP Sciences et CNRS Éditions.
- Azadi, P., Carrasquillo-Flores, R., Pagán-Torres, Y. J., Gürbüz, E. I., Farnood, R. et Dumesic, J. A. (2012). Catalytic conversion of biomass using solvents derived from lignin. *Green Chemistry*, 14, 1573-1576.
- Bandres, M., de Caro, P., Thiebaud-Roux, S. et Borredon, M.-E. (2011). Green syntheses of biobased solvents. *Comptes Rendus Chimie*, 14(7-8), 636-646.
- Bazzanella, A. M. et Ausfelder, F. (2017). *Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry*. Study commissioned by Cefic, The European Chemical Industry Council. Frankfurt am Main: DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
- Beers, N. C. M., Koppes, M. J. C. M. et Rupert, L. A. M. (1998). Solvents - continuing to evolve for the future. *Pigment & Resin Technology*, 27(5), 289-297.
- Bégin, D., Beaudry, C. et Gérin, M. (2005). *La substitution des solvants par le carbonate de propylène*. Rapport B-070. Montréal: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. Tiré de <http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSST/B-070.pdf>
- Bégin, D., Debia, M. et Gérin, M. (2008). *Recension des outils de comparaison des solvants*. Rapport R-567. Montréal: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. Tiré de <http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSST/R-567.pdf>
- Bégin, D. et Gérin, M. (1999a). *La substitution des solvants par le d-limonène*. Rapport B-057. Montréal: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. Tiré de <http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSST/B-057.pdf>
- Bégin, D. et Gérin, M. (1999b). *La substitution des solvants par les esters d'acides dicarboxyliques (DBE) : Adipate diméthylque, glutarate diméthylque, succinate diméthylque*. Rapport B-056. Montréal: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. Tiré de <http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSST/B-056.pdf>
- Bégin, D. et Gérin, M. (2001). *Substitution de solvants - Étude de cas d'implantation*. Rapport R-269. Montréal: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. Tiré de <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-269.pdf?v=2019-01-09>
- Bégin, D., Gérin, M. et Debia, M. (2016). *Nettoyage à sec*. Solub - Démarche de substitution des solvants en milieu de travail. Fiche de substitution par utilisation RF-914. Montréal: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. Tiré de <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/RF-914.pdf>
- Bégin, D., Heng, S. et Gérin, M. (2005). *La substitution des solvants par le lactate d'éthyle*. Rapport B-069. Montréal: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. Tiré de <http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSST/B-069.pdf>
- Bégin, D., Lavoué, J. et Gérin, M. (2002). Les nouveaux solvants et les procédés de substitution. Dans M. Gérin (Édit.), *Solvants industriels - Santé, sécurité, substitution* (p. 61-109). Paris : Masson. Tiré de https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/bitstream/handle/1866/12278/Chapitre_4.pdf
- Benaissi, K. (2013). *Le CO2 supercritique appliqué à l'extraction végétale*. Réf. CHV4015 V1. Paris: Techniques de l'Ingénieur.

- Benali, M., Boumghar, Y. et Benyagoub, M. (2015). *Le biobutanol*. Propriétés, voies potentielles de sa production et portée de son marché. Varennes: Ressources naturelles Canada, CanmetÉNERGIE.
- Benyagoub, M. et Lachance, M. (2012). *Étude Chimie verte*. Québec: Consortium de recherche et innovations en bioprocédés industriels au Québec.
- Bergemann, E. P., Opre, J. E. et Henneberry, M. (2000). *Environmentally friendly solvent*. Patent n° 6,096,699. Washington, DC: United States Patent and Trademark Office.
- Bhatt, A. C., Ksenak, G., Papathomas, K. I., Shurtleff, J. et Wagner, J. J. (1996). *Method for treating photolithographic developer and stripper waste streams containing resist or solder mask and gamma butyrolactone or benzyl alcohol*. Patent n° 5,571,417. Washington, DC: United States Patent and Trademark Office.
- Blanchet, S. (2016). Solvants toxiques - Des solutions de remplacement selon l'utilisation. *Prévention au travail*, 29(3), 26-27. Tiré de <http://www.preventionautravail.com/recherche/371-solvants-toxiques-des-solutions-de-remplacement-selon-l-utilisation.html>
- Boggs, L. (2016). Overcoming Performance Challenges with Waterborne DTM Coatings. *Paint & Coatings Industry*, 32(10), 28-30. Tiré de <https://www.pcimag.com/articles/102555-overcoming-performance-challenges-with-waterborne-dtm-coatings>
- Bohnert, G. W., Carter, R. D., Hand, T. E. et Powers, M. T. (1996). Limonene and tetrahydrofurfuryl alcohol cleaning agent. *Journal of Cleaner Production*, 4(2), 143.
- Boivin, C., Durif, F. et Drouillard, J. B. (2010). Certification environnementale : la ruée vers le vert! *Organisations & territoires*, 19(2), 41-50. Tiré de <http://www.uqac.ca/revueot/>
- Boutekedjiret, C., Vian, M. A. et Chemat, F. (2014). Terpenes as Green Solvents for Natural Products Extraction. Dans F. Chemat et M. A. Vian (Édit.), *Alternative Solvents for Natural Products Extraction* (p. 205-219). Berlin: Springer-Verlag.
- Breslow, R. (2010). The Principles of and Reasons for Using Water as a Solvent for Green Chemistry. Dans C.-J. Li (Édit.), *Handbook of Green Chemistry, Volume 5: Reactions in Water* (p. 1-29). Weinheim: Wiley-VCH.
- Bricout, X., Chappat, M., Deneuvillers, C. et Harnois, S. (2012). *Use of solvents derived from renewable resources, paints and coating including them, method for preparing them*. Patent no 8,317,911. Washington, DC: United States Patent and Trademark Office.
- Bruckner, J. V., Anand, S. S. et Warren, D. A. (2019). Toxic Effects of Solvents and Vapors. Dans C.D. Klaassen (Édit.), *Casarett & Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons* (9^e éd.). New York, NY: McGraw-Hill Education.
- Brunner, G. (2014) Hydrothermal and Supercritical Water Processes. *Supercritical Fluid Science and Technology* Volume 5. Amsterdam: Elsevier.
- Bubalo, M. C., Radošević, K., Redovniković, I. R., Halambek, J. et Srček, V. G. (2014). A brief overview of the potential environmental hazards of ionic liquids. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 99, 1-12.
- Bubalo, M. C., Vidović, S., Redovniković, I. R. et Jokić, S. (2015). Green solvents for green technologies. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 90(9), 1631–1639.
- Burns, L.; Magnuson, K.; Geyer, R.; Keller, A.A. (2016) *Pilot Study to support Alternatives Analysis: Evaluating Alternatives to Methylene Chloride in Paint Stripper*. Prepared for the California Department of Toxic Substances Control (Sacramento, CA) by Bren School of Environmental Science & Management, Santa Barbara, CA: University of California. Tiré de https://dtsc.ca.gov/wp-content/uploads/sites/31/2018/10/DTSC_Final_Quant_AA_pilot_UCSB-1.pdf
- Burow, R.F. (1993) *Volatile Methyl Siloxanes (VMS) as Replacements for CFCs and Methyl Chloroform in Precision and Electronics Cleaning*. In: The 1993 International CFC and

- Halon Alternatives Conference - Stratospheric Ozone Protection for the 90's, Washington, DC, 20-22 October 1993, pp. 654-661. Frederick, MD: The Alliance for Responsible CFC Policy. Tiré de <https://p2infohouse.org/ref/30/29029.pdf>
- Byrne, F., Jin, S., Sherwood, J., McElroy, C. R., Farmer, T. J., Clark, J. H. et Hunt, A. J. (2017). Solvents from Waste. Dans F. Jérôme et R. Luque (Édit.), *Bio-Based Solvents* (p. 49-82). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Byrne, F. P., Jin, S., Paggiola, G., Petchey, T. H. M., Clark, J. H., Farmer, T. J., . . . Sherwood, J. (2016). Tools and techniques for solvent selection: green solvent selection guides. *Sustainable Chemical Processes*, 4 (article 7), 1-24. Tiré de <http://link.springer.com/article/10.1186/s40508-016-0051-z/fulltext.html>
- Capello, C., Fischer, U. et Hungerbühler, K. (2007). What is a green solvent? A comprehensive framework for the environmental assessment of solvents. *Green Chemistry*, 9(9), 927-934.
- CEN. (2017). *Solvants biosourcés – Exigences et méthodes d'essais*. EN 16766:2017 (F). Bruxelles: Comité européen de normalisation.
- Charretton, M., Falcy, M., Triolet, J. et Lebreton, R. (2006). *Peintures en phase aqueuse (ou peintures à l'eau) - Composition, risques toxicologiques, mesures de prévention*. ED 955. Paris: Institut national de recherche et de sécurité.
- Chemat, F. et Vian, M. A. (2014). *Alternative Solvents for Natural Products Extraction*. Berlin: Springer-Verlag.
- Chen, J., Spear, S. K., Huddleston, J. G. et Rogers, R. D. (2005). Polyethylene glycol and solutions of polyethylene glycol as green reaction media. *Green Chemistry*, 7(2), 64-82.
- CIR. (2010). *Final Report of the Cosmetic Ingredient Review Expert Panel: Amended Safety Assessment of Triethylene Glycol and Polyethylene Glycols*. Cosmetic Ingredient Review. Washington, DC: Personal Care Products Council. Tiré de http://www.cir-safety.org/sites/default/files/115_buff3e_suppl.pdf
- CIRAIG. (2017). Analyse du cycle de vie (ACV) environnementale et économique des sacs d'emplettes. Montréal : Centre international de référence sur le cycle de vie des produits, procédés et services (CIRAIG). Tiré de <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/haut-de-page/salle-de-presse/archives-presse/2018-publication-acv-sacs-emplettes>
- Clark, J. H., Farmer, T. J., Hunt, A. J. et Sherwood, J. (2015). Opportunities for Bio-Based Solvents Created as Petrochemical and Fuel Products Transition towards Renewable Resources. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(8), 17101-17159. Tiré de <http://www.mdpi.com/1422-0067/16/8/17101/htm>
- Clark, J. H., Hunt, A. J., Topi, C., Paggiola, G. et Sherwood, J. (2017). *Sustainable Solvents: Perspectives from Research, Business and International Policy*. Green Chemistry Series No. 49. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry.
- Clark, J. H. et Tavener, S. J. (2007). Alternative Solvents: Shades of Green. *Organic Process Research & Development*, 11(1), 149-155.
- Clarke, C. J., Tu, W.-C., Levers, O., Brohl, A. et Hallett, J. P. (2018). Green and Sustainable Solvents in Chemical Processes. *Chemical Reviews*, 118(2), 747-800.
- Commission mondiale sur l'environnement et le développement. (1988). *Notre avenir à tous*. Montréal: Les éditions du Fleuve.
- Conseil de l'Union européenne (1999). Directive 1999/13/CE du Conseil du 11 mars 1999 relative à la réduction des émissions de composés organiques volatils dues à l'utilisation de solvants organiques dans certaines activités et installations. *Journal officiel des Communautés européennes* (L 85), 1-22. Tiré de <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999L0013&from=FR>

- Conseil de l'Union européenne. (2012). Règlement (UE) No 528/2012 du parlement européen et du conseil du 22 mai 2012 concernant la mise à disposition sur le marché et l'utilisation des produits biocides. *Journal officiel de l'Union européenne* (L 167), 1-123. Tiré de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012R0528&from=FR>
- Commission européenne (2014) Décision de la Commission du 28 mai 2014 établissant les critères écologiques pour l'attribution du label écologique de l'Union européenne aux peintures et aux vernis d'intérieur ou d'extérieur. *Journal officiel de l'Union européenne* L 164, 45-73. Tiré de <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014D0312&from=EN>
- Cooper, C., Galick, P., Harris, D., Pourreau, D. et Rodriguez, C. (2001). Tert-Butyl-Acetate: Non-HAP Solvent for High-Solids Epoxy Formulations. *Journal of Coatings Technology*, 73(922), 19-24.
- Cseri, L., Razali, M., Pogany, P. et Szekely, G. (2018). Organic Solvents in Sustainable Synthesis and Engineering (chapter 3.15). Dans Török, B. et Dransfield, T (Édit.). *Green Chemistry: An Inclusive Approach*. (p 513-553). Amsterdam: Elsevier.
- Curzons, A. D., Constable, D. C. et Cunningham, V. L. (1999). Solvent selection guide: a guide to the integration of environmental, health and safety criteria into the selection of solvents. *Clean Products and Processes*, 1(2), 82-90. Tiré de http://parazite.pp.fi/hiveboard/picproxie_docs/000540292-1127b.pdf
- De Jong, M. D. T., Harkink, K. M. et Barth, S. (2018). Making Green Stuff? Effects of Corporate Greenwashing on Consumers. *Journal of Business and Technical Communications*, 32(1), 77-112.
- de la Guardia, M. et Garrigues, S. (Édit.). (2012). *Handbook of Green Analytical Chemistry*. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley & Sons.
- Debia, M., Bégin, D. et Gérin, M. (2008). Étude de cas de substitution de solvant pour le nettoyage de disjoncteurs haute tension. *Travail et santé*, 24(3), S2-S8. Tiré de http://www.substitution-cmr.fr/fileadmin/mediatheque/Fichiers_PDF/travail_sante_sept_2008.pdf
- 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.
- 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. Tiré de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21667370>
- DEP (2019) Complete List of TURA Chemicals. Boston, MA: Massachusetts Department of Environmental Protection. Tiré de <https://www.mass.gov/doc/complete-list-of-tura-chemicals-april-2019>
- Deroo, S. (2010). Rhodiasolv® IRIS : un nouveau solvant performant, respectueux de l'environnement et de la santé des utilisateurs. *Annales des falsifications, de l'expertise chimique et toxicologique*, n° 972, 43-49.
- DeSimone, J. M. (2002). Practical Approaches to Green Solvents. *Science*, 297(5582), 799-803.
- Diallo, A. O., Len, C., Morgan, A. B. et Marlair, G. (2012). Revisiting physico-chemical hazards of ionic liquids. *Separation and Purification Technology*, 97, 228-234.
- Diallo, F., Bégin, D., Debia, M. et Gérin, M. (2008). *Outils d'aide à la substitution des substances toxiques hors solvants*. Rapport soumis à l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Convention de coopération 06_CRD_33). Département de santé environnementale et santé au travail, Faculté de médecine, Université de Montréal, Montréal, Qc. Tiré de <http://www.substitution-cmr.fr>

- cmr.fr/fileadmin/mediatheque/Fichiers_PDF/aide_substitution_hors_solvants_rapport_af_sset.pdf
- Diallo, F., Bégin, D. et Gérin, M. (2010). *La substitution des solvants par les esters méthyliques d'acides gras d'huiles végétales*. Rapport B-079. Montréal: Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. Tiré de <http://www.irsst.gc.ca/files/documents/PubIRSSST/B-079.pdf>
- Dow. (2017). *Safety Data Sheet: CARBOWAX™ Polyethylene Glycol 400E*. Identification Number: 101193111 / A001, version 3.0. Midland, MI: Dow Chemical Company.
- Durif, F., Boivin, C. et Julien, C. (2010). In search of a green product definition. *Innovative Marketing*, 6(1), 23-31. Tiré de http://www.businessperspectives.org/journals_free/im/2010/im_en_2010_01_Durif.pdf
- Earle, M. J. et Seddon, K. R. (2000). Ionic Liquids. Green Solvents for the Future. *Pure and Applied Chemistry*, 72(7), 1391-1398.
- ECCC. (2017). *Aperçu de composés organiques volatils*. Ottawa, ON: Environnement et Changement climatique Canada. Tiré de <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/gestion-pollution/sources-industrie/composes-organiques-volatils-commerciaux-consommation/apercu.html>
- ECETOC. (2006). *Guidance for Setting Occupational Exposure Limits: Emphasis on Data-Poor Substances - Technical Report No. 101*. Brussels: European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals. Tiré de <http://www.ecetoc.org/wp-content/uploads/2014/08/ECETOC-TR-101.pdf>
- Elving, W. et Van Vuuren, M. (2011). Beyond identity washing: Corporate social responsibility in an age of skepticism. *Akademija MM (Slovenian Journal of Marketing)*, 10, 49-55. Tiré de <https://www.dlib.si/stream/URN:NBN:SI:DOC-8ABNOZ4S/88bf14dc-1956-431f-941b-407e83705eb4/PDF>
- Endres, F., Abbott, A. et MacFarlane, D. (2017). *Electrodeposition from Ionic Liquids*. Weinheim: Wiley-VCH.
- 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. Loi canadienne sur la protection de l'environnement. SPE 1/CC/4. N° de catalogue En40-881/2003F. Gatineau: Environnement Canada. Tiré de <http://www.ec.gc.ca/lcpe-cepa/documents/codes/dichloromethane/dichloromethane-fra.pdf>
- Estévez, C. (2009). Sustainable Solutions - Green Solvents for Chemistry. Dans R. Höfer (Édit.), *Sustainable Solutions for Modern Economies* (p. 407-424). Cambridge, UK: The Royal Society of Chemistry.
- EU-OSHA. (2013a). *E-fact 70: Questions de sécurité et de santé au travail liées à la construction écologique*. Bilbao: Agence européenne pour la sécurité et la santé au travail. Tiré de <https://osha.europa.eu/en/tools-and-publications/publications/e-facts/e-fact-70-occupational-safety-and-health-issues-associated-with-green-building/view>
- EU-OSHA. (2013b). *E-fact 71: Liste d'identification des risques: questions de sécurité et de santé au travail liées à la construction écologique*. Bilbao: Agence européenne pour la sécurité et la santé au travail. Tiré de <https://osha.europa.eu/en/publications/e-fact-71-hazard-identification-checklist-occupational-safety-and-health-issues/view>
- Flecksteiner, R., John, T. et Giorgio, C. (2016). Development of a Waterborne, Zero-VOC DTM with excellent Corrosion Resistance. *Paint & Coatings Industry*, 32(10), 32-36. Tiré de <https://www.pcimag.com/articles/102564-development-of-a-waterborne-zero-voc-dtm-with-excellent-corrosion-resistance>

- Forkner, M. W., Robson, J. H., Snellings, W. M., Martin, A. E., Murphy, F. H. et Parsons, T. E. (2005). Glycols. Dans *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, Volume 12* (p. 644-682). New York: John Wiley & Sons.
- Francisco, M., van den Bruinhorst, A. et Kroon, M. C. (2013). Low-Transition-Temperature Mixtures (LTTMs): A New Generation of Designer Solvents. *Angewandte Chemie (International edition)*, 52(11), 3074–3085.
- Gamsjäger, H., Lorimer, J. W., Scharlin, P. et Shaw, D. G. (2008). Glossary of terms related to solubility (IUPAC Recommendations 2008). *Pure and Applied Chemistry*, 80(2), 233–276. Tiré de <https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/pac.2008.80.issue-2/pac200880020233/pac200880020233.pdf>
- Gérin, M. et Bégin, D. (2002). Substitution: Démarches et outils (p. 39-56). Dans M. Gérin (Édit.). *Solvants industriels - santé, sécurité, substitution*. Paris: Masson.
- Gérin, M.; Bégin, D.; d'Amours, M.-F.; Savoie, L. (2012) *Le site Web Solub : 20 ans de recherche et d'expertise en substitution des solvants*. Dans : 34e Congrès de l'AQHSST, Gatineau, 16-18 mai 2012. Bromont: Association québécoise pour l'hygiène, la santé et la sécurité du travail. Tiré de <https://www.congresaqhsst.ca/archives-congres/archives/2012/michel-gerin.pdf>
- 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 R-098. Montréal: Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec. Tiré de <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSSST/R-098.pdf>
- Gérin, M., Bégin, D., Goupil, J., Garneau, R. et Sacks, S. (1996). Substitution des solvants : bases théoriques, analyse de substitution et grands axes des solutions. *Archives des maladies professionnelles*, 57(7), 519-527.
- Gilbert, Y.; Pessala, P.; Aho, J.; Lehti, R.; Vehviläinen, I.; Hjelt, M.; Priha, E.; Santonen, T.; Koponen, M.; Bäck, B.; Hyytinen, E.-R.; Kangas, A. (2012) *Minimising chemical risk to workers' health and safety through substitution*. European Commission, Directorate-General for Employment, Social Affairs and Inclusion, Unit Health, Safety & Hygiene at Work. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Tiré de <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/c94c5caf-fca6-498e-8dff-f75c6e20147f>
- Gouvernement de l'Ontario. (2009). *Loi visant à promouvoir une réduction de l'utilisation et de la création de substances toxiques et à modifier d'autres lois*. Toronto, ON: Gouvernement de l'Ontario. Tiré de <https://www.ontario.ca/fr/lois/loi/s09019>
- Gouvernement de l'Ontario. (2018). *Loi de 2009 sur la réduction des toxiques. L.O. 2009, Chapitre 19*. Toronto: Imprimeur de la reine pour l'Ontario. Tiré de <https://www.ontario.ca/fr/lois/loi/09t19>
- Gouvernement de l'Ontario (2019) Abrogation de la Loi de 2009 sur la réduction des toxiques et de tous les règlements connexes le 31 décembre 2021. Ministère de l'Environnement, de la Protection de la nature et des Parcs, Toronto. Tiré de : <https://ero.ontario.ca/fr/notice/013-4234>
- Gouvernement du Canada. (2018a). *Annexe 1 - Liste des substances toxiques. Dans Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999)*. Ottawa.
- Gouvernement du Canada. (2018b). *Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999)*. L.C. 1999, ch. 33. Ottawa: Ministère de la Justice du Canada. Tiré de <https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/c-15.31/>
- Gouvernement du Canada. (2018c). *Règlement canadien sur la santé et la sécurité au travail*. DORS/86-304. Ottawa : Ministère de la Justice. Tiré de <https://laws-lois.justice.gc.ca/PDF/SOR-86-304.pdf>

- Gouvernement du Canada. (2018d). *Règlement fédéral sur les halocarbures (2003)*. DORS/2003-289. Ottawa: Ministère de la Justice.
- Gouvernement du Canada. (2018e). *Règlement limitant la concentration en composés organiques volatils (COV) des produits de finition automobile*. DORS/2009-197. Ottawa : Ministère de la Justice. Tiré de <https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/reglements/DORS-2009-197>
- Gouvernement du Canada. (2018f). *Règlement limitant la concentration en composés organiques volatils (COV) des revêtements architecturaux*. DORS/2009-264. Ottawa : Ministère de la Justice. Tiré de <http://laws-lois.justice.gc.ca/PDF/SOR-2009-264.pdf>
- Gouvernement du Canada. (2018g). *Règlement sur le 2-butoxyéthanol*. DORS/2006-347. Ottawa: Ministère de la Justice.
- Gouvernement du Canada. (2018h). *Règlement sur le tétrachloroéthylène (utilisation pour le nettoyage à sec et rapports)*. DORS/2003-79. Ottawa: Ministère de la Justice.
- Gouvernement du Canada. (2018i). *Règlement sur les solvants de dégraissage*. DORS/2003-283. Ottawa: Ministère de la Justice.
- Gouvernement du Canada. (2018j). *Règlement sur les substances appauvrissant la couche d'ozone et les halocarbures de remplacement*. DORS/2016-137. Ottawa: Ministère de la Justice.
- Gouvernement du Canada. (2019). *Règlement sur certaines substances toxiques interdites (2012)*. DORS/2012-285. Ottawa : Ministère de la Justice. Tiré de <https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/reglements/DORS-2012-285>
- Gouvernement du Québec. (2017). *Règlement sur la santé et la sécurité du travail*. Lois et Règlements du Québec, chapitre S-2.1, r. 13. Québec : Éditeur officiel du Québec. Tiré de <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cr/S-2.1,%20r.%2013>
- Gouvernement du Québec. (2018a). *Loi sur la qualité de l'environnement. Chapitre Q-2*. Québec: Les Publications du Québec.
- Gouvernement du Québec. (2018b). *Plan d'action pour la croissance et les technologies propres: vers une économie plus verte et prospère. 2018-2023*. Québec : Ministère de l'Économie, de la Science et de l'Innovation: Tiré de <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/35333393>
- Gouvernement du Québec. (2018c). *Règlement sur l'assainissement de l'atmosphère. Chapitre Q-2, r. 4.1*. Québec: Les Publications du Québec.
- Government of Ontario. (2018). *Ontario Regulation 455/09*. Toronto: Queen's Printer for Ontario.
- Government of the United States. (2001a). Electronic Code of Federal Regulations (e-CFR). Title 40. Protection of Environment. Chapter I. Environmental Protection Agency. Subchapter C. Air Programs. Part 59. National Volatile Organic Compound Emission Standards for Consumer and Commercial Products. Subpart B. National Volatile Organic Compound Emission Standards for Automobile Refinish Coatings.
- Government of the United States. (2001b). Electronic Code of Federal Regulations (e-CFR). Title 40. Protection of Environment. Chapter I. Environmental Protection Agency. Subchapter C. Air Programs. Part 59. National Volatile Organic Compound Emission Standards for Consumer and Commercial Products. Subpart B. National Volatile Organic Compound Emission Standards for Automobile Refinish Coatings. Appendix Table_1_to_subpart_B_of_part_59. Volatile Organic Compound (VOC) Content Limits for Automobile Refinish Coatings.
- Government of the United States. (2001c). Electronic Code of Federal Regulations (e-CFR). Title 40. Protection of Environment. Chapter I. Environmental Protection Agency. Subchapter C. Air Programs. Part 59. National Volatile Organic Compound Emission

- Standards for Consumer and Commercial Products. Subpart C. National Volatile Organic Compound Emission Standards for Consumer Products.
- Government of the United States. (2001d). Electronic Code of Federal Regulations (e-CFR). Title 40. Protection of Environment. Chapter I. Environmental Protection Agency. Subchapter C. Air Programs. Part 63. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Source Categories. Subpart T. National Emission Standards for Halogenated Solvent Cleaning.
- Government of the United States. (2001e). Electronic Code of Federal Regulations (e-CFR). Title 40. Protection of Environment. Chapter I. Environmental Protection Agency. Subchapter C. Air Programs. Part 63. National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Source Categories. Subpart KK. National Emission Standards for the Printing and Publishing Industry.
- Government of the United States (2001f) Title 40--Protection of Environment, Chapter I--Environmental Protection Agency, Part 51--Requirements for Preparation, Adoption, and Submittal of Implementation Plans, Subpart F--Procedural Requirements, Section 51.100 Definitions. *Code of Federal Regulations* 40(2):130-135. Tiré de <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/CFR-2001-title40-vol2/xml/CFR-2001-title40-vol2-sec51-100.xml>
- Green Seal. (2013a). *GS-36 - Green Seal™ Standard for Adhesives for Commercial Use*. Edition 2.1. Washington, DC: Green Seal.
- Green Seal. (2013b). *GS-43 - Green Seal™ Standard for Recycled Latex Paint*. Edition 1.1. Washington, DC: Green Seal, Inc.
- Green Seal. (2015). *GS-11 - Green Seal™ Standard for Paints, Coatings, Stains, and Sealers*. Edition 3.2. Washington, DC: Green Seal, Inc.
- Green Seal. (2017a). *GS-34 - Green Seal™ Standard for Cleaning and Degreasing Agents*. Edition 2.2. Washington, DC: Green Seal, Inc.
- Green Seal. (2017b). *GS-37 - Green Seal™ Standard for Cleaning Products for Industrial and Institutional Use*. Edition 7.3^e. Washington, DC: Green Seal, Inc.
- Green Seal. (2017c). *GS-40 - Floor-Care Products for Industrial and Institutional Use*. Edition 2.4. Washington, DC: Green Seal, Inc.
- Green Seal. (2017d). *GS-51 - Green Seal™ Standard for Laundry Care Products for Industrial and Institutional Use*. Edition 1.4. Washington, DC.: Green Seal, Inc.
- Green Seal. (2017e). *GS-53 - Green Seal™ Standard for Specialty Cleaning Products for Industrial and Institutional Use*. Edition 2.4. Washington, DC: Green Seal, Inc.
- Gscheidmeier, M. et Fleig, H. (2000). Turpentine. Dans B. Elvers (Édit.), *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Volume 37* (p. 537-550). Weinheim: Wiley-VCH.
- Gu, Y. et Jérôme, F. (2013). Bio-based solvents: an emerging generation of fluids for the design of eco-efficient processes in catalysis and organic chemistry. *Chemical Society Reviews*, 42(24), 9550-9570.
- Haneke, K. E. (2002). *Turpentine (Turpentine Oil, Wood Turpentine, Sulfate Turpentine, Sulfite Turpentine) [8006-64-2] - Review of Toxicological Literature*. Submitted by Integrated Laboratory Systems to National Institute of Environmental Health Sciences. Research Triangle Park, NC. Tiré de https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/htdocs/chem_background/exsumpdf/turpentine_508.pdf
- Hansen, C. M. (1969). The Universality of the Solubility Parameter. *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*, 8(1), 2-11.
- Hansen, C. M. (2007). *Hansen Solubility Parameters: A User's Handbook* (2^e éd.). Boca Raton, FL: CRC Press.

- Hare, C. H. (2000). Formulation Strategies, Using Exempt Solvents: Latest Developments. *Paint & Coatings Industry*, 16(8), 88-98. Tiré de <https://www.pcimag.com/articles/85626-formulation-strategies-using-exempt-solvents-latest-developments>
- Hargreaves, C. R. et Manley, J. B. (2008). *Collaboration to Deliver a Solvent Selection Guide for the Pharmaceutical Industry*. Washington, DC: American Chemical Society Green Chemistry Institute Pharmaceutical Roundtable Tiré de <https://www.acs.org/content/dam/acsorg/greenchemistry/industriainnovation/roundtable/solvent-selection-guide.pdf>
- Harrison, R., Israel, L., Larabee, P., Cone, J., Baker, C., Brewer, M., . . . Hammond, S. K. (2001). n-Hexane-Related Peripheral Neuropathy Among Automotive Technicians — California, 1999–2000. *Morbidity and Mortality Weekly Report*, 50(45), 1011-1013. Tiré de <http://www.cdc.gov/mmwr/PDF/wk/mm5045.pdf>
- Hayyan, M., Hashim, M. A., Hayyan, A., Al-Saadi, M. A., AlNashef, I. M., Mirghani, M. E. S. et Saheed, O. K. (2013). Are deep eutectic solvents benign or toxic? *Chemosphere*, 90(7), 2193–2195.
- Heater, K. J., Parsons, A. B. et Olfenbuttel, R. F. (1994). *Evaluation of Supercritical Carbon Dioxide Technology to Reduce Solvent in Spray Coating Applications*, Contract No. 68-CO-0003, Work Assignment No. 3-36, to. Risk Reduction Engineering Laboratory, Office of Research and Development. Cincinnati, OH: U.S. Environmental Protection Agency. Tiré de <https://nepis.epa.gov/Exe/tiff2png.cgi/3000345B.PNG?-r+75+g+7+D%3A%5CZYFILES%5CINDEX%20DATA%5C91THRU94%5CTIFF%5C00001008%5C3000345B.TIF>
- Henderson, R. K., Jimenez-Gonzalez, C., Constable, D. J. C., Alston, S. R., Inglis, G. G. A., Fisher, G., . . . Curzons, A. D. (2011). Expanding GSK's solvent selection guide – embedding sustainability into solvent selection starting at medicinal chemistry. *Green Chemistry*, 13(4), 854-862.
- Hoang, L. E., Parmentier, J., Ballerini, D., Hillion, G., Wozniak, E., Mages, R., . . . Bewa, H. (2003). Évaluation des esters méthyliques de tournesol isomérisés comme substitut de solvants (COV) dans le domaine des peintures et vernis et assimilés *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 10(5-6), 387-391. Tiré de <http://www.ocl-journal.org/articles/ocj/pdf/2003/05/ocj2003105-6p387.pdf>
- 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*. Patent N° 5,203,843. Washington, DC: United States Patent and Trademark Office.
- Hulsbosch, J., De Vos, D. E., Binnemans, K. et Ameloot, R. (2016). Biobased Ionic Liquids: Solvents for a Green Processing Industry? *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(6), 2917–2931.
- IARC. (2014). Trichloroethylene, Tetrachloroethylene, and some other Chlorinated Agents. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*, Volume 106. Lyon: World Health Organization, International Agency for Research on Cancer. Tiré de <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol106/index.php>
- IARC. (2018). Some Industrial Chemicals. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans*. Lyon: World Health Organization, International Agency for Research on Cancer, Volume 115. Tiré de <https://monographs.iarc.fr/iarc-monographs-on-the-evaluation-of-carcinogenic-risks-to-humans/>
- ICC The Compliance Center Inc. (2018) Fiche de données de sécurité : Super Eco Décapant. Granby, QC: Distribution J. Des Serres Inc. Tiré de <https://www.superremover.com/wp-content/uploads/2018/11/2001-2004-Super-ECO-SDS-FR-May-2018.pdf>

- Ichihara, G., Miller, J. K., Ziolkowska, A., Itohara, S. et Takeuchi, Y. (2002). Neurological Disorders in Three Workers Exposed to 1-Bromopropane. *Journal of Occupational Health*, 44(1), 1-7.
- Imperato, G., König, B. et Chiappe, C. (2007). Ionic Green Solvents from Renewable Resources. *European Journal of Organic Chemistry*, 2007(7), 1049-1058.
- INERIS (2017) *Guide méthodologique pratique d'évaluation de solutions de substitution*. Verneuil-en-Halatte: Institut national de l'environnement industriel et des risques. Tiré de https://substitution.ineris.fr/sites/substitution-portal/files/documents/guide_substitution_version_finale_1.pdf
- INRS. (2016). *Fiche DEMETER : Alcool tétrahydrofurfurylique*. N° DEM 146. Document pour l'évaluation médicale des produits toxiques vis-à-vis de la reproduction. Paris: Institut national de recherche et de sécurité.
- ISO. (2006a). *ISO 14025 : Marquages et déclarations environnementaux — Déclarations environnementales de Type III — Principes et modes opératoires*. Genève: Organisation internationale de normalisation.
- ISO. (2006b). *Management environnemental - analyse du cycle de vie - principes et cadre*. ISO 14040:2006. Genève: Organisation internationale de normalisation. Tiré de <https://www.iso.org/fr/standard/37456.html>
- IUPAC. (2014). *Compendium of Chemical Terminology Gold Book*. Version 2.3.3. Research Triangle Park, NC: International Union of Pure and Applied Chemistry. Tiré de <http://goldbook.iupac.org/pdf/goldbook.pdf>
- Jacobs, M. M., Malloy, T. F., Tickner, J. A. et Edwards, S. (2016). Alternatives Assessment Frameworks: Research Needs for the Informed Substitution of Hazardous Chemicals. *Environmental Health Perspectives*, 124(3), 265-280. Tiré de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/26339778>
- Jérôme, F. et Luque, R. (Édit.). (2017). *Bio-Based Solvents*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Jessop, P. G. (2011). Searching for green solvents. *Green Chemistry*, 13(6), 1391-1398.
- Jessop, P. G., Mercer, S. M. et Heldebrant, D. J. (2012). CO₂-triggered switchable solvents, surfactants, and other materials. *Energy and environmental science*, 5(6), 7240-7253.
- Jiménez-González, C., Curzons, A. D., Constable, D. J. C. et Cunningham, V. L. (2005). Expanding GSK's Solvent Selection Guide - Application of life cycle assessment to enhance solvent selections. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 7(1), 42-50.
- Johansson, K. et Johansson, M. (2007). Fatty Acid Methyl Esters Reactive Diluents in Coil-Coatings. *Polymer Preprints*, 48(2), 857-858.
- Johansson, K. et Johansson, M. (2008). Fatty acid methyl ester as reactive diluent in thermally cured solvent-borne coil-coatings—The effect of fatty acid pattern on the curing performance and final properties. *Progress in Organic Coatings*, 63(2), 155-159.
- Kerton, F. M. et Marriott, R. (2013). *Alternative Solvents for Green Chemistry*. 2nd Edition. RSC Green Chemistry No. 20. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry. Tiré de <http://pubs.rsc.org/en/content/ebook/978-1-84973-595-7>
- Kincaid, L. E., Meline, J. D. et Davis, G. A. (1996). *Cleaner Technologies Substitutes Assessment - A Methodology & Resource Guide*. EPA744-R-95-002. Produced under EPA Grant Number X821-543 to The University of Tennessee, Center for Clean Products and Clean Technology. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, Office of Pollution Prevention and Toxics. Tiré de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockkey=200017NC.PDF>
- Klingenberg, M., Berman, E. et Voevodin, N. (2013). Ionic Liquids Used as Cleaning Solvent Replacements. Dans J. Matyâs, T. Ohji, X. Liu, M. Parans, P. R. Devanathan, K. Fox, M.

- Singh et W. Wong-Ng (Édit.), *Advances in Materials Science for Environmental and Energy Technologies II* (p. 181-190). Westerville, Ohio: American Ceramic Society.
- Kob, N. E. (2002). Dibasic Ester: A Low Risk, Green Organic Solvent Alternative. Dans M. A. Abraham et L. Moens (Édit.), *Clean Solvents - Alternative Media for Chemical Reactions and Processing* (p. 238-253). ACS Symposium Series 819. Washington, DC: American Chemical Society.
- Kontilski, S. et Gechev, P. (2006). Substitution principle in REACH and the european way to safe and green chemistry. *Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy*, 41(2), 237-240.
- Kosaric, N., Duvnjak, Z., Farkas, A., Sahm, H., Bringer-Meyer, S., Goebel, O. et Mayer, D. (2012). Ethanol. Dans B. Elvers (Édit.), *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Volume 13* (p. 333-403). Weinheim: Wiley-VCH.
- Koudous, I., Kunz, W. et Strube, J. (2015). Panorama of Sustainable Solvents for Green Extraction Processes. Dans F. Chemat et J. Strube (Édit.), *Green Extraction of Natural Products - Theory and Practice* (p. 173-236). Weinheim: Wiley-VCH.
- Kuczynski, B. et Geyer, R. (2010). *Chemical Alternatives Analysis: Methods, Models, and Tools*. Revised Final Report to the Department of Toxic Substances Control, State of California (DTSC Contract #08-T3629) by Bren School of Environmental Science and Management, Santa Barbara, CA: University of California. Tiré de <https://www.dtsc.ca.gov/SCP/GRSP/upload/08-T3629-AA-Report-Final-Aug-24-2010.pdf>
- Labelle, P.-L. et Cyrenne, P. (2016). *Accident mortel survenu à un travailleur le 30 juin 2016 sur un chantier situé au 100, rue de Gaspé à Montréal, arrondissement Verdun*. Rapport d'enquête n° RAP1153274, dossier d'intervention n° 4239382. Montréal : Direction régionale de Montréal, Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail.
- Lachapelle, S. (2009). Le virage vert n'est plus une option, mais une obligation. *Les Affaires*, 81(37), A14-A15.
- Lavoie E.T., Heine, L. G., Holder, H., Rossi, M. S., Lee II, R. E., Connor, E. A., . . . Davies, C. L. (2010). Chemical Alternatives Assessment: Enabling Substitution to Safer Chemicals. *Environmental Science & Technology*, 44(24), 9244-9249. Tiré de <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es1015789>
- Lavoie J.M., Marie-Rose, S. et Lynch, D. (2013). Non-homogeneous residual feedstocks to biofuels and chemicals via the methanol route. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 3(1), 39-44. Tiré de <https://link.springer.com/article/10.1007/s13399-012-0050-6>
- Lavoué, J., Bégin, D. et Gérin, M. (2003). Technical, Occupational Health and Environmental Aspects of Metal Degreasing with Aqueous Cleaners. *Annals of Occupational Hygiene*, 47(6), 441-459.
- Liao, Y., Dewaele, A., Verboekend, D. et Sels, B. F. (2017). Alkylphenols as Bio-Based Solvents: Properties, Manufacture and Applications. Dans F. Jérôme et R. Luque (Édit.), *Bio-Based Solvents* (p. 149-173). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Loubet, P., Tsang, M., Gemechu, E., Foulet, A. et Sonnemann, G. (2017). Life Cycle Assessment for Green Solvents. Dans F. Jérôme et R. Luque (Édit.), *Bio-Based Solvents* (p. 131-148). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Lumia, G. (2002). *Utilisation du CO₂ supercritique comme solvant de substitution*. IN 5. Techniques de l'ingénieur. Paris: Editions T.I.
- Marcus, Y. (2012). *Supercritical Water. A Green Solvent: Properties and Uses*. Hoboken, NJ: Wiley.
- Marion, P. et Jérôme, F. (2018). Les solvants biosourcés. *L'Actualité chimique*, N° 427-428, 91-94.

- Marshall, J. P. et Wilcox, H. (2015). How Green and Does it Clean: Methodologies for Assessing Cleaning Products for Safety and Performance. Dans R. Kohli et K. L. Mittal (Édit.), *Developments in Surface Contamination and Cleaning, Cleaning Techniques, Volume 8* (p. 1-69). Waltham, MA: Elsevier, William Andrew.
- Martí, M., Molina, L., Alemán, C. et Armelin, E. (2013). Novel Epoxy Coating Based on DMSO as a Green Solvent, Reducing Drastically the Volatile Organic Compound Content and Using Conducting Polymers As a Nontoxic Anticorrosive Pigment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1(12), 1609–1618.
- Martín, Á. et Cocero, M. J. (2016). Supercritical Fluids. Dans *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* (p. 1-28). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- MECC. (2012). *Reference Tool for Assessing Safer Chemical Alternatives. Ontario Toxics Reduction Program*. Toronto: Ministry of the Environment and Climate Change.
- Michud, A., Tanttú, M., Asaadi, S., Ma, Y., Netti, E., Kääriäinen, P., . . . Sixta, H. (2015). Ioncell-F: ionic liquid-based cellulosic textile fibers as an alternative to viscose and Lyocell. *Textile Research Journal*, 86(5), 543–552.
- MIT. (2006). *Green Alternatives Wizard Help Guide*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, Environment Health and Safety Office.
- Mohammad, A. et Inamuddin (Édit.). (2012a). *Green Solvents I : Properties and Applications in Chemistry*. Dordrecht: Springer.
- Mohammad, A. et Inamuddin (Édit.). (2012b). *Green Solvents II : Properties and Applications of Ionic Liquids*. Dordrecht: Springer.
- Moore, J. (2015). *Frontiers in Bioaromatics: Characterization, Refining, and Applications*. Communication présentée à World Congress on Industrial Biotechnology, Montréal, 19-22 July. Tiré de <https://www.bio.org/sites/default/files/WorldCongress/Frank%20Liotta.pdf>
- 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*. TURI Report 2017-102. Lowell, MA: Toxics Use Reduction Institute, University of Massachusetts.
- National Toxicology Program. (2018). *NTP Technical Report on the Toxicology and Carcinogenesis Studies of p-chloro- α,α,α -trifluorotoluene (CAS No. 98-56-6) in Sprague Dawley Rats (Hsd:Sprague Dawley SD) and B6C3F1/N Mice (inhalation studies)*. NTP TR 594. Research Triangle Park, NC : National Institutes of Health Public Health Service, U.S. Department of Health and Human Services. Tiré de https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/htdocs/lt_rpts/tr594_508.pdf
- Nations unies. (2017). *Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques (SGH)* (Septième édition révisée). New York et Genève: Organisation des Nations unies.
- Nelson, W. M. (2003). *Green Solvents for Chemistry: Perspectives and Practice*. New York, NY: Oxford University Press.
- Nordic Ecolabelling (2018) *Nordic Ecolabelling for Indoor paints and varnishes. Version 3.4*, 5 November 2015 - 30 June 2021. Helsinki : Nordic Ecolabelling Finland. Tiré de <http://www.nordic-ecolabel.org/product-groups/group/?productGroupCode=096>
- Nordic Ecolabelling. (2016). *Nordic Ecolabelling of Industrial cleaning and degreasing agents. version 3.0, 16 June 2016*. Oslo: Ecolabelling Norway. Tiré de www.nordic-ecolabel.org/product-groups/group/DownloadDocument/?documentId=1672
- NRC. (2014). *A Framework to Guide Selection of Chemical Alternatives*. Committee on the Design and Evaluation of Safer Chemical Substitutions: A Framework to Inform Government and Industry Decision, Board on Chemical Sciences and Technology,

- Board on Environmental Studies and Toxicology, Division on Earth and Life Studies, National Research Council. Washington, DC: National Academies Press. Tiré de https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK253965/pdf/Bookshelf_NBK253965.pdf
- O'Donoghue, M. et Datta, V. (2009). The VOC Odyssey: An Epic Tale of the Green World of Coating Formulators. *Journal of Protective Coatings and Linings*, 26(5), 26-38.
- OCDE. (1992). *Ligne directrice de l'OCDE pour les essais de produits chimiques - 301 : Biodégradabilité Facile*. Paris: Organisation de coopération et de développement économiques. Tiré de <https://www.oecd-ilibrary.org/docserver/9789264070356-fr.pdf?expires=1548088824&id=id&accname=ocid43014084&checksum=C2D11938F16B9845564C09FDE2EBB730>
- OECD. (2013). *Current Landscape of Alternatives Assessment Practice: A Meta-Review*. ENV/JM/MONO(2013)24. OECD Environment, Health and Safety Publications, Series on Risk Management No. 26, Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development. Tiré de <http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/JM/MONO%282013%2924&docLanguage=En>
- OECD. (2019). *Cross Country Analysis: Approaches to Support Alternatives Assessment and Substitution of Chemicals of Concern* (vol. 50). Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, Environment Directorate.
- OEHHA. (2016). *OEHHA Acute, 8-hour and Chronic Reference Exposure Levels (REL) Summary*. Office of Environmental Health Hazard Assessment. Sacramento, CA: California Environmental Protection Agency.
- ONU. (1992). Action 21. *Conférence des Nations unies sur l'environnement et le développement, Rio de Janeiro, 3-14 juin 1992*. New York: Organisation des Nations unies.
- OSHA. (2013). *Transitioning to Safer Chemicals: A Toolkit for Employers and Workers...*, Washington, DC: United States Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration. Tiré de https://www.osha.gov/dsg/safer_chemicals
- Paiva, A., Craveiro, R., Aroso, I., Martins, M., Reis, R. L. et Duarte, A. R. C. (2014). Natural Deep Eutectic Solvents – Solvents for the 21st Century. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2(5), 1063–1071.
- Parlement européen et Conseil de l'Union européenne (2004). Directive 2004/42/CE du Parlement européen et du Conseil du 21 avril 2004 relative à la réduction des émissions de composés organiques volatils dues à l'utilisation de solvants organiques dans certains vernis et peintures et dans les produits de retouche de véhicules, et modifiant la directive 1999/13/CE. *Journal officiel de l'Union européenne*, L143:87-96. Tiré de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32004L0042&from=FR>
- Parlement européen et Conseil de l'Union européenne (2004) Directive 2004/37/CE du Parlement européen et du Conseil du 29 avril 2004 concernant la protection des travailleurs contre les risques liés à l'exposition à des agents cancérigènes ou mutagènes au travail (sixième directive particulière au sens de l'article 16, paragraphe 1, de la directive 89/391/CEE du Conseil). *Journal officiel de l'Union européenne*, L158:50-76. Tiré de <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2004:158:0050:0076:FR:PDF>
- Parlement européen et Conseil de l'Union européenne (2006) Règlement (CE) No 1907/2006 du Parlement européen et du Conseil du 18 décembre 2006 concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances (REACH), instituant une agence européenne des produits chimiques, modifiant la directive 1999/45/CE et abrogeant le règlement

- (CEE) n° 793/93 du Conseil et le règlement (CE) no 1488/94 de la Commission ainsi que la directive 76/769/CEE du Conseil et les directives 91/155/CEE, 93/67/CEE, 93/105/CE et 2000/21/CE de la Commission. *Journal officiel de l'Union européenne*, L396:1-849. Tiré de <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:396:0001:0849:FR:PDF>
- Parlement européen et Conseil de l'Union européenne (2008) Règlement (CE) no 1272/2008 du Parlement européen et du Conseil du 16 décembre 2008 relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances et des mélanges, modifiant et abrogeant les directives 67/548/CEE et 1999/45/CE et modifiant le règlement (CE) no 1907/2006. *Journal officiel de l'Union européenne*, 51(L353):1-1355. Tiré de <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:353:0001:1355:FR:PDF>
- Parlement européen et Conseil de l'Union européenne (2009) Décision No 455/2009/CE du Parlement européen et du Conseil du 6 mai 2009 modifiant la directive 76/769/CEE du Conseil relative à la limitation de la mise sur le marché et de l'emploi du dichlorométhane. *Journal officiel de l'Union européenne*, L 137:3-6. Tiré de <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:137:0003:0006:FR:PDF>
- Parlement européen et Conseil de l'Union européenne (2010a) Directive 2010/75/UE du Parlement européen et du Conseil du 24 novembre 2010 relative aux émissions industrielles (prévention et réduction intégrées de la pollution) (refonte). *Journal officiel de l'Union européenne*, L334:17-119. Tiré de <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:334:0017:0119:fr:PDF>
- Parlement européen et Conseil de l'Union européenne (2010b) Règlement (CE) No 66/2010 du Parlement européen et du Conseil du 25 novembre 2009 établissant le label écologique de l'UE. *Journal officiel de l'Union européenne*, L27:1-19. Tiré de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010R0066&from=FR>
- Patrascu, C. (2012). *Les agrosolvants*. ED 4230. Paris: Institut national de recherche et de sécurité.
- Pena-Pereira, F. et Tobiszewski, M. (Édit.). (2017). *The Application of Green Solvents in Separation Processes*. Amsterdam: Elsevier.
- Prat, D., Pardigon, O., Flemming, H.-W., Letestu, S., Ducandas, V., Isnard, P., . . . Hosek, P. (2013). Sanofi's Solvent Selection Guide: A Step Toward More Sustainable Processes. *Organic Process Research & Development*, 17(12), 1517-1525.
- Prat, D., Wells, A., Hayler, J., Sneddon, H., McElroy, C. R., Abou-Shehada, S. et Dunn, P. J. (2016). CHEM21 selection guide of classical- and less classical-solvents. *Green Chemistry*, 18(1), 288-296. Tiré de <http://pubs.rsc.org/en/content/articlepdf/2016/gc/c5gc01008j>
- Ramey, J. (2006). Replacing HAP Solvents: Xylene and Toluene. *Paint & Coatings Industry*, 22(4), 80-82.
- Reihlen, A., Bunke, D., Gruhlke, A., Groß, R. et Blum, C. (2016). *Guide on Sustainable Chemicals: A decision tool for substance manufacturers, formulators and end users of chemicals*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt - German Environment Agency. Tiré de <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/guide-on-sustainable-chemicals>
- RepTox. (2004). *Essence de térébenthine*. Montréal: Répertoire toxicologique, Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail.
- RepTox. (2008). *Lactate d'éthyle*. Montréal: Répertoire toxicologique, Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail.
- Rieth, L. R., Tjosaas, M. J. et Yontz, D. J. (2014). *Carboxy Ester Ketal Removal Compositions, Methods of Manufacture, and Use thereof*. Patent No. US 8,828,917 B2. Washington, DC: United States Patent and Trademark Office.

- 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>
- Rosenbaum, R. K., Hauschild, M. Z., Boulay, A.-M., Fantke, P., Laurent, A., Núñez, M. et Vieira, M. (2018). Life Cycle Impact Assessment. Dans Hauschild M., Rosenbaum R., Olsen S. (Edit.), *Life Cycle Assessment* (p. 167-270). Cham: Springer.
- SCAQMD. (2016). *Rule 1113. Architectural Coatings*. Diamond Bar, CA: South Coast Air Quality Management District.
- Scherrmann, M.-C., Malacria, M., Goddard, J.-P. et Ollivier, C. (2008). *Chimie dans l'eau*. Réf. K1210 V1. Paris: Techniques de l'Ingénieur.
- Schulte, D., présidente (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. Ottawa: Chambre des Communes. Tiré de <https://www.noscommunes.ca/Content/Committee/421/ENVI/Reports/RP9037962/envirp08/envirp08-f.pdf>
- Schupp, T., Georg, P. A. et Kirstein, G. (2017). Toxicological risk at workplace and toxicity as Life Cycle Assessment impact category: Substitution of solvents as an example. *EXCLI Journal*, 16, 40-51. Tiré de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5318680/>
- Sell, C. S. (2006). Terpenoids. Dans *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, Volume 24* (p. 1-143). New York: John Wiley & Sons.
- Shapiro, K., Little, R. et White, A. (1994). To switch or not to switch: a decision framework for chemical substitution. *Pollution Prevention Review*, 4(1), 3-13.
- Slater, C. S. et Savelski, M. (2007). A method to characterize the greenness of solvents used in pharmaceutical manufacture. *Journal of Environmental Science and Health Part A Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 42(11), 1595-1605.
- Smith, E. L., Abbott, A. P. et Ryder, K. S. (2014). Deep Eutectic Solvents (DESs) and Their Applications. *Chemical Reviews*, 114(21), 11060–11082. Tiré de <http://pubs.acs.org/doi/pdfplus/10.1021/cr300162p>
- State of California (2019) California Code of Regulations, Title 22 (Social Security), Division 4.5 (Environmental Health Standards for the Management of Hazardous Waste), Chapter 55: Safer Consumer Products. Sacramento, CA: Department of Toxic Substances Control. Tiré de <https://dtsc.ca.gov/title22>
- Sugiyama, H., Fischer, U. et Hungerbühler, K. (2006). *EHS Assessment Tool*. Version 1.0. Safety and Environmental Technology Group. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology. Tiré de <http://www.setg.ethz.ch/research/downloads/software---tools/ehs-tool.html>
- TBF. (2014). *Safety Data Sheet: ZemaSol™*. Surrey, BC: TBF Environmental Technology.
- TBF. (2015). *Technical Data Sheet: ZemaSol™*. Surrey, BC: TBF Environmental Technology.
- Technavio. (2016). Global Green and Bio Solvents Market, 2016-2020. *Industrial Biotechnology*, 12(4), 216-218.
- TerraChoice. (2010). *The sins of greenwashing. Home and family edition 2010: A report on environmental claims made in the North American consumer market*. Terrachoice et Underwriters Laboratories. Tiré de <https://web.archive.org/web/20160627132015/http://sinsofgreenwashing.com/index35c6.pdf>
- Testud, F., Martin, J. C., Descotes, J. et Conso, F. (2000). Intoxications liées à la substitution des hydrocarbures halogénés - Revue de la littérature. *Archives des maladies professionnelles*, 61(4), 278-281.

- Thivierge, C. (2012). Un site Web pour trouver des solutions appropriées. *Solub : Substitution des solvants en milieu de travail. Prévention au travail*, 25(1), 23. Tiré de http://www.irsst.qc.ca/media/documents/fr/prev/v25_01/23.pdf
- Tobiszewski, M., Tsakovski, S., Simeonov, V., Namieśnik, J. et Pena-Pereira, F. (2015). A solvent selection guide based on chemometrics and multicriteria decision analysis. *Green Chemistry*, 17(10), 4773-4785.
- U.S. DA (2018) USDA BioPreferred® Program Product Categories by Function. Washington, DC: United States Department of Agriculture. Tiré de <https://www.biopreferred.gov/BioPreferred/faces/pages/ProductCategories.xhtml>
- U.S. EPA. (1997). *Cleaner Technologies Substitutes Assessment: Lithographic Blanket Washes*. EPA 744-R-97-006. Design for the Environment Program. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency. Tiré de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/200019PJ.PDF?Dockey=200019PJ.PDF>
- U.S. EPA. (1998). *Cleaner Technologies Substitutes Assessment for Professional Fabricare Processes*. EPA 744-B-98-001. Office of Pollution Prevention and Toxics, Economics, Exposure and Technology Division. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency. Tiré de <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/200012OG.PDF?Dockey=200012OG.PDF>
- U.S. EPA. (2009). EPA's Safer Choice Criteria for Solvents. Office of Pollution Prevention & Toxics, Safer Choice Program. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency. Tiré de https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-02/documents/dfe_screen_for_solvents_in_cleaning_products_february2009.pdf
- U.S. EPA. (2014). *Program for Assisting the Replacement of Industrial Solvents - PARIS III - User's Guide*. Cincinnati, OH. EPA/600/R-13/177. National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, Washington, DC: United States Environmental Protection Agency. Tiré de <https://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100HVTD.pdf>
- U.S. EPA. (2015). *EPA's Safer Choice Standard*. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency. Tiré de <https://www.epa.gov/sites/production/files/2013-12/documents/standard-for-safer-products.pdf>
- UL. (2010). *Certificate of compliance - Wilsonart Adhesives, Wilsonart® 1700/1701 Low VOC, Contact Adhesive*. Northbrook, Illinois: Underwriters Laboratories. Tiré de <https://wilsonart.app.box.com/v/WA1700SeriesLowVOCContactAdhes>
- UL. (2011a). *Adhesives*. UL 2762. Northbrook, Illinois: Underwriters Laboratories.
- UL. (2011b). *Paint and Varnish Remover*. UL 2767. Northbrook, Illinois: Underwriters Laboratories.
- UL. (2011c). *Sealants and Caulking Compounds*. Northbrook, Illinois: UL 2761, Northbrook, Illinois: Underwriters Laboratories.
- UL. (2011d). *Standard for Sustainability for Hard Surface Cleaners*. UL2759. Northbrook, Illinois: Underwriters Laboratories.
- UL. (2011e). *Sustainability for Architectural Surface Coatings*. UL 2768. Northbrook, Illinois: Underwriters Laboratories. Tiré de <https://industries.ul.com/environment/certificationvalidation-marks/ecologo-product-certification>
- UL. (2012a). *Printing Inks*. UL 2801. Northbrook, Illinois: Underwriters Laboratories. Tiré de <https://industries.ul.com/environment/certificationvalidation-marks/ecologo-product-certification>
- UL. (2012b). *Standard for Sustainability for Cleaning and Degreasing Compounds: Biologically-based*. UL 2792. Northbrook, Illinois: Underwriters Laboratories.

- UL. (2013). *GREENGUARD Certification Program for Chemical Emissions for Cleaners and Cleaning Maintenance Systems*. UL 2820. Northbrook, Illinois: Underwriters Laboratories.
- UL. (2018). *UL GREENGUARD Certification Program Method for Measuring and Evaluating Chemical Emissions From Building Materials, Finishes and Furnishings*. UL 2820. Northbrook, Illinois: Underwriters Laboratories.
- Urbina, I. (2013). As OSHA Emphasizes Safety, Long-Term Health Risks Fester. *The New York Times*. Tiré de <https://www.nytimes.com/2013/03/31/us/osa-emphasizes-safety-health-risks-fester.html>
- Vaddula, B. R., Yalla, S. et Gonzalez, M. A. (2014). Opportunities for the Replacement/Minimization of Selective Hazardous Solvents: Applications, Concerns and Approaches To Identify Alternatives. Dans S. O. Obare et R. Luque (Édit.), *Green Technologies for the Environment* (p. 69-113). ACS Symposium Series, Vol. 1186. Washington, DC: American Chemical Society.
- Vézina, M., Cloutier, E., Stock, S., Lippel, K., Fortin, É., Delisle, A., . . . Prud'homme, P. (2011). *Enquête québécoise sur des conditions de travail, d'emploi et de santé et de sécurité du travail (EQCOTESST): Rapport R-691*. Québec et Montréal: Institut national de santé publique du Québec, Institut de la statistique du Québec et Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. Tiré de <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-691.pdf>
- Virent. (2015). *BioForm[®] Aromatic 100 Solvent*. Madison, WI: Virent, Inc. Tiré de <http://www.virent.com/wordpress/wp-content/uploads/2015/06/ARO-100-data-sheet-June-2015.pdf>
- Virent. (2016). *Safety Data Sheet: Virent BioForm[®] Aromatic 100 solvent*. Madison, WI : Virent, Inc. Tiré de http://www.virent.com/wordpress/wp-content/uploads/2016/01/Virent_BioForm_Aromatic_100_solventUS.pdf
- Vriet, C. et Mouloungui, Z. (2008). Les carbonates organiques - Une famille de composés méconnue. *L'actualité chimique*, N^o 315, 19-27. Tiré de <http://www.lactualitechimique.org/Les-carbonates-organiques-une-famille-de-composes-meconnue>
- Wazeer, I., Hayyan, M. et Hadj-Kali, M. K. (2017). Deep Eutectic Solvents: Designer Fluids for Chemical Processes. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 93(3), 945-958.
- Whittaker, M. H. et Heine, L. G. (2013). Chemicals Alternatives Assessment (CAA): Tools for Selecting Less Hazardous Chemicals. Dans R. E. Hester et R. M. Harrison (Édit.), *Chemical Alternatives Assessments* (p. 1-43). Issues in Environmental Science and Technology No. 36. Cambridge, UK: Royal Society of Chemistry.
- Wiersma, R. (2014). Formula for success in developing advanced solvent blends. *Polymer Paint Colour Journal*, 204(4592), 54-55.
- Wilsonart LLC. (2013). *Wilsonart[®] 1700 Contact Adhesive Low VOC*. Temple, TX.
- Wilsonart (2016) *Wilsonart 1700/1701 Adhesive Safety Data Sheet*. SDS# 30047, Version 2. Temple, TX: Wilsonart LLC.
- Wolf, K. et Morris, M. (2006). Assessment, Development and Demonstration of Alternatives for Five Emerging Solvents. Glendale, CA: Institute for Research and Technical Assistance. Tiré de <http://www.irta.us/reports.html>
- 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). New York, NY: Springer.

- Wypych, A. et Wypych, G. (2014). *Databook of Green Solvents*. Toronto, ON: ChemTec Publishing.
- Yara-Varón, E., Li, Y., Balcells, M., Canela-Garayoa, R., Fabiano-Tixier, A.-S. et Chemat, F. (2017). Vegetable Oils as Alternative Solvents for Green Oleo-Extraction, Purification and Formulation of Food and Natural Products. *Molecules*, 22(9), 1474. Tiré de www.mdpi.com/1420-3049/22/9/1474/pdf
- Yerty, J., Klingenberg, M., Berman, E. et Voevodin, N. (2012). Are Ionic Liquids Right for Your Parts Cleaning Job? *Product Finishing*, 76(7), 38-42. Tiré de <https://www.pfonline.com/articles/are-ionic-liquids-right-for-your-parts-cleaning-job>
- Zarogiannis, P., Nwaogu, T. A., Tuffnell, N. et Lucas, B. (2007). *Impact Assessment of Potential Restrictions on the Marketing and Use of Dichloromethane in Paint Strippers. Final Report prepared for European Commission Directorate-General Enterprise and Industry by Risk & Policy Analysts Limited*. Loddon, Norfolk, UK. Tiré de <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b9daf67a-98fc-4ca9-ab30-441dae1e1965>
- Zhang, Q., De Oliveira Vigier, K., Royer, S. et Jérôme, F. (2012). Deep eutectic solvents: syntheses, properties and applications. *Chemical Society Reviews*, 41(21), 7108-7146.
- Zhang, Y., Bakshi, B. R. et Sahle Demessie, E. (2008). Life Cycle Assesment of an Ionic Liquid versus Molecular Solvents and Their Applications. *Environ. Sci. Technol.*, 42(5), 1724-1730.
- Zhu, S., Chen, R., Wu, Y., Chen, Q., Zhang, X. et Yu, Z. (2009). A Mini-Review on Greenness of Ionic Liquids. *Chemical & Biochemical Engineering Quarterly*, 23(2), 207-211.
- Zhu, Y., Romain, C. et Williams, C. K. (2016). Sustainable polymers from renewable resources. *Nature*, 540, 354-362.

ANNEXE A : SOLVANTS VERTS – NOMENCLATURE

Anglais	Français
Agro-solvent	Agrosolvant ⁷⁶
Alternative solvent	Solvant de rechange
Benign solvent	Solvant doux
Bio-based solvent	Solvant biosourcé
Biodegradable solvent	Solvant biodégradable
Bio-derived solvent	Solvant biosourcé
Biogenic solvent	Solvant biogène ⁷⁷
Biological solvent (water)	Solvant biologique (eau)
Biosolvent	Biosolvant ⁷⁸
Bio-sourced solvent	Solvant biosourcé
Deep eutectic solvent (DES)	Solvant eutectique profond ⁷⁹
Designer solvent	Solvant sur mesure
Dense phase fluid	Fluide dense
Eco-efficient solvent	Solvant respectueux de l'environnement
Ecofriendly solvent	Solvant écologique
Ecological solvent	Solvant écologique
Environment-friendly solvent	Solvant écologique
Green solvent	Solvant vert
Ionic liquid	Liquide ionique
Natural deep eutectic solvent (NADES)	Solvant eutectique profond biosourcé
Natural solvent	Solvant naturel
Neoteric solvent	Solvant moderne, nouveau solvant ⁸⁰
Non-flammable solvent	Solvant ininflammable Solvant non inflammable
Non-HAP solvent	Solvant sans HAP ⁸¹
Non-hazardous solvent	Solvant non dangereux
Non-toxic solvent	Solvant non toxique Solvant atoxique
Non-VOC solvent	Solvant sans COV ⁸²

⁷⁶ Solvants issus de produits naturels d'origine agricole. Cela inclut l'arboriculture (partie de l'agriculture qui a pour objet la culture des plantes ligneuses), mais pas la sylviculture (exploitation des arbres forestiers).

⁷⁷ Solvant qui est produit, engendré par des organismes vivants, p. ex. : le d-limonène.

⁷⁸ Solvant issu de la biomasse.

⁷⁹ Désigne un mélange de constituants qui présente un point de fusion largement inférieur au point de fusion des constituants purs.

⁸⁰ Cette catégorie englobe les liquides ioniques, le CO₂ supercritique, les solvants accordables ou commutables, et même les systèmes de solvants aqueux.

⁸¹ <https://www.epa.gov/haps>

Anglais	Français
Plant-based solvent	Solvant à base de plante
Renewable solvent	Solvant renouvelable
Room temperature ionic liquid (RTIL)	Liquide ionique à la température de la pièce
Safer solvent	Solvant plus sécuritaire
Safety solvent	Solvant sécuritaire
Substitute solvent	Solvant substitutif
Supercritical carbon dioxide	Dioxyde de carbone supercritique
Supercritical fluid	Fluide supercritique ⁸³
Sustainable solvent	Solvant durable, solvant écologique
Tunable solvent	Solvant réglable ⁸⁴ , solvant accordable, commutable ou solvant à propriétés variables

⁸² Composé organique volatil; voir la définition de COV à l'article 65 de l'annexe 1 de la LCPE : <https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/c-15.31/>

⁸³ Substance au-dessus des température et pression critiques. Température critique = température maximale à laquelle un gaz ou une vapeur peut être liquéfié par variation de sa pression uniquement (p. ex. : CO₂ : 31 °C). Pression critique = pression limite au-dessus de laquelle on n'observe pas de discontinuité entre la phase gazeuse et la phase liquide, quelle que soit la température.

⁸⁴ Catégorie de solvants dont fait partie les solvants commutables (Abou-Shehada, Clark, Paggiola et Sherwood (2016)).

ANNEXE B : LISTE DES SUBSTANCES ET LEUR N^o CAS⁸⁵ CORRESPONDANT

Substance	n ^o CAS
Acétate de 1,5-diazabicyclo[4.3.0]non-5-ène	64933-92-2
Acétate de 1-éthyl-3-méthylimidazolium (EMIM)	143311-17-4
Acétate de butyle	123-86-4
Acétate de 1-éthoxypropan-2-yl	54839-24-6
Acétate de méthyle	79-20-9
Acétate d'éthyle	141-78-6
Acétate d'isoamyle	123-92-2
Acétone	67-64-1
Acide lactique	50-21-5
Acide lévulinique	123-76-2
Adipate diméthylque	627-93-3
Alcool amylique; pentanol normal	71-41-0
Alcool isoamylique; 3-méthyl-1-butanol	123-51-3
Alcool tétrahydrofurfurylique (THFA)	97-99-4
Amidon	9005-25-8
Ammonium, cation	14798-03-9
Astaxanthine; 3,3'-dihydroxy-β-carotène-4,4'-dione	472-61-7
Benzène	71-43-2
1-Bromopropane	106-94-5
Butan-1-ol	71-36-3
t-Butanol	75-65-0
2-Butanone (MEK); méthyléthylcétone	78-93-3
2-Butoxyéthanol; éther monobutylique de l'éthylène glycol	111-76-2
γ-Butyrolactone; gamma-butyrolactone	96-48-0
Caféine	58-08-2
Carbonate de diméthyle	616-38-6
Carbonate de propylène	108-32-7
Carbonate d'isoamyle et de méthyle; carbonate de méthyl 3-méthylbutyle	228273-02-7
Carbone 14 (¹⁴ C); isotope de masse 14 du carbone	14762-75-5
Cellulose	9004-34-6
p-Chloro trifluorométhyl benzène (PCBTF); parachlorotrifluorométhylbenzène	98-56-6
Chlorure de choline; chlorure de triméthyl-hydroxyéthylammonium	67-48-1
Décaméthylcyclopentasiloxane (D5)	541-02-6

⁸⁵ Numéro d'enregistrement assigné par le *Chemical Abstracts Service* de l'*American Chemical Society* (Columbus, Ohio) : <http://support.cas.org/content/chemical-substances/faqs>. Ce numéro permet d'obtenir facilement de l'information physicochimique et toxicologique en consultant p. ex. : le Répertoire toxicologique (<http://www.csst.qc.ca/prevention/reptox/pages/repertoire-toxicologique.aspx>) et la base de données ChemIDplus : <https://chem.nlm.nih.gov/chemidplus/>.

Substance	n° CAS
Décaméthyltétrasiloxane	141-62-8
1,1-Dichloro-1-fluoroéthane	1717-00-6
Dichlorométhane (DCM)	75-09-2
2,2-Diméthyl-1,3-dioxolane-4-méthanol	100-79-8
N,N-Diméthylformamide (DMF)	68-12-2
Dioxyde de carbone; anhydride carbonique; gaz carbonique	124-38-9
Disulfure de molybdène	1317-33-5
Dodécaméthylpentasiloxane	141-63-9
Eau	7732-18-5
Esters diméthyliques d'acides dicarboxyliques en C ₄ -C ₆ (DBE)	129757-70-6
Éthanol	64-17-5
Éther diéthylique	60-29-7
3-Éthoxypropanoate d'éthyle	763-69-9
Éthylène glycol	107-21-1
Éthylsulfate d'EMIM	342573-75-5
Glutarate diméthylique	1119-40-0
Glycérine; glycérol	56-81-5
Hémicellulose	9034-32-6
Hexafluorophosphate, anion	16919-18-9
Hexaméthylidisiloxane	107-46-0
n-Hexane	110-54-3
Huile de fusel	8013-75-0
Huile de paraffine	98042-47-5
Huile végétale	68956-68-3
Hydrofluoroéther-7100; HFE-7100 ⁸⁶	219484-64-7
Imidazole	288-32-4
Isobutanol	78-83-1
Isopropanol; alcool isopropylique	67-63-0
Isovalérate d'éthyle; carbonate d'éthyl-2-méthylpropyle	108-64-5
Lactate de 2-éthylhexyle	186817-80-1
Lactate d'éthyle	97-64-3
Laurate de méthyle	111-82-0
Lignine	9005-53-2
d-Limonène; (+)-Limonène	5989-27-5
Méthanol; alcool méthylique	67-56-1
N-Méthyl-2-pyrrolidone (NMP)	872-50-4

⁸⁶ Le HFE-7100 est maintenant connu sous l'appellation *Novectm™ 7100 Engineered Fluid*, fabriqué par la société 3M (<http://multimedia.3m.com/mws/media/1998180/3mtm-novectm-7100-engineered-fluid.pdf>). Ce solvant est un mélange de deux isomères : 40 % de 1-méthoxy-1,1,2,2,3,3,4,4-nonafluorobutane (n° CAS 163702-07-6) et 60 % de 1-méthoxy-2-trifluorométhyl-1,1,2,3,3,3-hexafluoropropane (n° CAS 163702-08-7).

Substance	n° CAS
2-Méthyltétrahydrofurane	96-47-9
Nicotine	54-11-5
Nitrate, anion	14797-55-8
Octaméthylcyclotétrasiloxane (D4)	556-67-2
Octaméthyltrisiloxane	107-51-7
Oxyde d'éthylène	75-21-8
Ozone	10028-15-6
Pétrole	8002-05-9
Phénol	108-95-2
Phosponium, cation	16749-13-6
α -Pinène	80-56-8
β -Pinène	127-91-3
Poly(diméthylsiloxane)	63148-62-9
Poly(éthylène glycol) (PEG)	25322-68-3
Polysiloxanes; silicones	63148-53-8
4-Propyl-2,6-diméthoxyphénol	6766-82-1
Propylène glycol	25322-69-4
1-Propyl-3-méthoxy-4-hydroxybenzène	2785-87-7
Soyate de méthyle; esters méthyliques d'huile de soya	67784-80-9 et 68919-53-9
Succinate diméthylque	106-65-0
Térébenthine	8006-64-2
α -Terpinéol	98-55-5
Tétrachloréthylène; perchloréthylène; tétrachloroéthylène, perchloroéthylène (PERC)	127-18-4
Tétrafluoroborate, anion	14874-70-5
Tétrahydrofurane (THF)	109-99-9
Toluène	108-88-3
1,1,1-Trichloréthane; 1,1,1-trichloroéthane (TCA)	71-55-6
Trichloréthylène; trichloroéthylène (TCE)	79-01-6
Urée	57-13-6
Xylène (isomères o, m, p)	1330-20-7

N.B. Ce tableau liste les substances mentionnées dans cette monographie pour lesquelles il existe un n° CAS. Ces substances incluent des solvants verts, des solvants classiques et des substances qui ne sont pas des solvants.