

OUTILS D'AIDE À LA SUBSTITUTION DES SUBSTANCES TOXIQUES HORS SOLVANTS

Par

Fatim B. Diallo, M.Sc.
Denis Bégin, chimiste, M.Sc.
Maximilien Debia, M.Sc.
Michel Gérin, chimiste, Ph.D.

Département de santé environnementale et santé au travail
Faculté de médecine
Université de Montréal

Pour

**L'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du
travail**

Convention de coopération 06_CRD_33

Décembre 2008

RÉSUMÉ

Introduction

La substitution est une méthode de prévention qui consiste à éliminer l'utilisation d'une substance dangereuse en la remplaçant par une autre moins dangereuse ou par un procédé différent. Elle occupe le premier rang dans la hiérarchie des méthodes de prévention des risques associés à l'exposition aux substances dangereuses. Il s'agit d'une approche complexe nécessitant plusieurs étapes et devant considérer divers facteurs tels que la santé et la sécurité du travail, l'environnement, la faisabilité technique, les coûts, mais aussi les facteurs humains et organisationnels. Réaliser un projet de substitution nécessite de disposer de méthodes et d'outils pour mettre en place le processus et comparer les différentes solutions de remplacement envisagées. L'objectif de ce travail était de recenser les outils d'aide à la substitution disponibles plus spécifiquement pour les substances toxiques qui ne sont pas des solvants, ces derniers ayant fait l'objet d'un précédent rapport.

Méthodologie

Une recherche documentaire exhaustive a été effectuée dans sept bases de données bibliographiques et sur les sites Web d'organismes de plusieurs pays tels que les États-Unis, la France, l'Allemagne ou le Danemark. Divers mots-clés se rapportant à la substitution et à la comparaison des produits chimiques dangereux ont été utilisés pour effectuer la recherche. Des moteurs de recherche généralistes ont également été consultés.

Résultats

Les outils d'aide à la substitution sont regroupés en cinq catégories : 1) démarches générales de substitution, dont diverses procédures par étapes qui s'adressent essentiellement aux entreprises ainsi que des cadres de référence très complets tels que celui du Lowell Center Alternatives Assessment Framework ou du U.S. EPA, 2) outils d'évaluation et de comparaison des substituts potentiels dont quatorze ont été recensés, 3) divers outils auxiliaires (bases de données, modèles) alimentant en données les outils précédents, 4) banques de cas de substitution, dont quatre sont présentées plus en détail et 5) documentation spécifique provenant de divers organismes gouvernementaux et paragouvernementaux. Parmi les outils d'évaluation et de comparaison, qui sont le cœur de ce rapport, on peut distinguer les outils spécialisés quant aux types de substances couvertes, comme PestScreen pour les pesticides et GISBAU/GISCODE pour les produits du domaine de la construction. On note également trois outils limités aux aspects environnementaux, CHEMS, la matrice à cinq niveaux et PestScreen. Les approches de gestion graduée des produits chimiques (« control banding ») telles que la méthodologie d'évaluation simplifiée du risque chimique de l'INRS ou le Stoffenmanager bien que non destinées spécifiquement à la substitution permettent d'attribuer relativement simplement des scores à diverses substances dans la situation concrète de petites et moyennes

entreprises. Le modèle à colonnes a quant à lui été développé spécifiquement dans une perspective de substitution en entreprise dans le contexte réglementaire allemand. Il s'appuie en grande partie sur les renseignements présents sur les fiches de données de sécurité et sur les phrases de risque, mais il laisse à l'utilisateur une large marge de manœuvre pour pondérer les catégories prises en compte. Quick Scan est un autre outil relativement complet et s'appuyant en partie sur les phrases de risque. Destiné à l'évaluation des substances par les industriels néerlandais dans le cadre de l'implantation de REACH, il permet cependant une évaluation du niveau de préoccupation des substances en tenant compte de leurs utilisations prévues. Green Screen a une approche très large, incluant le cycle de vie, mais basée uniquement sur les propriétés dangereuses inhérentes des substances. IRCHS et P2OASys sont des systèmes relativement complets qui intègrent un grand nombre de paramètres et mènent à un indice chiffré. Les deux outils sont cependant complexes, exigeant la consultation de banques de données et parfois l'utilisation de modèles. P2OASys, spécifiquement développé pour les entreprises, plutôt que pour les gouvernements ou les grands industriels, est plus souple qu'IRCHS (présence d'un tableur et diverses pondérations possibles).

Conclusion

Il n'y a pas d'outil d'aide à la substitution propre aux substances hors solvants. La majorité des outils est complexe à l'encontre de certains outils destinés exclusivement au domaine des substances volatiles. Le recours à un expert est le plus souvent nécessaire p. ex. pour valider les informations contenues dans les FDS, pallier le manque d'information pour certaines substances et pour pondérer les catégories de danger en fonction de la situation concrète d'une entreprise. Les contraintes de temps et d'argent vont moduler le choix de l'outil approprié dans une situation donnée. Ainsi, les PME auront avantage à l'utilisation d'outils simples comme le modèle à colonnes, mais également à avoir recours aux banques de cas et éventuellement au réseautage par Internet. Finalement, il y a un réel besoin de développer de nouveaux outils de comparaison des substances toxiques hors solvants, ciblant des substances ou familles de substances particulières de par leur nature physique ou leur fonction.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
SIGLES ET ACRONYMES.....	vii
1. Introduction.....	9
2. Méthodologie	10
3. Résultats.....	12
3.1 Démarches générales de substitution	12
3.1.1 Synthèse des démarches s'inspirant de la méthodologie de Filskov et coll.	12
3.1.2 PRIO	14
3.1.3 Lowell Center Alternatives Assessment Framework.....	15
3.1.4 Méthodologie du TURI.....	16
3.1.5 Cleaner Technologies Substitutes Assessment	17
3.2 Outils d'évaluation et de comparaison des substituts potentiels.....	19
3.2.1 Méthodes de gestion graduée.....	19
3.2.1.1 Méthodologie d'évaluation simplifiée du risque chimique	19
3.2.1.2 Stoffenmanager	21
3.2.2 Le modèle à colonnes.....	22
3.2.3 GISCODE	23
3.2.4 P2OASys.....	24
3.2.5 IRCHS.....	25
3.2.6 Quick Scan.....	28
3.2.7 CARS	29
3.2.8 Cradle-to-Cradle Design Protocol.....	30
3.2.9 Green Screen.....	30
3.2.10 Chemical Substitution Tree.....	32
3.2.11 La matrice d'évaluation à cinq niveaux.....	33
3.2.12 CHEMS.....	35
3.2.13 PestScreen	38
3.3 Outils auxiliaires	40
3.3.1 Bases de données physicochimiques et toxicologiques.....	40
3.3.2 Valeurs limites d'exposition	40
3.3.3 Modèles QSAR	41
3.4 Banques de cas de substitution	41
3.4.1 Catsub	42
3.4.2 SubChem (Sustainable substitution of hazardous chemicals)	42
3.4.3 Enviroclub.....	42
3.4.4 Centre canadien d'information sur la prévention de la pollution	43
3.5 Documentation spécifique	43
3.5.1 PNUE	43
3.5.2 TURI	44
3.5.3 LCSP	44

3.5.4 AGS.....	44
3.5.5 KEMI	45
3.5.6 INRS	45
3.5.7 AFSSET	45
3.5.8 U.S. EPA.....	46
3.5.9 D-EPA.....	46
3.5.10 DPPEA.....	46
3.5.11 Ministère de la Défense des États-Unis	47
3.5.12 Gouvernement britannique.....	47
3.5.13 NIST.....	47
4. Discussion.....	49
4.1 Démarches générales de substitution.....	49
4.2 Outils d'évaluation et de comparaison des substituts potentiels.....	50
4.2.1 Méthodes de gestion graduée.....	50
4.2.1.1 Méthodologie d'évaluation simplifiée du risque chimique	50
4.2.1.2 Stoffenmanager	51
4.2.2 Le modèle à colonnes.....	51
4.2.3 GISCODE	52
4.2.4 P2OASys.....	52
4.2.5 IRCHS.....	53
4.2.6 Quick Scan.....	54
4.2.7 CARS et Cradle-to-Cradle Design Protocol	54
4.2.8 Green Screen.....	55
4.2.9 CST	55
4.2.10 Matrice d'évaluation à cinq niveaux.....	56
4.2.11 CHEMS.....	56
4.2.12 PestScreen.....	56
4.2.13 Synthèse.....	57
4.3 Banques de cas et documentation spécifique.....	64
5. Recommandations.....	65
6. Bibliographie.....	66
Annexe 1 : CTSA.....	76
Annexe 2 : Le modèle à colonnes.....	80
Annexe 3 : P2OASys	83
Annexe 4 : IRCHS	86
Annexe 5 : Quick Scan	88
Annexe 6 : Green Screen	91
Annexe 7 : Chemical Substitution Tree.....	97
Annexe 8 : Matrice d'évaluation à 5 niveaux.....	98
Annexe 9 : Bases de données physicochimiques et toxicologiques	102
a. HSDB	102
b. Gestis.....	102
c. eChemPortal.....	103
Annexe 10 : Modèles QSAR.....	105
a. EPI Suite.....	105
b. PBT Profiler	106

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Matrice d'évaluation à cinq niveaux	34
Tableau II : Assignation des sous-scores pour chacun des indicateurs de danger du pesticide	39
Tableau III : Assignation du niveau de préoccupation du pesticide selon la valeur du PestScore	40
Tableau IV : Grille comparative des outils d'évaluation et de comparaison des substituts potentiels	59
Tableau V : Attribution du score I_{tox} en fonction de la valeur limite d'exposition professionnelle sur 8h	86
Tableau VI : Attribution du score I_{cancer} en fonction du classement du U.S. EPA ou de l'ACGIH	86
Tableau VII : Attribution du score I_{pv} en fonction de la pression de vapeur de la substance à 25 °C	86
Tableau VIII : Attribution du score de pulvéulence I_{pb} pour les solides	87
Tableau IX : Attribution du score de pulvéulence I_{pb} pour les liquides	87
Tableau X : Détermination du niveau de danger	88
Tableau XI : Détermination du niveau de préoccupation pour les propriétés PBT	89
Tableau XII : Détermination du niveau de préoccupation selon les effets sur la santé	90
Tableau XIII : Détermination du niveau de préoccupation en fonction du danger de la substance et de son utilisation	90
Tableau XIV : Détermination du niveau de danger selon les propriétés PBT - Première étape	98
Tableau XV : Détermination du niveau de danger selon les propriétés PBT - Seconde étape	99
Tableau XVI : Détermination du niveau de danger selon la mobilité intrinsèque	100
Tableau XVII : Détermination du potentiel d'exposition selon la quantité utilisée	100
Tableau XVIII : Détermination du niveau de risque selon les conditions d'utilisation..	101

SIGLES ET ACRONYMES

ACGIH : American Conference of Governmental Industrial Hygienists
AFSSET : Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail
AIHA : American Industrial Hygiene Association
BGIA: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz (Institut pour la protection du travail des caisses mutuelles d'assurance accident)
BauA : Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Institut allemand de sécurité et de santé au travail)
CAA : Clean Air Act
CAS : Chemical Abstracts Service
CCIPP : Centre canadien d'information sur la prévention de la pollution
CHEMS : Chemical Hazard Evaluation for Management Strategies
CIRC : Centre international de recherche sur le cancer
CMR : Cancérogène, mutagène, reprotoxique
CMTI : Clean Manufacturing Technology Institute
COSHH : Control of Substances Hazardous to Health
CPA : Clean Production Action
CRAM : Caisse régionale d'assurance maladie
CST : Chemical Substitution Tree
CTSA : Cleaner Technologies Substitutes Assessment
DBO : Demande biologique en oxygène
DDT : Dichlorodiphényltrichloroéthane
décaBDE : Décabromodiphényléther
DEHP: Phtalate de bis(2-éthylhexyle)
D-EPA : Danish Environmental Protection Agency
DfE : Design for the Environment
DIVS : Danger immédiat pour la vie ou la santé
DJA : Dose journalière acceptable
DT : Dissipation Time
FBC : Facteur de bioconcentration
FDS : Fiche de données de sécurité
GISBAU : Gefahrstoff-Informationssystem der BG BAU (Système d'information sur les substances dangereuses du regroupement des caisses mutuelles d'accident)
HBCDD : Hexabromocyclododécane
HSDB : Hazardous Substances Data Bank
HSE : Health and Safety Executive
HWQC : Human Health Water Quality Criteria
IDLH: Immediately Dangerous for Life or Health
INRS : Institut national de recherche et de sécurité
IRCHS : Indiana Relative Chemical Hazard Score
KEMI : Swedish Chemicals Agency
LCSP : Lowell Center for Sustainable Production
LO(A)EL : Lowest Observed (Adverse) Effect Level
LRTP : Long-range Transport Potential

MBDC : McDonough Braungart Design Chemistry
NESHAP : National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants
NFPA : National Fire Protection Association
NIOSH : National Institute for Occupational Safety and Health
NO(A)EL : No Observed (Adverse) Effect Level
OCDE : Organisation de coopération et de développement économiques
OPPTS : Office of Pollution Prevention and Toxics
OSHA : Occupational Safety and Health Administration
P2OASys : Pollution Prevention Options Analysis System
PAN : Pesticide Action Network
PBT : Persistant, bioaccumulable, toxique
PEL : Permissible Exposure Limit
PME : Petite et moyenne entreprise
PNUE : Programme des Nations unies pour l'environnement
POPs : Persistent Organic Pollutants
QSAR : Quantitative Structure Activity Relationship
REACH : Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals
RfC : Reference Concentration
RfD : Reference Dose
SAR : Structure Activity Relationship
SGH : Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques
SMILES : Simplified Molecular Line Entry System
STEL : Short Term Exposure Limit
TBBPA : Tétrabromobisphénol A
TLV : Threshold Limit Value
TRGS : Technische Regeln für Gefahrstoffe (Technical Rules for Hazardous Substances)
TRI : Toxics Release Inventory
TURI : Toxics Use Reduction Institute
UE : Union européenne
U.S. EPA : United States Environmental Protection Agency
VHR : Vapour Hazard Ratio
VLE : Valeur limite d'exposition professionnelle
vPvB : very Persistent, very Bioaccumulative

1. Introduction

La substitution est une méthode de prévention qui consiste à éliminer l'utilisation d'une substance dangereuse en la remplaçant par une autre moins dangereuse ou par un procédé différent. Elle occupe le premier rang dans la hiérarchie des méthodes de prévention des risques associés à l'exposition aux substances dangereuses (25, 87). L'intégration du principe de substitution dans les textes réglementaires est un des moyens utilisés pour favoriser la recherche et la mise en œuvre de solutions de remplacement. En France par exemple, l'article R4412-66¹ (85) du Code du travail exige la substitution des agents cancérigènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction de catégories 1 et 2. Au niveau européen, l'article 6 de la directive 98/24/CE² (28) mentionne dans ses paragraphes 1 et 2 que « l'employeur veille à ce que les risques que présente un agent chimique dangereux pour la sécurité et la santé des travailleurs sur le lieu de travail soient réduits au minimum » et que « pour l'application du paragraphe 1, l'employeur aura de préférence recours à la substitution, c'est-à-dire qu'il évitera d'utiliser un agent chimique dangereux en le remplaçant par un agent ou procédé chimique qui, dans les conditions où il est utilisé, n'est pas dangereux ou est moins dangereux pour la sécurité et la santé des travailleurs, selon le cas ». De plus, le règlement REACH³ (79) entré en vigueur en juin 2007 donne une grande place à la substitution. En effet, il y est prévu que toute demande d'autorisation devra comprendre une analyse des substances ou technologies de remplacement potentielles, y compris, le cas échéant des informations sur les activités de recherche et de développement prévues ou déjà en cours en vue de développer de telles solutions de remplacement (117).

La substitution est une approche complexe nécessitant plusieurs étapes et devant considérer divers facteurs tels que la santé et la sécurité du travail, l'environnement, la faisabilité technique, les coûts mais aussi les facteurs humains et organisationnels (49). Du fait de cette complexité, réaliser un projet de substitution nécessite de disposer de méthodes et d'outils pour mettre en place le processus et comparer les différentes solutions de remplacement envisagées. Peu de revues de la littérature ont d'ailleurs été effectuées sur ce sujet. Citons les travaux d'Edwards et coll. portant sur les méthodes et les outils disponibles dans le cadre d'une stratégie de réduction des risques liés aux substances toxiques (39). Neuf outils incluant des démarches générales de substitution, des outils de comparaison ainsi qu'un logiciel de prédiction sont sommairement décrits dans cette revue. Lanters et Piringer ont également étudié divers outils utiles dans la gestion du risque chimique (outils de gestion graduée des produits chimiques, de substitution et d'évaluation de l'exposition) (68).

Dans le cas des substances chimiques volatiles, des méthodes spécifiques (p. ex. le calcul d'un indice de danger) aidant à leur comparaison dans le but de faire de la substitution

¹ Voir les articles R4412-60 et R4412-66 du Code du travail français à l'adresse URL suivante : <http://www.legifrance.gouv.fr>

² Voir : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1998:131:0011:0023:FR:PDF>

³ Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals. Voir à l'adresse suivante: <http://reach.jrc.it/>

ont été développées depuis plusieurs années et une revue de la littérature sur les méthodes disponibles pour les solvants a été récemment réalisée par notre groupe de recherche (12). Lorsque l'on s'intéresse spécifiquement aux substances autres que les solvants, la littérature scientifique sur les outils d'aide à la substitution a été peu documentée. C'était l'objectif du présent travail d'effectuer une telle recension.

2. Méthodologie

Une recherche documentaire exhaustive a été réalisée dans les bases de données bibliographiques afin d'identifier les articles scientifiques et techniques concernant les outils d'aide à la substitution se rapportant aux substances dangereuses. Ces bases de données sont les suivantes : Embase⁴, Références SST⁵, SciFinder Scholar⁶, Toxline⁷, PubMed⁸, Engineering Village⁹, NTIS¹⁰ (United States Department of Commerce, National Technical Information Service). Les sites Web de certains organismes tels que le HSE¹¹ (Health and Safety Executive), le U.S. EPA¹² (U.S. Environmental Protection Agency), l'Agence danoise de protection de l'environnement (D-EPA¹³), l'INRS¹⁴ (Institut national de recherche et de sécurité) ou encore le BAuA¹⁵ (Institut allemand de sécurité et de santé au travail) ont été consultés en plus des recherches faites à l'aide des moteurs de recherche Google et Google Scholar. La recherche a été effectuée en utilisant des mots-clés tels que « substitution », « remplacement », « comparaison », « méthode », « produit chimique dangereux », « étude de cas ». Une recherche combinée avec les mêmes mots-clés a également été réalisée. Les outils identifiés portant spécifiquement sur les solvants n'ont pas été répertoriés, ayant fait l'objet d'un précédent rapport (12).

L'expression « outil d'aide à la substitution » ayant un sens assez large, le présent rapport présente une recension en diverses catégories. Cinq catégories d'outils d'aide à la substitution ont ainsi été définies :

1. Démarches générales de substitution décrivant les étapes à suivre pour mener à bien un projet de remplacement
2. Outils d'évaluation et de comparaison des substituts potentiels
3. Outils auxiliaires, alimentant en données les outils précédents
4. Banques de cas de substitution

⁴ Voir : <http://www.embase.com/>

⁵ Comprend les bases de données suivantes : CISILO, HSELINE, INRS-Bibliographie, NIOSHTIC, OSHLINE et Canadiana. Voir : <http://ccinfoweb.cchst.ca/bibliographic/search.html>

⁶ Voir : <http://www.cas.org/SCIFINDER/SCHOLAR/>

⁷ Voir : <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/htmlgen?TOXLINE>

⁸ Voir : <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/>

⁹ Voir : <http://www.engineeringvillage2.org>

¹⁰ Voir : <http://www.ntis.gov/search>

¹¹ Voir : <http://www.hse.gov.uk/>

¹² Voir : <http://www.epa.gov/>

¹³ Voir : <http://www.mst.dk/English/>

¹⁴ Voir : <http://www.inrs.fr/>

¹⁵ Voir : http://www.baua.de/nn_5568/en/Homepage.html_nnn=true

5. Documentation sur la substitution provenant de divers organismes gouvernementaux et paragouvernementaux

Rappelons qu'il n'entrait pas dans les objectifs de ce travail de rechercher dans la littérature scientifique les options spécifiques de substitution pour les différentes substances prises individuellement ou par famille (p. ex. l'amiante ou les fibres minérales).

3. Résultats

Une quarantaine d'outils et sources d'information pour réaliser des projets de substitution de substances toxiques sont décrits dans cette section ou en annexe.

3.1 Démarches générales de substitution

Six démarches générales de substitution sont décrites dans cette section.

3.1.1 Synthèse des démarches s'inspirant de la méthodologie de Filskov et coll.

Depuis une vingtaine d'années, plusieurs approches de la substitution ont été développées et certaines d'entre elles présentent des similarités. Ce sont les Danois qui ont été les précurseurs dans ce domaine en s'appuyant sur un règlement de 1982 stipulant « qu'une substance ou un matériau qui peut constituer un danger ou affecter de façon négative la sécurité ou la santé ne devrait pas être utilisée si elle peut être remplacée par une substance sans danger ou moins dangereuse ». En effet, Filskov et coll. ont formulé en 1989 une procédure en sept étapes dont l'objectif principal était la protection des travailleurs (43, 44). Cette procédure consiste en premier lieu en l'identification du problème c'est-à-dire formuler de façon précise le problème à résoudre notamment les raisons pour lesquelles l'on veut éliminer une substance particulière. En deuxième lieu, il s'agit d'identifier les solutions de remplacement qu'elles soient des produits de rechange ou des procédés de substitution. La troisième étape consiste à évaluer les conséquences de l'implantation des différentes options, lesquelles sont ensuite comparées avec la solution originale dans l'étape quatre. L'important étant de rassembler l'information la plus complète possible sur les propriétés pertinentes des substances et procédés du point de vue de la santé et de la sécurité du travail, de l'environnement, de l'efficacité technique et des coûts. Le choix potentiellement complexe d'une solution particulière parmi une série d'options (étape 5) va dépendre de la qualité et de l'exhaustivité de cette information et des critères que l'on a pu choisir à l'avance pour déterminer les priorités parmi les divers facteurs cités. Les étapes subséquentes (6 et 7) impliquent l'implantation puis l'évaluation de la substitution. L'implantation peut être effectuée de façon progressive suite à des essais et projets pilotes. L'évaluation doit porter sur l'ensemble des facteurs cités au départ et assurer qu'une amélioration sensible a été obtenue pour les paramètres recherchés (santé au travail, environnement).

Plusieurs démarches découlant de la méthodologie de Filskov et coll. décrite précédemment ont par la suite été publiées. Elle a notamment été reprise par le HSE britannique (56). Des directives¹⁶ assez similaires ont été formulées par l'Autorité norvégienne de contrôle de la pollution (Oslo) afin d'aider et d'encourager les entreprises à évaluer les substances chimiques qu'elles utilisent. Le principe de substitution y est une exigence réglementaire depuis janvier 2000. Par ailleurs, Bégin et Gérin se sont inspirés d'une revue de la littérature et de l'expérience de Callahan et Green (17) pour élaborer en

¹⁶ Voir : <http://www.sft.no/publikasjoner/kjemikalier/2007/ta2007.html>

2001 une démarche de substitution, proche des précédentes, qui a été validée par des cas concrets de substitution de solvants en entreprise. Il s'agit d'une démarche en neuf étapes décrite initialement dans le cas des solvants, mais dont les grandes lignes sont applicables de façon plus générale à toute substitution de substance dangereuse (13, 49). Les neuf étapes sont les suivantes :

1. Identification du problème : l'objectif est de faire le point sur le problème à résoudre ; l'entreprise doit expliciter les raisons motivant son désir d'éliminer une substance dangereuse (santé, sécurité, environnement, coûts ou autres). Cette étape est surtout importante dans le cas où le projet de substitution est réalisé par des personnes externes à l'entreprise.
2. Formation du comité de substitution : il s'agit d'assurer au projet une base administrative solide en formant un comité composé au minimum d'un responsable technique et d'un spécialiste en hygiène industrielle.
3. Étude du problème et définition des critères de sélection : cette étape comprend l'étude détaillée du procédé et des tâches concernant la substance à remplacer. Il est important de consulter la littérature spécialisée dans le cas de procédés complexes et d'effectuer une analyse fonctionnelle de la substance (pourquoi et comment est-elle utilisée?).
4. Propositions d'options de rechange : c'est l'étape d'inventaire des solutions de remplacement et des procédés de substitution envisageables. L'utilisation de toutes les sources d'information disponibles est nécessaire (personnel technique de l'entreprise, bases de données bibliographiques, fournisseurs, etc.).
5. Essais à petite échelle : l'objectif de cette étape est de réduire le nombre d'options retenues à l'étape précédente en procédant à des essais, notamment au laboratoire.
6. Évaluation des conséquences des options retenues : il s'agit d'évaluer les impacts potentiels des différentes options sur les plans de la santé et de la sécurité, de l'environnement, des coûts, des méthodes de travail et de la formation des employés.
7. Comparaison des options et choix : les options sont comparées entre elles et avec la situation originale avant de procéder au choix final.
8. Implantation : c'est la mise en œuvre de la solution retenue.
9. Évaluation : elle permet de mesurer l'atteinte des objectifs initiaux et d'apporter des corrections s'il y a lieu.

La méthodologie de Bégin et Gérin a été reprise en 2007 par l'INRS (60).

3.1.2 PRIO

PRIO¹⁷ est avant tout une base de données conçue par l'Agence suédoise des produits chimiques (KEMI, Sundbyberg) afin de permettre aux entreprises suédoises de trouver de l'information sur les substances qu'elles utilisent. Près de 4000 substances sont incluses dans la base de données et sont classées en deux catégories :

- Les substances à éliminer, de façon progressive, qui comprennent les substances classées CMR (cancérogène, mutagène, reprotoxique) de catégories 1 et 2, les perturbateurs endocriniens, les métaux particulièrement dangereux (mercure, cadmium, plomb et leurs composés), les substances persistantes, bioaccumulables et toxiques (PBT), les substances très persistantes et très bioaccumulables (vPvB) ainsi que les substances appauvrissant la couche d'ozone.
- Les substances devant faire l'objet prioritairement de mesures de réduction des risques qui comprennent les substances classées mutagènes de catégorie 3, les substances ayant une toxicité aiguë très élevée ou une toxicité chronique élevée, les substances allergènes, les substances pouvant causer des effets dangereux à long terme pour l'environnement et enfin les substances potentiellement PBT ou vPvB.

Les critères de classification sont basés sur l'Objectif suédois de qualité environnementale « A non-toxic environment¹⁸ » et sur la législation européenne REACH.

Selon la classification d'une substance donnée, un plan d'action est proposé à l'utilisateur. S'il s'agit d'une substance classée « substance à éliminer progressivement », il est alors recommandé d'essayer de la remplacer en utilisant la procédure en sept étapes suivante:

1. Réfléchir aux raisons pour lesquelles la substance doit être remplacée (Pourquoi et pour qui y a-t-il un problème? Quelle est la fonction de la substance?).
2. Considérer d'autres façons d'accomplir la fonction de la substance en question (Est-ce que la substance peut être remplacée par une autre? Est-ce qu'un changement dans le procédé de fabrication permettrait de se passer de la substance en question?).
3. Évaluer les solutions de remplacement retenues (Quelles sont leurs propriétés dangereuses pour la santé et l'environnement? De quelle façon l'humain et l'environnement seraient-ils exposés durant la fabrication, l'utilisation, l'élimination?).
4. Comparer les risques associés aux substituts potentiels à ceux de la substance que l'on désire remplacer (Y a-t-il des moyens de limiter les risques associés aux solutions de remplacement comparativement à ceux actuellement utilisés? Y a-t-il des différences majeures entre les solutions de remplacement? Est-ce que l'une des solutions causera plus de risques pour l'humain et l'environnement que les autres?).

¹⁷ Voir : http://www.kemi.se/templates/PRIOEngframes_4144.aspx

¹⁸ Voir: http://www.kemi.se/templates/Page_2872.aspx

5. Choisir l'option la plus adaptée (Est-ce que la substitution peut se faire? Est-ce qu'il y a des tests à effectuer? Quelles seront les différences de coût?).
6. Planifier les changements à venir (Qui sont les responsables des différentes étapes à entreprendre? Quand la solution de remplacement sera-t-elle mise en œuvre? Est-ce que les clients de la compagnie doivent être informés?).
7. Évaluer (comparer le résultat avec la description du problème faite à l'étape 1, résoudre les problèmes résiduels s'il y a lieu, créer une procédure à utiliser comme document d'aide si la compagnie a à éliminer d'autres substances, garder à l'esprit qu'une substitution doit être réévaluée s'il y a de nouvelles données relatives aux risques, de nouvelles réglementations ou de nouvelles et meilleures solutions de remplacement).

3.1.3 Lowell Center Alternatives Assessment Framework

Le Lowell Center Alternatives Assessment Framework est un cadre conçu par le Centre pour la production durable (LCSP¹⁹) de l'Université du Massachusetts pour évaluer et identifier des produits de remplacement préférables d'un point de vue environnemental (incluant la santé humaine) et social (89). Ce cadre est composé de trois éléments essentiels que sont :

- Les fondements de l'évaluation des options c'est-à-dire les buts et objectifs mesurables de l'évaluation (p. ex. avoir un environnement non toxique, n'utiliser que des matériaux qui peuvent être recyclés en circuit fermé), les principes directeurs (p. ex. prévention, principe de précaution, substitution) ainsi que les règles pour la prise de décision lors de l'évaluation des solutions de remplacement (p. ex. préférer une solution qui élimine la nécessité de l'utilisation de la substance chimique problématique ou encore utiliser des modèles d'estimation QSAR en cas de données non disponibles).
- Les processus d'évaluation qui peuvent être soit une évaluation comparative de matériaux ou produits déjà existants, soit une évaluation de la fabrication/conception pour les nouveaux produits, matériaux ou substances. Une analyse comparative impliquerait six étapes à savoir 1) l'identification de la cible (substance, produit à remplacer), 2) la caractérisation et l'établissement des priorités quant à l'utilisation finale, 3) l'identification des solutions de remplacement, 4) leur évaluation et leur comparaison, 5) le choix de l'option préférée et 6) l'évaluation.
- Les modules d'évaluation qui vont permettre de comparer les différentes options concernant la santé humaine et l'environnement (p. ex. modèle à colonnes, P2OASys, décrits plus loin), la justice sociale, la faisabilité économique (analyse du marché, des coûts, analyse coûts/avantages) et la performance technique (p. ex. évaluation par les utilisateurs finaux du produit).

¹⁹ Lowell Center for Sustainable Production. Voir : <http://sustainableproduction.org/>

3.1.4 Méthodologie du TURI

Le TURI est un institut de l'Université du Massachusetts (Lowell) créé en vertu du Massachusetts Toxics Use Reduction Act de 1989 dans le but d'assister les industries et les collectivités de cet État dans leurs efforts de réduction de l'usage des substances toxiques tout en promouvant la compétitivité économique. La méthodologie décrite ci-dessous a été développée dans le cadre d'une étude réalisée en 2006 et portant sur l'évaluation des solutions de remplacement à cinq produits chimiques (105). Cette méthodologie comprend les étapes suivantes :

Première étape : Impacts et utilisations des produits chimiques à l'étude

- a. Identification des impacts potentiels des cinq produits à l'étude à partir de bases de données publiques, de journaux scientifiques ou encore de documents provenant d'associations professionnelles. L'objectif étant d'obtenir de l'information générale sur le produit chimique, de mettre en évidence les données relatives à l'environnement, la santé et la sécurité, mais également d'établir une ligne de base à laquelle les solutions de remplacement seront comparées.
- b. Identification des utilisations des produits dans l'état du Massachusetts (principaux fournisseurs, produits dérivés et produits finis utilisant la substance comme matière première, distributeurs principaux, acteurs concernés incluant les entreprises, les associations industrielles, les groupes environnementaux, les syndicats).
- c. Établissement des utilisations prioritaires à évaluer c'est-à-dire identification d'un sous-ensemble de domaines d'utilisation au Massachusetts des substances évaluées selon leur importance, la possibilité de trouver des solutions de rechange et l'exposition potentielle des travailleurs et de la population générale.

Deuxième étape : Solutions de remplacement

- a. Identification des options de remplacement, qu'elles soient des substances, des matériaux, des changements de procédés ou d'autres solutions technologiques. Les sources d'information utilisées pour trouver ces solutions de remplacement disponibles ou émergentes incluaient le U.S. EPA, les associations professionnelles, les centres fédéraux et municipaux de recherche sur la prévention de la pollution, l'internet ou encore des experts du TURI ou d'autres universités.
- b. Évaluation préliminaire des options de remplacement pour éliminer les composés cancérigènes ou probablement cancérigènes, les PBT et ceux inclus dans la liste²⁰ des substances les plus dangereuses du Massachusetts Toxics Use Reduction Act's Science Advisory Board.
- c. Détermination des options prioritaires pour une évaluation approfondie (au nombre de 6 ou moins) en fonction de leur performance, de leur disponibilité, du

²⁰ Voir à l'adresse URL suivante :

http://www.turi.org/policy/science_advisory_board/science_advisory_board/sab_work/tura_more_and_less_hazardous_lists

lieu de fabrication (les produits ou matériaux fabriqués au Massachusetts sont prioritaires), de leurs effets sur la santé et l'environnement et des considérations économiques.

Troisième étape : Évaluation des solutions de remplacement

- a. Étude de la faisabilité technique : les exigences spécifiques (longévité, performance, caractéristiques physiques, indicateurs de qualité) sont identifiées pour chaque application.
- b. Étude de la faisabilité financière : évaluation des coûts.
- c. Évaluation des impacts sur la santé (p. ex. DL₅₀ orale et cutanée, IDLH²¹, PEL²², TLV²³, REL²⁴, irritation, RfD²⁵, cancer, corrosivité, réactivité, inflammabilité) et sur l'environnement (p. ex. persistance, bioaccumulation, toxicités aquatique aiguë et chronique, effet de serre, déplétion de la couche d'ozone) à partir des données les plus récentes provenant du U.S. EPA, du NIOSH²⁶, de OSHA²⁷ ou du CIRC²⁸.

Toutes les données techniques et celles concernant les risques pour l'environnement, la santé et la sécurité sont collectées et résumées dans un tableau. Pour chaque paramètre critique contenu dans ce tableau, une évaluation qualitative « meilleure que (+) » le produit à remplacer, « équivalente (=) » ou « pire que (-) » est indiquée.

3.1.5 Cleaner Technologies Substitutes Assessment

Le Cleaner Technologies Substitutes Assessment (CTSA) est une méthodologie d'évaluation comparative des risques, performances, coûts et conservation des ressources des options de remplacement d'une substance chimique donnée. Elle a été développée sous l'égide du programme « Design for the Environment²⁹ » du U.S. EPA par l'Université du Tennessee et d'autres partenaires du secteur industriel. Le CTSA comprend plusieurs étapes préliminaires à l'analyse comparative. Ces étapes sont notamment la préparation de la documentation nécessaire, l'identification d'un groupe de substituts potentiels (« use cluster ») ou encore la sélection d'un sous-groupe pour une évaluation approfondie. Dans le cadre du programme « Design for the Environment », des documents appelés « Industry and Use Cluster Profile » (Profils des groupes

²¹ Concentration entraînant un danger immédiat pour la vie ou la santé (Immediately Dangerous for Life or Health ou IDLH en anglais). Elles peuvent être trouvées en ligne à l'adresse URL suivante : <http://www.cdc.gov/niosh/idlh/intridl4.html>

²² Permissible Exposure Limit : valeurs limite d'exposition professionnelle légales aux États-Unis. Voir : <http://www.osha.gov/SLTC/pel>

²³ Threshold Limit Value. Voir: <http://www.acgih.org/TLV>

²⁴ Recommended Exposure Limit. Voir: <http://www.cdc.gov/niosh/npg/>

²⁵ Reference Dose

²⁶ National Institute for Occupational Safety and Health

²⁷ Occupational Safety and Health Administration

²⁸ Centre international de recherche sur le cancer

²⁹ Voir : <http://epa.gov/dfe>

d'utilisation par secteur industriel) et fournissant les données sur le marché, les tendances technologiques ainsi que les groupes d'utilisation de substances ont été réalisés. Ces documents sont utilisés dans le CTSA pour identifier les substituts potentiels. L'analyse comparative des substituts est divisée en trois étapes (65) :

1. La collecte des données sur les substances et le procédé (propriétés physicochimiques, devenir dans l'environnement, risques pour la santé humaine et pour l'environnement, données économiques sur l'utilisation des substituts potentiels dans le secteur industriel local et au niveau international);
2. L'analyse des données concernant le risque (pratiques en milieu de travail, émissions à la source, évaluation de l'exposition, caractérisation du risque), la compétitivité (réglementation, évaluation des performances, analyse des coûts) et la conservation des ressources;
3. La détermination des compromis à envisager en fonction de la situation concrète dans une entreprise donnée. Ces compromis peuvent être un dépassement des coûts (p. ex. accepter une substance plus dispendieuse pour obtenir une diminution du risque sanitaire), un choix stratégique (p. ex. accepter un substitut toxique pour la vie aquatique parce qu'il n'y a aucune possibilité de générer des effluents aqueux) ou encore une remise en question des exigences techniques (p. ex. accepter une augmentation de la durée de la tâche pour une performance égale et un risque sanitaire réduit).

Le document guide sur le CTSA publié par le U.S. EPA contient des modules d'information détaillés décrivant la procédure de collecte et d'évaluation des données. Chacun des modules comprend plusieurs sections concernant les objectifs, les compétences nécessaires pour compléter le module, la définition des termes techniques, les modèles analytiques, les logiciels à utiliser ou encore les sources d'information. Quelques-uns de ces modules d'information sont présentés dans l'annexe 1. Les auteurs soulignent que le choix de la meilleure solution de remplacement se fait en dehors du CTSA. Cette décision doit considérer un certain nombre de facteurs tels que la situation concrète de l'entreprise en plus des éléments que fait ressortir le CTSA.

La méthodologie du CTSA a été utilisée notamment en lithographie (imprimerie Offset) (108), en sérigraphie (109), en flexographie (111, 112), dans le domaine du nettoyage à sec (107), de la fabrication des circuits imprimés (64, 115) et de la fabrication d'objets en mousse pour les meubles (74, 98). Toutes ces études ont été réalisées par ou pour le U.S. EPA. La documentation produite est ensuite utilisée notamment par les acteurs des programmes de prévention de la pollution dans chacun des États américains. En effet, plusieurs états ont un service d'aide aux entreprises pour améliorer leur bilan environnemental. On y retrouve des ingénieurs qui conseillent les entreprises à réduire leurs déchets solides, leurs émissions atmosphériques et faire de la substitution. Ces documents étant publics, ils peuvent également servir aux firmes d'ingénieur-conseil auxquelles les entreprises font appel pour les aider à respecter la réglementation environnementale. Les documents sont des guides. Les décideurs sont les entreprises qui peuvent y puiser des idées pour réaliser des projets de substitution dans leur milieu de travail. Les entreprises ne sont pas obligées d'appliquer intégralement ces guides. Leur

seule obligation est de respecter la réglementation, p. ex. les limites d'émission de formaldéhyde pour les fabricants de panneaux agglomérés, la substitution étant une façon d'y arriver.

3.2 Outils d'évaluation et de comparaison des substituts potentiels

Quatorze outils d'évaluation et de comparaison de produits chimiques sont décrits dans cette section. À la suite de ces méthodes de comparaison, quelques outils auxiliaires (bases de données physicochimiques et toxicologiques, valeurs limites d'exposition et modèles QSAR) sont présentés à la section 3.3. Ces outils auxiliaires sont utiles lors de la collecte des données nécessaires à la comparaison.

3.2.1 Méthodes de gestion graduée

La gestion graduée des produits chimiques³⁰ (« control banding »³¹) est une approche visant la protection de la santé du travailleur par la mise en place de moyens de maîtrise adaptés en fonction du contexte de chaque entreprise (93). À partir de données sur la dangerosité (phrases de risque R) et sur l'exposition (quantité utilisée, état physique, moyens de maîtrise existants), on assigne à une substance une « bande » correspondant à une stratégie de maîtrise préalablement définie. Les méthodes de gestion graduée ne sont pas spécifiquement conçues pour faire de la substitution, mais plutôt pour classer les risques selon leur importance en se basant sur la dangerosité des substances et sur une estimation de l'exposition qui survient pendant leur manipulation. Deux méthodes de gestion graduée des produits chimiques sont présentées ci-dessous. Il s'agit de la méthodologie d'évaluation simplifiée du risque chimique développée par Vincent et coll. et de l'outil Stoffenmanager élaboré par deux organismes néerlandais. Soulignons qu'il existe d'autres méthodes de gestion graduée notamment la méthode COSHH³² du HSE (57).

3.2.1.1 Méthodologie d'évaluation simplifiée du risque chimique

La méthodologie d'évaluation du risque chimique a été élaborée en 2005 par Vincent et coll. (119). Elle comprend trois grandes étapes que sont l'inventaire des produits et matériaux utilisés dans un établissement, un atelier ou à un poste de travail, la hiérarchisation des risques potentiels et enfin l'évaluation des risques. La deuxième étape de hiérarchisation des risques potentiels a fait l'objet d'une publication séparée (118). L'évaluation des risques a pour objectif l'estimation du risque associé à une tâche en

³⁰ Cette terminologie est dérivée de celle employée par l'Organisation internationale du travail dans le résumé exécutif du document intitulé « Principes fondamentaux de la sécurité et de la santé au travail – Seconde édition » disponible à l'adresse URL suivante :

http://www.ilo.org/public/libdoc/ilo/2008/108B09_200_engl_resume_executif.pdf

³¹ Voir : http://www.ilo.org/public/english/protection/safework/ctrl_banding/index.htm

³² Control of Substances Hazardous to Health

considérant les dangers des agents chimiques, leurs propriétés physicochimiques, les conditions de mise en œuvre et les moyens de prévention. Cette évaluation porte sur trois volets : les effets sur la santé (risque par inhalation et par contact cutané), la sécurité et l'environnement.

Risque par inhalation (119)

L'évaluation du risque par inhalation tient compte des dangers des substances utilisées et des conditions d'exposition. Elle se base sur une analyse du travail réel des différents groupes d'exposition homogène³³. Les scores suivants sont assignés à chaque substance :

- Un score de danger de 1, 10, 100, 1000 ou 10 000 est attribué en fonction de la classe de danger déterminée lors de la phase de hiérarchisation des risques prioritaires. Cette classe de danger est déterminée à partir des informations sur la FDS. Les phrases de risque R sont prioritairement utilisées; en leur absence on peut se référer à la valeur limite d'exposition professionnelle ou en dernier ressort au pictogramme de danger.
- Un score de volatilité de 1, 10 ou 100 est déterminé en fonction de l'état physique de la substance. Pour les substances solides, c'est la taille des particules qui est prise en compte alors que pour les liquides ce sont la température d'utilisation et le point d'ébullition qui déterminent le score. Si la substance est un gaz, le score de volatilité est de 100 quelle que soit la température d'utilisation.
- Un score de procédé (1, 0,5, 0,05 ou 0,001) est assigné suivant la nature du procédé dans lequel la substance est utilisée (procédé dispersif, ouvert, clos, mais régulièrement ouvert, clos en permanence).
- Un score de protection collective est enfin déterminé selon le type de ventilation et la distance entre le travailleur et la source d'émission. Le port d'équipement de protection individuelle n'est volontairement pas pris en compte.
- Le score pour le risque par inhalation est égal au produit des quatre scores précédents.

Une fois que le score pour le risque est obtenu, il faut alors caractériser le risque. Si le score est supérieur 1000, le risque est probablement très élevé et des mesures correctives immédiates doivent être prises. S'il est entre 100 et 1000, le risque est modéré et nécessite probablement la mise en place de mesures correctives et une évaluation approfondie (métrologie). S'il est inférieur à 100, le risque est à priori faible et aucune modification n'est à entreprendre.

Risque par contact cutané (119)

Les trois scores suivants sont déterminés pour l'évaluation du risque par contact cutané :

- Un score de danger obtenu de la même façon que pour le risque par inhalation.
- Un score de surface exposée (une main, deux mains, etc.) de 1, 2, 3, 10.
- Un score de fréquence d'exposition (occasionnelle, intermittente, fréquente ou permanente) de 1, 2, 5, 10.

³³ Un groupe d'exposition homogène est un ensemble de personnes, de postes ou de fonctions de travail pour lesquels on estime que l'exposition est de même nature et d'intensité similaire.

- Le score pour le risque cutané est égal au produit des trois scores précédents.

La caractérisation du risque par contact cutané se fait de la même façon que pour le risque par inhalation.

Soulignons que même si la méthodologie de Vincent et coll. porte sur les risques à la santé, la sécurité et l'environnement, la façon dont sont déterminés les scores de risque pour les deux derniers aspects n'est pas explicitée dans la publication (119).

3.2.1.2 *Stoffenmanager*

Stoffenmanager³⁴ est un outil en ligne conçu par deux organismes situés aux Pays-Bas (Arbo Unie et TNO Chemistry) dans le but d'aider les petites et moyennes entreprises (PME) à faire l'évaluation des risques liés à l'exposition par inhalation ou par voie cutanée aux substances dangereuses qu'elles utilisent et à établir un plan d'action (72).

L'utilisation de Stoffenmanager débute par la saisie d'un certain nombre d'informations relatives au produit chimique à évaluer (p. ex. nature, composition, phrases de risque associées) ainsi qu'aux conditions dans lesquelles ce produit est utilisé (p. ex. type d'activité, durée, fréquence, moyens de maîtrise, équipements de protection individuelle). À partir de ces informations, le danger et l'exposition sont évalués et des classes allant respectivement de A (faible) à E (extrême) et de 1 (faible) à 4 (très élevé) sont assignées à la substance.

L'évaluation du danger est basée sur les phrases de risque R (24) et selon la catégorisation proposée par le HSE pour l'outil COSHH Essentials³⁵. Étant donné que le danger est exclusivement évalué à partir des phrases de risque, les substances qui n'en ont pas sont automatiquement catégorisées dans la classe de danger la plus faible.

L'exposition est évaluée en utilisant deux modèles existants intégrés dans Stoffenmanager. L'exposition par inhalation est estimée en utilisant le modèle développé par Cherrie et coll. (20, 21) qui considère que le niveau d'exposition dépend d'une part du potentiel d'émission intrinsèque de la substance polluante (pression de vapeur pour les liquides et pulvéulence pour les poudres), de la méthode de manipulation et des moyens de maîtrise utilisés tels que la ventilation locale. D'autre part, les sources d'émission fugitives, la durée d'émission de la source, l'usage d'équipements de protection individuelle ainsi que la distance qui sépare le travailleur de la source d'exposition sont également pris en compte dans le modèle.

L'exposition par voie cutanée est évaluée en utilisant le modèle RISKOFDERM (78). Deux types d'effets y sont considérés : les effets locaux et les effets systémiques après pénétration de la substance par la peau. La nature de la substance (solide ou liquide), le type de tâche effectuée par le travailleur (p. ex. manipulation d'objets contaminés,

³⁴ Voir : <https://www.stoffenmanager.nl/Default.aspx>

³⁵ Voir : <http://www.coshh-essentials.org.uk/>

immersion, dispersion par vaporisation, traitement mécanique), la durée de la tâche, le port d'équipements de protection individuelle sont autant d'éléments considérés pour déterminer la classe d'exposition.

La combinaison des niveaux de danger et d'exposition soit par voie cutanée soit par inhalation permet d'obtenir un score de risque pouvant être égal à III (faible), II (moyen), ou I (élevé).

Une fois que l'analyse de risque est complétée et en fonction du score obtenu pour le risque, l'utilisateur a la possibilité d'évaluer l'impact qu'aurait la mise en place d'un moyen de maîtrise. La substitution fait partie des moyens de maîtrise proposés. Pour ce faire, il doit saisir les données relatives à la nouvelle substance c'est-à-dire son état physique et les phrases de risques qui lui sont associées. À partir de ces données, un score de risque est calculé permettant à l'utilisateur de comparer les deux substances. Il faut cependant souligner que dans la version actuelle du Stoffenmanager, l'évaluation de l'impact de la substitution comme moyen de maîtrise n'est possible que pour le risque par inhalation.

3.2.2 Le modèle à colonnes

Le modèle à colonnes (« Column Model ») est un outil qualitatif de comparaison des substances chimiques développé par l'Institut pour la protection du travail des caisses mutuelles d'assurance accident d'Allemagne (BGIA)³⁶ et destiné aux entreprises comme un outil pratique pour la réalisation de projets de substitution. Il comprend cinq colonnes³⁷ représentant respectivement les toxicités aiguë et chronique, les dangers environnementaux, le danger incendiaire et l'explosivité, le potentiel d'exposition et les dangers causés par les procédés. À chacune de ces colonnes correspondent cinq niveaux de risque : très élevé, élevé, moyen, faible, négligeable. L'évaluation des substances se fait à partir de l'information contenue dans les fiches de données de sécurité (FDS) allemandes, notamment les phrases de risque (24) et la classification allemande pour les contaminants de l'eau (95)³⁸. L'annexe 2 présente les paramètres utilisés pour la catégorisation des substances chimiques. La comparaison entre les différentes substances ne doit se faire que par colonne. La substance avec le niveau de risque le plus faible dans toutes les colonnes est considérée comme le meilleur substitut potentiel. Cependant, le plus souvent, le produit pressenti pour la substitution est meilleur dans certaines colonnes et pire dans d'autres. Néanmoins, il peut s'avérer acceptable en fonction de la situation concrète à l'étude parce qu'une colonne peut être plus importante qu'une autre. Par exemple, si le procédé en question exige la présence d'une source d'ignition, le danger incendiaire et l'explosivité couplés au potentiel d'émission de la substance seront plus importants dans l'exercice global de la comparaison. L'utilisateur doit choisir et justifier

³⁶ Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz . Voir : <http://www.hvbg.de/e/bia/pr/spalte/>

³⁷ Il y a en réalité 6 colonnes mais les toxicités aiguë et chronique comptent pour une seule colonne.

³⁸ Le texte anglais de Smola (http://www.hvbg.de/e/bia/pr/pdf_bild/spaltmod.pdf), à partir duquel le présent résumé a été constitué est lui-même un résumé d'un rapport plus volumineux en langue allemande détaillant le modèle à colonnes (91).

sa pondération en fonction de l'analyse des procédés et techniques d'utilisation de la substance dans le milieu de travail.

Avant l'utilisation du modèle à colonnes, Smola recommande de suivre la série 600 des règles techniques sur les substances dangereuses (voir § 3.5.4) traitant de la substitution. Il faut également considérer les codes d'étiquetage des produits sur le marché allemand tels que les GISCODE (voir § 3.2.3).

Le modèle à colonnes est recommandé dans la réglementation allemande TRGS 440 pour réaliser les projets de substitution (26). Dans le cas où certaines données nécessaires à l'évaluation sont manquantes sur les FDS, ce règlement recommande d'agir de la façon suivante (95):

1. Si l'information sur les tests d'irritation pour la peau et les muqueuses est manquante; la substance ou la préparation devrait minimalement être catégorisée « faible risque » dans la colonne de toxicité aiguë (« irritant », phrases de risque R36/R37/R38).
2. Si l'information est manquante quant aux essais de toxicité; la substance ou la préparation devrait minimalement être catégorisée « risque élevé » dans la colonne de toxicité aiguë (« substance ou préparation toxique », phrases de risque R23/R24/R25).
3. Si l'information est manquante quant aux essais de mutagenèse; la substance ou la préparation devrait minimalement être catégorisée « risque élevé » dans la colonne de toxicité chronique sur la santé (« substance mutagène de catégorie 3 », phrase de risque R68).
4. Si l'information est manquante quant aux essais de sensibilisation cutanée; la substance ou la préparation devrait minimalement être catégorisée « risque élevé » dans la colonne de toxicité aiguë sur la santé (« peut entraîner une sensibilisation par contact avec la peau », phrase de risque R43).

3.2.3 GISCODE

Le GISCODE est un système volontaire d'étiquetage mis en place en 1993 par les fabricants et les caisses mutuelles d'assurance accident dans le secteur de la construction. Le GISCODE fait partie d'un système d'information plus global appelé GISBAU³⁹ dont le but est de réduire les risques reliés aux substances dangereuses et de fournir du soutien aux PME qui représentent la majeure partie des entreprises du secteur.

Les produits utilisés dans le secteur de la construction sont divisés en différentes classes (« Product groups ») selon qu'ils présentent des caractéristiques communes du point de

³⁹ Gefahrstoff-Informationssystem der BG BAU (Système d'information sur les substances dangereuses du regroupement des caisses mutuelles d'accident)

vue de la composition, de la sécurité du travail et de la protection de la santé. Chacune de ces classes de produits comprend différents groupes de produits commerciaux disponibles sur le marché (40, 66). Pour chacun de ces groupes de produits, on assigne un code alphanumérique appelé GISCODE. La partie alphabétique de ce code se rapporte à la nature (composition) du produit (p. ex. RE pour époxy et PU pour polyuréthane) alors que la partie numérique reflète le risque. Plus le chiffre du GISCODE est petit, meilleur est le produit du point de vue sanitaire. Par exemple, deux GISCODE sont définis pour le ciment selon qu'il contient un taux faible en chromates (ZP1) ou un taux élevé en chromates (ZP2). La comparaison des GISCODE de différentes classes de produits permet de choisir celle qui présenterait le moins de risques pour le travailleur.

Les GISCODE sont utilisés par les entrepreneurs concurremment aux autres informations disponibles sur le site Web du GISBAU concernant les modes d'emploi, les produits substitutifs, les mesures d'hygiène, les niveaux d'exposition potentiels et les moyens de protection requis (90). Le GISBAU couvre 18 domaines dans l'industrie de la construction et environ 3000 produits commerciaux (71).

3.2.4 P2OASys

Le Pollution Prevention Option Analysis System (P2OASys) est un outil conçu par le TURI, un institut affilié à l'Université du Massachusetts. P2OASys est sous la forme d'un fichier⁴⁰ de tableur Excel téléchargeable gratuitement et dont l'objectif est de permettre aux entreprises d'évaluer et de comparer les impacts potentiels sur l'environnement et le travailleur d'une substance ou d'un mélange actuellement en utilisation par rapport à des solutions de remplacement envisagées (102). Les données utilisées pour l'évaluation sont de nature quantitative ou semi-quantitative et concernent les dangers des différentes substances pour la santé, la sécurité et l'environnement. Les mélanges de substances peuvent aussi être évalués si leur composition est connue. L'annexe 3 présente les onze catégories de dangers considérées dans P2OASys ainsi que les critères d'évaluation qui leur sont associés. Chacune des catégories de danger est évaluée à partir d'un certain nombre de critères et un score de 2, 4, 6, 8 ou 10 leur est attribué. La moyenne des deux scores de critères les plus élevés détermine le score de la catégorie. La somme des scores de chaque catégorie donne le score global de la substance ou du produit. Dans P2OASys, l'utilisateur peut saisir un score entre 0 et 100 exprimant la validité des données utilisées pour l'évaluation. S'il ne le fait pas, un score de 100 est assigné par défaut. L'utilisateur peut également attribuer un facteur de pondération compris entre 0 et 10 à chacune des catégories de dangers pour souligner celles jugées plus importantes dans un contexte particulier. Les scores de catégories combinés à la validité et à la pondération permettent d'obtenir un score global pondéré (SGP) pour chacune des substances évaluées à partir de l'équation suivante :

⁴⁰ Voir : http://www.turi.org/home/hot_topics/cleaner_production/p2oasys_tool_to_compare_materials

$$SGP = \frac{\sum_{i=1}^n Score_i \times Validité_i \times Pondération_i}{\sum_{i=1}^n Validité_i \times Pondération_i} \quad (1)$$

Score_i est le score pour la catégorie de danger i

Validité_i est le score de validité de la catégorie de danger i

Pondération_i est le facteur de pondération de la catégorie de danger i

Plus le SGP est bas, meilleure est la substance. De plus, pour chaque SGP calculé P2OASys calcule un score de validité globale pondérée (VGP) qui reflète l'incertitude associée aux données. Cela permet une interprétation plus nuancée des scores obtenus. VGP est calculé à partir de l'équation suivante :

$$VGP = \frac{\sum_{i=1}^n Validité_i \times Pondération_i}{\sum_{i=1}^n Pondération_i} \quad (2)$$

Armenti et Moure-Eraso ont utilisé P2OASys comme outil d'évaluation des effets sur la santé et la sécurité du travailleur lors d'interventions visant la prévention de la pollution dans trois entreprises du Massachusetts fabriquant des cartes de circuits imprimés. Ces interventions ont consisté à éliminer l'usage de certaines substances chimiques en les remplaçant par d'autres, réputées moins dangereuses. Six catégories de dangers de P2OASys mesurant principalement l'impact sur la santé des travailleurs ont été choisies pour l'évaluation. Ces catégories sont les effets aigus, les effets chroniques, les dangers physiques, les dangers chimiques, les dangers liés au cycle vie du produit et le potentiel d'exposition. La somme brute des scores (score global, SG) de ces six catégories avant et après l'intervention a permis de mesurer l'impact de l'intervention. Dans une des entreprises, le sulfate ferreux utilisé lors du recyclage des eaux usées a été remplacé par le sulfate polyferrique (CAS n° 51434-22-1). Les résultats donnés par P2OASys avant et après la substitution étaient respectivement de 61 et 30 et montrent une amélioration de l'impact sur la santé des travailleurs (9).

3.2.5 IRCHS

L'IRCHS⁴¹ est un système de hiérarchisation des dangers des produits chimiques pour l'environnement et le milieu de travail élaboré par le Clean Manufacturing Technology Institute (CMTI) un organisme rattaché à l'Université Purdue (West Lafayette, IN). L'IRCHS a initialement été développé pour les industriels de l'Indiana, mais il a depuis été utilisé par des agences gouvernementales des États-Unis (104). Il permet de calculer pour une substance donnée un score relatif d'impact global (I_{global}) compris entre 0 et 100

⁴¹ Indiana Relative Chemical Hazard Score

à partir de scores représentatifs de l'impact sur l'environnement (I_{env}) et de l'impact sur la santé et la sécurité du travail (I_{sst}).

$$I_{global} = \frac{I_{env} + I_{sst}}{2} \quad (3)$$

Détermination du score d'impact environnemental (I_{env}) (22)

L'impact environnemental est composé de quatre scores représentant respectivement les dangers de la substance pour l'eau, l'air, le sol et pour la couche d'ozone. L'impact sur le milieu aquatique (I_{eau}) correspond à l'indice de danger total (I_{total}) calculé avec la méthode Chemical Hazard Evaluation for Management Strategies ou CHEMS (voir § 3.2.12). Whaley considère que, même si cet indice de danger contient des valeurs de toxicité relatives à la santé humaine, tous les termes de toxicités humaine et écologique utilisés dans la méthode de calcul sont multipliés par un potentiel d'exposition ne reflétant que le potentiel de la substance à être dispersée dans ou absorbée à partir des écosystèmes aquatiques (125).

Le deuxième score représente l'impact de la substance dans l'air (I_{air}) par la somme des sous-scores suivants : 1) 20 si la substance est un polluant-critère⁴², 2) 40 si elle est un polluant atmosphérique dangereux⁴³, 3) 20 s'il s'agit d'un polluant à haut risque⁴⁴ et enfin 4) 20 si la substance est une substance extrêmement dangereuse⁴⁵.

Le troisième score correspondant à l'impact de la substance dans le sol (I_{sol}) est composé des sous-scores suivants : 1) un score de 70 si la substance fait partie de la liste P, 2) un score de 35 si elle fait partie des listes « F001 à F005 », « K » ou « U »⁴⁶ et 3) un score de 15 si la substance présente des propriétés d'inflammabilité, de corrosivité, de réactivité ou de toxicité définies par la réglementation⁴⁷.

Le quatrième et dernier score se rapporte à l'impact de la substance sur la couche d'ozone (I_{ozone}). Il est de 50 s'il s'agit d'une substance appauvrissant la couche d'ozone (SACO) de classe I et de 25 si c'est une SACO de classe II⁴⁸.

⁴² Criteria pollutant. Il s'agit des six polluants atmosphériques suivants définis en vertu du Clean Air Act (CAA) aux États-Unis : ozone, particules, monoxyde de carbone, oxydes d'azote, anhydride sulfureux, plomb.

⁴³ Hazardous Air Pollutant (HAP). 188 HAP sont définis en vertu du CAA. Voir à l'adresse URL suivante : <http://www.epa.gov/ttn/atw/188polls.html>

⁴⁴ High Risk Pollutant (HRP). La liste des substances classées HRP fait partie de la réglementation 40CFR63 des États-Unis (50), elle est disponible en ligne. Voir : <http://ecfr.gpoaccess.gov>

⁴⁵ Extremely Hazardous Substance (EHS). Il existe plus de 300 EHS en vertu de la section 302 du « Emergency Planning and Community Right-to-Know Act ». Voir :

<http://ecfr.gpoaccess.gov/cgi/t/text/text-idx?c=ecfr&sid=5fc8e8e3aaf2d0c06a2e4422bd279c23&rgn=div5&view=text&node=40%3A27.0.1.1.11&idno=40>

⁴⁶ Les listes de substances « P », « F », « K » et « U » nécessaires pour le calcul de l'impact sur le sol sont issues de la réglementation 40CFR261 des États-Unis (51). Voir : <http://ecfr.gpoaccess.gov>

⁴⁷ Ces quatre propriétés sont définies respectivement dans 40CFR261.21, 40CFR261.22, 40CFR261.23 et 40CFR261.34 et sont disponibles en ligne. Voir : <http://ecfr.gpoaccess.gov>

⁴⁸ Ces classes sont établies en vertu du chapitre VI du CAA. Voir : <http://epa.gov/ozone/title6/index.html>

Les valeurs des scores pour les impacts sur l'eau, l'air et le sol sont normalisées pour obtenir un score maximal de 100 alors que la valeur maximale du score d'impact sur la couche d'ozone est de 50. L'équation suivante permet de calculer le score d'impact environnemental compris entre 0 et 100 :

$$I_{env} = \frac{I_{eau} + I_{air} + I_{sol} + I_{ozone}}{3,5} \quad (4)$$

Détermination du score d'impact sur la santé et la sécurité du travail (I_{sst}) (23)

L'impact sur la santé et la sécurité du travail est composé de trois scores représentant respectivement l'impact sur la santé, l'impact sur les voies d'exposition et enfin celui sur la sécurité du travail. Le score de l'impact sur la santé est la somme de deux sous-scores, l'un pour les dangers chroniques de la substance ($I_{chronique}$) et le deuxième pour les dangers aigus (I_{aigu}).

$$I_{santé} = I_{chronique} + I_{aigu} = (I_{tox} \text{ ou } I_{cancer}) + I_{aigu} \quad (5)$$

$I_{chronique}$ est le pire des scores entre le score pour l'impact toxique (I_{tox}) et celui pour l'impact cancérigène (I_{cancer}). Le score pour l'impact toxique est basé sur la TLV (8h) recommandée par l'ACGIH⁴⁹ et celui pour l'impact cancérigène est basé quant à lui sur la classification du U.S. EPA ou de l'ACGIH (voir tableaux V et VI de l'annexe 4). Le score pour les dangers aigus I_{aigu} est obtenu à partir d'une valeur limite pour une exposition de courte durée (STEL⁵⁰). Si la substance a une STEL, alors I_{aigu} est égal à 0,5. Sinon, il est égal à 0.

Le score de l'impact des voies d'exposition (I_{expo}) est égal à la somme de quatre sous-scores :

$$I_{expo} = I_{pv} + I_{oral} + I_{peau} + I_{pb} \quad (6)$$

I_{pv} est le score établi selon la pression de vapeur de la substance d'après le tableau VII de l'annexe 4. I_{oral} est le score pour l'absorption par voie orale. Seul le plomb est actuellement coté comme une substance absorbable par voie orale avec un score égal à 1 si la substance évaluée en contient. I_{peau} est le score pour l'absorption cutanée. Si l'ACGIH attribue une notation « peau » à la substance; ce score est de 0,5 sinon il est de 0. I_{pb} est le score pour la pulvéulence (solides) ou pour la capacité de la substance à former un brouillard dans le cas des liquides. Les tableaux VIII et IX de l'annexe 4 donnent les critères d'assignation du score I_{pb} .

⁴⁹ American Conference of Governmental Industrial Hygienists

⁵⁰ Short Term Exposure Limit. Les STEL de l'ACGIH ou de l'AIHA (American Industrial Hygiene Association) peuvent être utilisées.

Le score de l'impact sur la sécurité du travail ($I_{sécurité}$) est égal à la somme des sous-scores pour l'inflammabilité ($I_{inflamm}$), pour la réactivité ($I_{réactiv}$) et pour la corrosivité (I_{corr}).

$$I_{sécurité} = I_{inflamm} + I_{réactiv} + I_{corr} \quad (7)$$

Les scores d'inflammabilité et de réactivité sont égaux à 0, 1, 2, 3 ou 4 et sont ceux assignés par la norme NFPA⁵¹ 704 (76). S'agissant de la corrosivité, le score est basé sur la classification⁵² du ministère des Transports des États-Unis (US DOT). L'absence de corrosivité implique un I_{corr} égal à 0; la classification III du US DOT donne un I_{corr} égal à 2; la classification II donne un score de 3 et la classification I donne un score de 4.

L'équation (8) permet d'obtenir le score de l'impact sur la santé et la sécurité du travail à partir des trois éléments précédents (94):

$$I_{sst} = 1,15[I_{santé} * I_{expo} + 2(I_{sécurité})] \quad (8)$$

Le score I_{sst} est normalisé pour atteindre un maximum de 100.

Le CMTI a évalué plus de 1000 substances avec l'IRCHS et un score global leur a été attribué. La liste de ces substances peut être obtenue⁵³ à l'adresse Web de l'organisme.

Toffel et Marshall ont fait une analyse comparative des méthodes de pondération utilisées pour l'inventaire des rejets de polluants et rapportent que l'IRCHS a été utilisé dans cette optique par trois organismes (104). Whaley et Barrett ont utilisé l'IRCHS pour mesurer la réduction de la pollution réalisée par la mise en place d'une substitution ou par un changement de procédé. Dans la majorité des cas où une substitution a été effectuée une diminution de l'indice IRCHS a été observée. Les auteurs considèrent ainsi que l'objectif de réduction de la pollution a été atteint (124).

3.2.6 Quick Scan

Quick Scan est une méthode d'évaluation préliminaire du risque des substances chimiques développée par le ministère⁵⁴ néerlandais responsable de l'environnement. L'outil est destiné aux industriels et sert à identifier les propriétés dangereuses de toutes les substances chimiques produites, vendues ou utilisées aux Pays-Bas et pour lesquelles aucune analyse approfondie du risque n'a été faite (121). L'utilisation du Quick Scan permet d'aboutir à un portrait des substances contenant l'information sur les caractéristiques de persistance (P), de bioaccumulation (B) et de toxicité environnementale (T), les dommages à la santé humaine (He), la cancérogénicité (C), la mutagénicité (M), les effets sur la reproduction (R) ainsi que les perturbations sur le système endocrinien (Ho). Les données utilisées pour l'évaluation par le Quick Scan

⁵¹ National Fire Protection Association

⁵² Voir la réglementation 49CFR173.137 accessible en ligne à l'adresse <http://ecfr.gpoaccess.gov>

⁵³ Voir <https://engineering.purdue.edu/CMTI/IRCHS/hazscore-a.xls> (dernière mise à jour en août 2006)

⁵⁴ The Netherlands Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment.

devraient préférablement être des données de référence sur les propriétés toxicologiques de la substance, obtenues à partir de tests et de modèles acceptés au niveau international (p. ex. OCDE⁵⁵, UE). Si ce type de données n'est pas disponible; des données estimées (p. ex. QSAR, jugement d'expert) provenant des mêmes sources peuvent être utilisées. Le tableau X de l'annexe 5 donne les critères de détermination du niveau de danger des substances selon leurs propriétés toxicologiques.

Une fois que le profil toxicologique de la substance est établi, l'étape subséquente est de la classer à partir de règles préalablement définies selon cinq niveaux de préoccupation : très élevé, élevé, moyen, faible ou pas de donnée donc très élevé. Il faut néanmoins noter que le Quick Scan définit un ensemble de données minimales nécessaires à l'évaluation des effets d'une substance chimique sur l'environnement et chez l'humain. C'est en l'absence de ces données minimales que la substance est classée au niveau de préoccupation « très élevé ». L'assignation du niveau de préoccupation pour les effets sur l'environnement se fait en combinant les niveaux de danger relatifs aux propriétés PBT comme le montre le tableau XI de l'annexe 5. S'agissant des effets sur la santé humaine, le tableau XII de l'annexe 5 montre que l'assignation d'un niveau de préoccupation se fait de façon indépendante pour chacune des catégories de danger. Le niveau de préoccupation global de la substance chimique est égal au niveau le plus élevé atteint soit pour ses effets sur l'environnement soit pour ses effets chez l'humain (121).

La dernière étape de l'évaluation est d'ajuster le niveau de préoccupation, déterminé à partir des propriétés toxiques de la substance, en fonction de l'exposition potentielle à ladite substance selon le tableau XIII de l'annexe 5. Cette exposition est estimée à partir de l'usage qui est fait de la substance (p. ex. intermédiaire de synthèse, usage industriel, procédé ouvert, produit de grande consommation).

Le Quick Scan définit un certain nombre de mesures qu'il faut suivre en fonction du niveau de préoccupation attribué à la substance. L'usage des substances dont le niveau de préoccupation est très élevé n'est pas acceptable sauf sous certaines conditions de prévention du danger et de l'exposition. L'utilisation des substances de niveau de préoccupation élevé n'est quant à elle pas permise pour les produits de grande consommation ou dans des procédés ouverts, sauf sous certaines conditions.

3.2.7 CARS

CARS⁵⁶ est un outil d'aide à la décision développé par l'organisme sans but lucratif Zero Waste Alliance basé à Portland en Oregon et destiné aux entreprises. Il permet l'inventaire, l'évaluation et la classification des produits chimiques afin de prioriser les matériaux et procédés dangereux à éliminer ou à substituer. L'outil comprend une base de données contenant des produits chimiques ayant des propriétés telles que la cancérogénicité, la toxicité aquatique, la persistance ou encore la bioaccumulation. Les substances associées à une catégorie de danger sont repérées et l'utilisateur attribue un

⁵⁵ Organisation de coopération et de développement économiques

⁵⁶ Chemicals Assessment and Ranking System. Voir: <http://www.zerowaste.org/cars/>

poids à chacune des catégories en tenant compte de la quantité utilisée, de la fréquence d'utilisation et des effets sur la santé ou l'environnement. L'outil CARS n'est pas disponible gratuitement ; il peut être acheté du Zero Waste Alliance.

3.2.8 Cradle-to-Cradle Design Protocol

Le Cradle-to-Cradle Design Protocol⁵⁷ est un outil développé par la société McDonough Braungart Design Chemistry (MBDC) dans le but d'assister les entreprises dans l'évaluation des matières utilisées dans la fabrication de produits et dans les procédés de production. L'évaluation est faite à partir des effets chez l'humain (cancérogénicité, mutagénicité, reprotoxicité, perturbation endocrinienne, toxicités aiguë et chronique, irritation des yeux et des muqueuses) et des impacts environnementaux (toxicité chez les poissons, persistance, bioaccumulation). Les matières sont évaluées à partir des critères précédents et un code de couleurs est ensuite utilisé pour les classer : vert (peu ou pas de risque, l'utilisation de la substance est acceptable), jaune (risque faible ou modéré, la substance peut être utilisée jusqu'à ce qu'une meilleure option soit trouvée), orange (il n'y a pas d'indication que la substance pose un risque élevé mais, une évaluation complète n'est pas possible en raison d'un manque de données), rouge (risque élevé, la substance devrait être éliminée le plus tôt possible). L'outil n'est pas disponible gratuitement ; il peut être acheté de MBDC.

3.2.9 Green Screen

Le Green Screen est une méthode développée par l'organisme sans but lucratif Clean Production Action (CPA⁵⁸) dans le but d'aider les entreprises, les gouvernements et les individus à prendre des décisions concernant les risques causés par les produits chimiques mais aussi dans le but de participer au développement de la chimie verte. La méthode permet l'évaluation des dangers inhérents aux produits chimiques afin d'identifier ceux qui sont préférables du point de vue sanitaire, sécuritaire et environnemental. Il s'agit d'une approche basée sur la réduction du danger des substances chimiques qui se veut facile d'utilisation. Le Green Screen intègre certains principes de l'analyse du cycle de vie par la prise en compte des produits de dégradation dans l'environnement des substances évaluées (88). Les substances sont évaluées selon quatre catégories de danger :

1. Le devenir environnemental : persistance P et bioaccumulation B
2. L'écotoxicité : toxicités aquatiques aiguë et chronique
3. Les effets sur la santé humaine : cancérogénicité, mutagénicité/génotoxicité, reprotoxicité, toxicité sur le développement, perturbation du système endocrinien, neurotoxicité, toxicité aiguë, corrosion/irritation de la peau ou des yeux, sensibilisation de la peau ou du système respiratoire, effets sur le système immunitaire, toxicité systémique/effets sur les organes.

⁵⁷ Voir : http://www.mbdc.com/c2c_mbdp.htm

⁵⁸ Voir : <http://www.cleanproduction.org/>

4. Les propriétés physicochimiques : explosivité, inflammabilité.

À chacune de ces catégories sont associés trois niveaux de « préoccupation » : élevé, modéré, faible. Cependant, pour la persistance et la bioaccumulation un niveau de préoccupation très élevé est rajouté pour refléter le consensus international concernant les substances très persistantes et très bioaccumulables (vPvB). L'approche pour la collecte des données d'évaluation est en premier lieu une recherche de données expérimentales. S'il n'y en a pas; des données SAR/QSAR sont alors utilisées. L'annexe 6 présente les critères d'évaluation et d'attribution des niveaux de préoccupation aux différentes catégories de danger.

Une fois que l'attribution des niveaux de préoccupation pour chaque danger est complétée; le Green Screen définit quatre points de référence (« benchmark») pour identifier les substances les plus sûres. Chacun de ces points de référence comprend un certain nombre de critères que la substance ne doit pas satisfaire pour passer au niveau supérieur. Ainsi, une substance ne satisfaisant aucun des critères définis au point de référence 1 progresse au point 2. Les critères de passage sont progressivement de plus en plus exigeants concernant la santé, la sécurité et l'environnement. Les critères définis au point de référence 4 représentent la substance « la plus sûre » (88). Les quatre points de référence sont les suivants :

- Point de référence 1 : à éviter – Substance de niveau de préoccupation élevé
 - Substance PBT : P élevé + B élevé + T élevé (toxicité humaine élevée ou écotoxicité élevée)
 - Substance vPvB : P très élevé + B très élevé
 - Substance vPT ou vBT : P très élevé + T élevé ou B très élevé + T élevé
 - Toxicité humaine élevée pour n'importe lequel des effets prioritaires⁵⁹
- Point de référence 2 : utiliser, mais rechercher des substituts plus sûrs
 - P modéré + B modéré + T modéré (toxicité humaine ou écotoxicité)
 - P élevé + B élevé
 - (P élevé + T modéré) ou (B élevé + T modéré)
 - Toxicité humaine modérée pour n'importe lequel des effets prioritaires ou toxicité humaine élevée
 - Inflammabilité ou explosivité élevées
- Point de référence 3 : utiliser, mais il y a une possibilité d'amélioration
 - P modéré ou B modéré
 - Écotoxicité modérée
 - Toxicité humaine modérée
 - Inflammabilité ou explosivité modérées
- Point de référence 4 : à préférer – Substance la plus sûre

⁵⁹ Certains effets sur la santé sont considérés dans le Green Screen comme prioritaires soit parce qu'ils interviennent à faible dose, qu'ils sont irréversibles, qu'ils sont difficilement gérables avec les moyens de maîtrise conventionnels ou parce qu'ils sont classés prioritaires dans des programmes d'évaluation gouvernementaux existants. Les effets prioritaires sont la cancérogénicité, la mutagénicité/génotoxicité, la toxicité sur le développement, la perturbation du système endocrinien et la neurotoxicité.

- Biodégradabilité facile (P faible) + B faible + Toxicité humaine faible + Écotoxicité faible

La figure 1 de l'annexe 6 présente le schéma de comparaison des substances évaluées avec les différents points de référence.

Green Screen a été utilisé pour comparer trois composés chimiques utilisés comme ignifugeants dans les boîtiers en plastique des téléviseurs. Ces composés sont le décabromodiphényléther ou décaBDE (CAS n° 1163-19-5) et deux de ses substituts potentiels à savoir le BPADP⁶⁰ et le RDP⁶¹. L'évaluation par le Green Screen est faite pour les principaux constituants des produits chimiques ainsi que pour leurs produits de dégradation. Le point de référence final du produit est déterminé par le point de référence le plus bas atteint par l'un de ses constituants ou par l'un de ses produits de dégradation. Les résultats obtenus montrent que le RDP atteint le point de référence 2 (utiliser, mais rechercher des substituts plus sûrs) alors que le décaBDE et le BPADP s'arrêtent au point de référence 1 (à éviter – Substance de niveau de préoccupation élevé). Selon le Green Screen, le RDP est ainsi une solution de remplacement moins dangereuse comparativement au décaBDE et au BPADP. Cependant, le RDP n'est pas un « composé chimique vert » puisqu'il n'a pas atteint le point de référence 4 (à préférer – Substance la plus sûre). Le détail des résultats de l'évaluation des trois ignifugeants est disponible dans le rapport du CPA (88).

3.2.10 Chemical Substitution Tree

Le Chemical Substitution Tree (CST) est un cadre conceptuel développé par des chercheurs de l'Université Harvard afin d'encourager les entreprises à considérer les risques pour le travailleur, l'environnement et le public lorsqu'elles font de la substitution de substances chimiques (52). Il s'agit d'un outil permettant la comparaison des différents risques posés par un substitut potentiel par rapport à la substance de référence actuellement en usage. Le CST comprend deux principales branches : l'une représentant l'utilisation du produit chimique et l'autre son élimination. Chacune de ces deux branches est divisée en trois sous-branches : l'environnement, les travailleurs et le public, si applicable. Les effets sur l'environnement sont évalués aux niveaux global (potentiel de réchauffement de la planète ou de déplétion de la couche d'ozone) et local (p. ex. concentration estimée sans effet (CESE⁶²) chez les organismes aquatiques ou terrestres). Concernant l'humain, les effets sont évalués à partir de trois paramètres : la sécurité (p. ex. inflammabilité, explosivité), la toxicité chronique (p. ex. dose de référence, valeur limite d'exposition professionnelle, cancérogénicité) et la toxicité aiguë (p. ex. dose létale 50). Le potentiel d'exposition durant l'utilisation et l'élimination des substances

⁶⁰ Le BPADP est un mélange d'oligomères dont le composé majoritaire est le bisphénol A tétraphényl diphosphate (CAS n° 5945-33-5).

⁶¹ Le RDP est un mélange d'oligomères dont le composé majoritaire est le bis(phosphate) de tétraphényle et de m-phénylène (CAS n° 57583-54-7).

⁶² Pour le calcul de la concentration estimée sans effet, voir :

http://www.ec.gc.ca/registrelcpe/documents/subs_list/evaleco-ecoassess/p5.cfm

chimiques est également pris en compte par le CST. L'utilisateur compare les différentes options à l'aide de flèches placées à la fin de chaque branche: une flèche dirigée vers le haut (↑) pour indiquer que le substitut est supérieur à la substance de référence, vers la bas (↓) pour indiquer qu'il est inférieur ou horizontale (↔) si les deux s'équivalent.

Le schéma d'évaluation des substituts avec le CST est présenté en annexe 7.

3.2.11 La matrice d'évaluation à cinq niveaux

La matrice d'évaluation à cinq niveaux a été développée par Ökopol⁶³ (Institute for environmental strategies, Hambourg) dans le but d'aider les entreprises à déterminer le profil de risque d'une substance ou de comparer des substances dangereuses avec leurs substituts potentiels relativement aux risques qu'ils représentent pour l'environnement. La matrice considère cinq critères relatifs aux propriétés toxicologiques des substances à savoir la persistance, la bioaccumulation, la toxicité aquatique, la toxicité chronique chez les vertébrés et la mobilité intrinsèque⁶⁴ ainsi que trois critères relatifs au profil d'utilisation c'est-à-dire la quantité, les conditions telles que la température, le contact avec l'eau et les rejets indirects (4). Ces différents facteurs de risque sont classés sur une échelle à cinq niveaux dans le tableau I.

⁶³ Voir : http://www.oekopol.de/index_en.htm

⁶⁴ La mobilité intrinsèque est déterminée par les propriétés de la substance telles que la pression de vapeur, la pulvéulence, la solubilité dans l'eau.

Tableau I : Matrice d'évaluation à cinq niveaux

Contribution au risque	Propriétés de la substance chimique					Profil d'utilisation			Indice de risque
	Persistence	Bioaccumulation	Toxicité aquatique	Toxicité chronique chez les vertébrés	Mobilité (intrinsèque)	Quantité	Conditions d'utilisation	Rejets indirects	
Niveau de contribution au risque									
Très élevé									
Élevé									
Moyen									
Faible									
Très faible									
Facteur de pondération									

Assignation du niveau de risque selon les propriétés PBT de la substance

L'attribution du niveau de risque pour la persistance, la bioaccumulation et la toxicité d'une substance se fait en se basant sur les phrases de risque (24) et sur l'information écotoxicologique contenue dans la FDS. Les tableaux XIV et XV de l'annexe 8 résument les critères permettant le classement des substances (4).

Assignation du niveau de risque selon la mobilité intrinsèque

Le potentiel d'émission des produits chimiques à partir des procédés et des produits finis dépend de leurs propriétés, mais aussi des conditions d'utilisation. Les propriétés considérées ici sont la solubilité aqueuse, la pression de vapeur et la taille des particules pour les substances solides. Pour les substances utilisées comme additifs dans différents matériaux (p. ex. les polymères), la force d'adhérence de la substance à la matrice est un paramètre d'importance. Le tableau XVI de l'annexe 8 donne les critères utilisés (4).

Assignation du niveau de risque selon la quantité utilisée

Le potentiel d'exposition va dépendre de la quantité annuellement utilisée dans l'entreprise et de l'usage de la substance (p. ex. substances utilisées dans des procédés industriels bien maîtrisés) (4) comme le montre le tableau XVII de l'annexe 8.

Assignation du niveau de risque selon les conditions d'utilisation

Selon les applications et les procédés, les conditions d'utilisation d'une substance vont avoir un impact sur la quantité rejetée dans l'environnement. Le tableau XVIII de l'annexe 8 résume les conditions prises en compte dans l'assignation du niveau de risque.

Assignation du niveau de risque selon les rejets indirects

Il faut tenir compte de toutes les voies par lesquelles les substances pourraient être rejetées dans l'environnement. Les paramètres tels que la voie d'élimination des eaux contenant des résidus de production (p. ex. eaux de rinçage, émulsions provenant de traitement des métaux), les intermédiaires de production qui pourraient involontairement rester dans le produit final (p. ex. résidus de biocides dans le papier ou de catalyseurs dans le plastique) ou encore la récupération des articles à la fin de leur cycle de vie (p. ex. ignifugeants lors du recyclage de composés électroniques) sont particulièrement importants.

L'utilisateur peut choisir de pondérer les différents facteurs qui contribuent au risque selon l'importance qu'il leur accorde dans son contexte particulier. Dans ce cas-là, le niveau de contribution au risque est évalué quantitativement de 1 à 5 au lieu de « très faible » à « très élevé » avant de multiplier avec les facteurs de pondération, ce qui permet d'aboutir à un indice de risque chiffré (voir tableau I) (3).

3.2.12 CHEMS

L'outil CHEMS⁶⁵ a été conçu par le Centre pour les produits et les technologies propres (Center for Clean Products and Clean Technologies) de l'Université du Tennessee. CHEMS a été développé pour le U.S. EPA comme un outil de soutien pour l'application de ses politiques et réglementations en rapport avec les substances toxiques. Il permet de hiérarchiser les substances pour lesquelles il faut chercher des substituts moins dangereux. CHEMS est une méthode de classement ordinal des dangers pour la santé humaine et pour l'environnement qui résultent uniquement d'une exposition environnementale. Le classement des substances se fait sur la base d'un score ou indice de danger total (I_{total}) qui dépend de trois critères : les effets sur la santé humaine, les effets environnementaux et le potentiel d'exposition (34).

$$I_{total} = (\text{Effets sur la santé humaine} + \text{Effets environnementaux}) \times \text{Potentiel d'exposition} \quad (9)$$

⁶⁵ CHEMS : Chemical Hazard Evaluation for Management Strategies

L'indice de danger total calculé par CHEMS correspond au score de l'impact sur le milieu aquatique dans l'outil IRCHS (voir § 3.2.5).

Score pour les effets sur la santé humaine

Sont inclus dans les effets sanitaires les effets aigus et chroniques avec comme critères d'évaluation respectifs la CL_{50} et la DL_{50} chez les rongeurs, la cancérogénicité et certains autres effets chroniques⁶⁶.

$$\text{Effets sur la santé humaine} = I_{DL_{50} \text{ orale}} + I_{CL_{50} \text{ inhalation}} + I_{\text{cancer}} + I_{\text{autres}} \quad (10)$$

À chacun des critères d'évaluation des effets sur la santé humaine, on attribue à l'indice de danger I un score allant de 0 (relativement non toxique) à 5 (extrêmement toxique).

Pour la toxicité aiguë par voie orale ou par inhalation, le score est basé sur le logarithme décimal de la CL_{50} et de la DL_{50} . Les données de CL_{50} et de DL_{50} doivent préférentiellement être expérimentales et provenir de bases de données telles que le HSDB (Hazardous Substances Data Bank). S'il n'y en a pas, une estimation peut être faite à partir de modèles SAR (relations structure-activité). S'il n'est pas possible de faire une estimation SAR, on prend note que les données sont manquantes et on attribue un score de 0. Les arbres décisionnels utilisés pour le calcul des scores pour la DL_{50} , la CL_{50} , le cancer et les autres effets sont annexés à la monographie de Davis et coll. (34).

S'agissant de la cancérogénicité, le score est obtenu à partir du classement fait par le U.S. EPA ou le CIRC. Si une substance est classée par les deux organismes (classement du CIRC autre que 3); une moyenne est effectuée pour déterminer le score I_{cancer} . Si un seul des organismes a classé la substance, ce classement est alors utilisé. Une évaluation est faite à partir du logiciel MICROQSAR 2.0 dans le cas où la substance ne serait classée par aucun des deux organismes (34).

A chacun des cinq autres effets (chroniques hors cancer, mutagénicité, neurotoxicité, effets sur la reproduction ou sur le développement) on attribue un sous-score de 1 ou de 0 selon que la substance cause ou non l'effet en question. La somme de ces sous-scores correspond au score I_{autres} .

Score pour les effets environnementaux

Les effets environnementaux incluent les effets aigus et chroniques sur la faune terrestre et les poissons avec comme critères d'évaluation la DL_{50} orale, la CL_{50} ⁶⁷ et le NOEL⁶⁸ chez les poissons.

⁶⁶ Neurotoxicité, mutagénicité, effets sur le développement et la reproduction.

⁶⁷ Dans CHEMS, la CL_{50} est la concentration de la substance chimique dans l'eau qui cause la mort de 50% des poissons lors d'un test de 96 heures.

⁶⁸ NOEL : No Observed Effect Level, c'est la dose sans effet observé, c'est-à-dire la dose administrée la plus élevée qui ne produit aucun effet toxique chez les poissons. Les auteurs soulignent que les valeurs

$$\text{Effets environnementaux} = I_{DL_{50} \text{ orale}} + I_{CL_{50} \text{ poissons}} + I_{NOEL \text{ poissons}} \quad (11)$$

Un score maximal de 5 peut être assigné à chacun des indices I. La DL_{50} orale est utilisée pour évaluer les effets aigus sur la faune terrestre incluant les mammifères, les oiseaux et les plantes. La méthode de calcul du score $I_{DL_{50} \text{ orale}}$ est la même que pour les effets aigus sur la santé (voir annexe A de la monographie de Davis et coll. (34)).

La CL_{50} utilisée est préférentiellement une donnée expérimentale mesurée chez la tête-de-boule. En l'absence de cette donnée, une CL_{50} mesurée chez une autre espèce de poisson d'eau douce peut être utilisée. S'il n'y a pas de données expérimentales, la CL_{50} est estimée en fonction du $\log K_{oe}$ à l'aide d'un logiciel QSAR. L'indice du danger pour la toxicité aquatique est déterminé à partir du logarithme décimal de la CL_{50} . L'arbre décisionnel est présenté en annexe A de la monographie de Davis et coll. (34).

Le $NOEL_{\text{poissons}}$ est estimé pour les substances inorganiques généralement très peu liposolubles à partir uniquement de leur CL_{50} . L'estimation est faite à partir de la CL_{50} et du $\log K_{oe}$ pour les substances organiques. Les substances organiques avec un $\log K_{oe}$ relativement élevé, c'est-à-dire supérieur ou égal à 5, sont généralement plus toxiques pour les poissons que celles avec un $\log K_{oe}$ faible, c'est-à-dire inférieur ou égal à 2. L'indice du danger pour les effets chroniques est déterminé en fonction de la valeur du logarithme décimal du NOEL (34).

Score pour les paramètres de l'exposition

L'exposition est évaluée à partir de la persistance et de la bioaccumulation.

$$\text{Potentiel d'exposition} = I_{DBO} + I_{Hydrolyse} + I_{FBC} \quad (12)$$

La persistance est mesurée à partir de la demi-vie de la demande biologique en oxygène⁶⁹ (DBO) et de la demi-vie d'hydrolyse⁷⁰. Ces deux paramètres sont estimés à partir du logiciel MICROQSAR 2.0. Un score de 1 est assigné si la demi-vie de DBO ou celle d'hydrolyse est inférieure à 4 jours. Le score est de 2,5 si les demi-vies sont supérieures à 500 jours. Entre les deux, une équation linéaire est utilisée pour calculer le score (34).

La bioaccumulation est quant à elle évaluée à partir du facteur de bioconcentration (FBC) que l'on estime à l'aide de l'équation QSAR suivante :

$$\text{Log FBC} = 0,910 \log K_{oe} - 1,975 \log(6,8 \cdot 10^{-7} K_{oe} + 1) - 0,786 \quad (13)$$

expérimentales du NOEL sont rares, raison pour laquelle le NOEL est estimé à partir de la CL_{50} et du coefficient de partage octanol-eau ($\log K_{oe}$).

⁶⁹ La demi-vie de DBO est la durée en jours requise pour qu'une substance se dégrade de telle sorte que sa DBO dans l'eau soit réduite de moitié par rapport à la quantité originelle.

⁷⁰ La demi-vie d'hydrolyse est la durée en jours requise pour que la quantité d'une substance soit réduite de moitié par une réaction d'hydrolyse à pH 7.

Cette équation tient compte des différences existant entre les espèces aquatiques et entre les individus d'une même espèce. Si le logarithme décimal du FBC est supérieur à 4, le score est de 2,5. S'il est inférieur à 1, le score est alors de 1. Une équation linéaire permet de calculer le score si les valeurs du FBC sont comprises entre 1 et 4.

La méthode d'attribution des scores pour la demi-vie de DBO et d'hydrolyse ainsi que pour le FBC est détaillée dans l'annexe A de la monographie de Davis et coll. (34).

La valeur maximale de l'indice I_{total} obtenue à partir de l'équation 9 devrait théoriquement être de 262,5, mais elle est normalisée pour équivaloir à 100.

Pondération par la quantité rejetée

Un facteur multiplicatif de pondération (FMP) est utilisé pour tenir compte des quantités annuelles de produits chimiques rejetés dans l'air et l'eau et répertoriés dans le Toxics Release Inventory⁷¹ (TRI).

$$FMP = \ln(\text{rejets}) - 10 \quad (14)$$

Le facteur de pondération est ensuite multiplié avec chacun des paramètres d'évaluation des effets sur la santé et sur l'environnement avant le calcul de l'indice I_{total} .

La méthode CHEMS a été initialement testée avec 158 substances issues du TRI et de la liste des pesticides à haut volume de production. Les résultats obtenus sont disponibles dans l'annexe C de la monographie de Davis et coll. (34) et montrent que les dangers relatifs à un grand nombre de substances peuvent être classés et hiérarchisés sur la même échelle afin d'établir des priorités. Les auteurs soulignent cependant qu'en raison de la variabilité et de l'incertitude liées aux données, l'interprétation la plus appropriée des résultats est de considérer des groupes de substances (p. ex. les 30 premiers ou le premier 20 %) plutôt que de faire une comparaison directe entre les substances (34, 97).

3.2.13 PestScreen

PestScreen est une méthode de hiérarchisation qui a été développée par des chercheurs de l'Université Rovira i Virgili de Tarragone en Espagne. L'objectif de la méthode est de quantifier le risque relatif des pesticides chez l'humain et sur l'environnement afin de mener à une meilleure gestion et une prise de décision plus éclairée quant à leur usage. L'évaluation est effectuée à partir 1) de la quantité de pesticides en termes d'ingrédients actifs rejetée dans l'environnement, 2) des indicateurs de devenir et d'exposition basés sur des calculs avec un modèle de dispersion multimédia et 3) des indicateurs de la toxicité humaine et environnementale (62, 63). Le résultat final du PestScreen est

⁷¹ Le Toxics Release Inventory est une base de données publique du U.S. EPA qui contient de l'information sur les émissions de substances chimiques toxiques et sur d'autres activités liées à la gestion des déchets reportées annuellement par des groupes industriels et des agences fédérales. Voir: <http://www.epa.gov/tri/>

l'attribution d'un score unique (PestScore) à chacun des pesticides étudiés. Ce score est calculé à partir des quatre paramètres suivants :

- La dose d'application (D), c'est-à-dire la quantité d'ingrédient actif utilisée, exprimée en kilogrammes par hectare cultivé.
- Le devenir (F) de la substance avec deux indicateurs : 1) la persistance globale (P_{ov}), c'est-à-dire le temps de résidence d'un contaminant dans un environnement donné et 2) le potentiel de transport à grande distance (Long-range Transport Potential ou LRTP) qui indique la capacité qu'a une substance chimique de mener à une exposition qui va continuer dans le temps ou se déplacer dans d'autres régions. Dans PestScreen, la persistance et le potentiel de transport sont calculés à l'aide du modèle de dispersion multimédia SimpleBox 3.0⁷² qui prédit le comportement des substances dans l'environnement.
- L'exposition (E) exprimée par la fraction ingérée (iF), c'est-à-dire la fraction de la quantité émise qui va être ingérée par la population humaine. iF est calculée à l'aide du modèle d'exposition et d'effet USES-LCA 2.0⁷³ (58).
- La toxicité (T), évaluée à partir de 1) la toxicité pour l'humain qui dépend de la dose journalière acceptable (DJA) et de la DL_{50} chez le rat, 2) de l'écotoxicité pour le milieu terrestre représentée par la DL_{50} chez l'abeille et enfin 3) de l'écotoxicité pour l'eau douce représentée quant à elle par la CL_{50} chez le poisson.

À partir des données précédentes, le PestScore est calculé selon l'équation suivante :

$$PestScore = D \times \left(\frac{\sum_{i=1}^2 Fi}{2} + E + \frac{\sum_{i=1}^4 Ti}{4} \right) \quad (15)$$

Un sous-score allant de 1 à 4 (faible à très élevé) est attribué à chacun des indicateurs F, E et T. L'indice i représente les indicateurs utilisés pour chaque paramètre.

Les tableaux II et III montrent la méthode d'assignation du niveau de préoccupation selon les indicateurs du danger et selon le PestScore.

Tableau II : Assignation des sous-scores pour chacun des indicateurs de danger du pesticide

Niveau de préoccupation	Sous-score	P_{ov} (jours)	LRTP	iF ($kg \cdot j^{-1} / kg \cdot j^{-1}$)	CL_{50} poisson (mg/L)	DJA (mg/kg PC/ jour)	DL_{50} rat (mg/kg PC)	DL_{50} abeille (μg /abeille)
Faible	1	≤ 44	$\leq 10^{-4}$	$\leq 2 \cdot 10^{-6}$	≥ 25	$\geq 0,05$	≥ 5000	≥ 100
Moyen	2	$44 \leq 61$	$10^{-4} \leq 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-6} \leq 4 \cdot 10^{-6}$	$25 \geq 2,5$	$0,05 \geq 0,01$	$5000 \geq 1800$	$100 \geq 20$
Élevé	3	$61 < 106$	$10^{-3} < 6 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-6} < 10^{-5}$	$2,5 > 0,2$	$0,01 \geq 0,005$	$1800 > 250$	$20 > 1,5$
Très élevé	4	≥ 106	$\geq 6 \cdot 10^{-3}$	$\geq 10^{-5}$	$\leq 0,2$	$\leq 0,005$	≤ 250	$\leq 1,5$

P_{ov} : persistance globale, PC: Poids corporel, LRTP: Long-range Transport Potential, CL_{50} : concentration létale 50, DJA: dose journalière acceptable, iF : fraction ingérée, DL_{50} : dose létale 50

⁷² Voir : <http://www.rivm.nl/milieuportaal/bibliotheek/modellen/Simplebox.jsp>

⁷³ Voir : <http://lca.jrc.ec.europa.eu/lcainfohub/tool2.vm?tid=217>

Tableau III : Assignation du niveau de préoccupation du pesticide selon la valeur du PestScore

Niveau de préoccupation	Classe	PestScore
Faible	I	$\leq 2,5$
Moyen	II	$2,5 \leq 5,9$
Élevé	III	$5,9 \leq 12$
Très élevé	IV	≥ 12

L'applicabilité du modèle a été vérifiée en évaluant 217 pesticides (herbicides, insecticides et fongicides) utilisés dans la production de tomates en Espagne. Les pesticides évalués incluent des produits tels que l'aldrine, le lindane ou le dichlorodiphényltrichloroéthane (DDT) dont l'utilisation est bannie ou restreinte dans la plupart des pays industrialisés. Les résultats obtenus montrent que les 2/3 des insecticides halogénés évalués avaient un niveau de préoccupation élevé ou très élevé. Les auteurs concluent que le PestScreen permet de comparer le danger relatif de différents pesticides pour la santé humaine et pour l'écosystème, mais aussi de déterminer l'ingrédient actif qui serait le plus inoffensif pour l'environnement (62, 63). La liste des 217 pesticides étudiés peut être obtenue sur demande à l'auteur-ressource.

3.3 Outils auxiliaires

3.3.1 Bases de données physicochimiques et toxicologiques

Les méthodes d'évaluation et de comparaison précédemment décrites nécessitent la connaissance d'un certain nombre de paramètres physicochimiques et/ou toxicologiques relatifs aux substances à évaluer. L'utilisation de bases de données physicochimiques et toxicologiques est nécessaire pour identifier les propriétés (p. ex. DL₅₀, RfD, VLE⁷⁴, FBC) des substances à évaluer. Il existe de nombreuses bases disponibles dans Internet. C'est le cas notamment d'HSDB, de Gestis et d'eChemPortal, décrites dans l'annexe 9.

3.3.2 Valeurs limites d'exposition

L'absence d'une VLE pour une substance à évaluer est problématique pour plusieurs des outils de comparaison décrits précédemment. C'est souvent le cas pour les « nouvelles » substances pour lesquelles peu de données toxicologiques sont publiées dans la littérature. Il existe des guides pour l'élaboration des VLE (54), particulièrement pour les substances peu étudiées (37) mais l'expertise d'un toxicologue est essentielle. En l'absence de VLE réglementaires locales ou de recommandations de l'ACGIH, il est possible d'utiliser des VLE élaborées par des organismes reconnus ou sous d'autres juridictions. Par exemple, les WEEL (Workplace Environmental Exposure Level) de l'AIHA (6), mais aussi les VLE élaborées dans les pays nordiques et en Allemagne, dont

⁷⁴ Valeur limite d'exposition professionnelle

plusieurs sont disponibles en ligne⁷⁵ et pour lesquels la documentation ayant servi à leur élaboration est publiée.

3.3.3 Modèles QSAR

Il existe également des outils pour évaluer la toxicité d'une substance à partir de modèles de prédiction se basant généralement sur les QSAR (38). Leur recension dépasse le cadre de ce travail. On peut cependant mentionner à titre d'exemple le logiciel HAZASSESS⁷⁶ qui évalue le risque d'induction de l'asthme (61, 86). Le U.S. EPA propose divers outils dont Oncologic⁷⁷ (114) pour l'évaluation du potentiel cancérigène, EPI Suite⁷⁸ (110) (voir Annexe 10) pour l'estimation de plusieurs paramètres environnementaux et physicochimiques et PBT Profiler⁷⁹ (100) pour l'estimation de la persistance, de la bioaccumulation et de la toxicité chronique pour le poisson (voir Annexe 10). Le Bureau européen des substances chimiques suggère d'utiliser le logiciel Toxtree⁸⁰ pour estimer la toxicité des substances en se basant sur l'arbre de décision de Cramer et coll. (31).

Soulignons qu'il n'entrait pas dans les objectifs de ce rapport de recenser tous les outils auxiliaires existants. Il en existe plusieurs, dont certains spécifiques à un secteur d'activité. C'est le cas du Chemical Reactivity Worksheet⁸¹ qui peut être utilisé par les industries chimiques pour identifier les données relatives à la réactivité des substances et mélanges chimiques à partir des groupements réactifs qu'ils contiennent (p. ex. époxy, organométalliques, amines) (77).

3.4 Banques de cas de substitution

Afin de rendre facilement disponible des solutions pratiques à divers problèmes de santé et de sécurité dans les milieux de travail, plusieurs organismes ont élaboré des banques de données ou répertoires de cas. Certains systèmes ont disparu (19, 55), mais l'intérêt pour de tels outils est toujours présent (99). À titre illustratif, quatre banques de cas sont présentées dans cette section. Les deux premières traitent spécifiquement de substitution alors que les deux dernières comprennent également des études faisant appel à d'autres méthodes de prévention.

⁷⁵ Voir : http://www.hvbg.de/e/bia/gestis/limit_values/index.html et <http://www.ilo.org/public/english/protection/safework/cis/products/explim.htm>

⁷⁶ Voir : <http://homepages.ed.ac.uk/jjarvis/research/hazassess/>

⁷⁷ Voir : <http://www.epa.gov/oppt/newchems/tools/oncologic.htm>

⁷⁸ Estimations Programs Interface Suite. Voir : <http://www.epa.gov/oppt/exposure/pubs/episuite.htm>

⁷⁹ Voir : <http://www.pbtprofiler.net/>

⁸⁰ Voir : <http://ecb.jrc.ec.europa.eu/qsar/qsar-tools/>

⁸¹ Voir : <http://response.restoration.noaa.gov/chemaids/react.html>

3.4.1 Catsub

Le catalogue danois Catsub⁸² est un portail donnant accès à des expériences réussies de substitution de matières dangereuses dans différents secteurs et procédés. Le catalogue a pour but d'inspirer les professionnels de la santé au travail et de la santé environnementale à la recherche de solutions de remplacement de substances dangereuses. Il contient près de 230 cas de substitutions menées au Danemark par des entreprises, des professionnels ainsi que des chercheurs. Les exemples décrits couvrent des secteurs tels que l'industrie du plastique et du caoutchouc, les métaux, l'industrie chimique ou encore la construction. Cent vingt et un cas de substitution contenus dans Catsub sont disponibles en français après qu'une collaboration ait été engagée entre l'AFSSET⁸³ et le gestionnaire de Catsub. Parmi ces 121 cas, une quarantaine concerne des substances qui ne sont pas des solvants (p. ex. substitution des ignifugeants halogénés, du plomb dans le brasage tendre, de l'isocyanurate de triglycéride ou TGIC utilisé comme durcisseur dans les peintures en poudre, des siccatifs à base de cobalt ou encore de l'hydrazine utilisée dans les eaux de chaudière).

3.4.2 SubChem (Sustainable substitution of hazardous chemicals)

Le projet « Options for viable innovation systems for successful substitution of hazardous chemicals » ou SubChem⁸⁴ a été réalisé dans le cadre du programme « Framework conditions for innovation towards sustainability » financé par le ministère allemand pour l'Éducation et la Recherche. L'objectif de ce projet de recherche, commencé en octobre 2001, était de déterminer sur la base de treize études de cas les conditions dans lesquelles la substitution des substances dangereuses pouvait ou non se faire et avec quels acteurs. La moitié de ces études de cas concernaient des substances hors solvants (p. ex. amiante, fibres céramiques réfractaires, chrome dans le ciment, phtalate de bis(2-éthylhexyle) ou DEHP, biocides dans les fluides de coupe). Les résultats du projet SubChem ont fait l'objet d'un livre publié en 2006 (5).

3.4.3 Enviroclub

Enviroclub⁸⁵ est un concept mis en place par trois organismes du gouvernement du Canada en partenariat avec le secteur privé. L'objectif d'Enviroclub est de permettre aux dirigeants des PME de mieux comprendre les avantages de la gestion environnementale et de faire l'expérience d'un projet de prévention de la pollution. Les entreprises intéressées par le concept doivent présenter leur projet auprès des experts d'Enviroclub. Les projets admissibles doivent concerner la prévention de la pollution (p. ex. substitution ou diminution de l'usage des substances toxiques, recyclage et réutilisation des

⁸² Voir : <http://www.catsub.dk>

⁸³ Voir : <http://www.enjeux-cmr.fr/liens.htm>

⁸⁴ Voir : <http://www.subchem.de/>

⁸⁵ Voir : <http://www.enviroclub.ca/>

matériaux, optimisation de procédés de production) ou la mise en place d'un système de gestion environnementale. Les entreprises dont le projet est retenu acquittent les frais d'inscription et bénéficient d'un soutien technique et financier pour l'exécution du projet en usine. Les projets les plus intéressants sont mis en évidence par l'élaboration d'une fiche d'information décrivant les faits saillants du projet. Ces fiches, au nombre de 65, sont regroupées dans une base de données disponible sur le site Web d'Enviroclub.

3.4.4 Centre canadien d'information sur la prévention de la pollution

Le Centre canadien d'information sur la prévention de la pollution (CCIPP⁸⁶) est une base de données en ligne mise en place par le ministère de l'Environnement du Canada et contenant de l'information relative à la prévention de la pollution. La recherche peut se faire par mot-clé (p. ex. nom de substance) ou par secteur (p. ex. construction, exploitation minière, fabrication) et donne accès à près de 2000 ressources. Ces ressources incluent des rapports sur des substances et matériaux de remplacement, mais également des références d'organismes travaillant sur la prévention de la pollution ou encore des fiches d'information sur des substances dangereuses.

3.5 Documentation spécifique

De nombreux organismes gouvernementaux et paragouvernementaux ont effectué des travaux reliés à la substitution des substances chimiques toxiques. Ces travaux sont généralement sous la forme de sites Web ou de monographies permettant l'identification de substances et procédés de remplacement. On peut d'ailleurs remarquer que certains de ces organismes, notamment le TURI ou le LCSP, ont également élaboré des méthodes générales de substitution et/ou des méthodes de comparaison des substituts potentiels, méthodes déjà présentées précédemment dans ce rapport.

3.5.1 PNUE

Le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) a développé une base de données en ligne nommée «UNEP POPs Database on alternatives⁸⁷» qui permet de trouver des solutions de remplacement à certains polluants organiques persistants (POP) tels que l'aldrine, le chlordane ou encore le DDT. L'utilisateur peut choisir un domaine d'utilisation (p. ex. agriculture) et le type de solution recherchée (p. ex. produits chimiques, solutions technologiques) avant d'effectuer la recherche. Les données renvoyées par le système comprennent, pour chaque solution de remplacement, les types d'usages spécifiques, les propriétés physicochimiques et la réglementation s'il y a lieu (106).

⁸⁶ Voir : <http://www.ec.gc.ca/cppic/Fr/index.cfm>

⁸⁷ Voir : <http://dbserver.irptc.unep.ch:8887/irptc/owa/ini.init>

3.5.2 TURI

La monographie intitulée « Five Chemicals Alternatives Assessment Study » et publiée en 2006, traite du remplacement de cinq produits et familles de produits chimiques, à savoir le chrome hexavalent, le formaldéhyde, le perchloréthylène, le plomb et ses composés et enfin le DEHP (105). La méthodologie développée pour mener à bien cette étude est décrite au § 3.1.4. Pour chacune des cinq substances à l'étude, des utilisations prioritaires ont été choisies en fonction du contexte dans l'état du Massachusetts. Pour chacune de ces utilisations prioritaires, les solutions de rechange (substances, matériaux, solutions technologiques) disponibles ou émergentes ont été identifiées et évaluées comparativement avec le produit chimique à remplacer. Le lecteur est référé au rapport du TURI pour plus de détails quant aux résultats de cette étude (105).

3.5.3 LCSP

Le LCSP a été créé en 1995 par deux chercheurs de l'Université du Massachusetts. Il s'agit d'un centre reconnu dans le domaine de la production et de la consommation durables. Les travaux du LCSP concernent notamment l'évaluation des solutions de remplacement aux substances toxiques (voir aussi plus haut au § 3.1.3). Des monographies portant sur les substituts potentiels à certains ignifugeants bromés (TBBPA⁸⁸, HBCDD⁸⁹ et décaBDE), sur le mercure et sur le DEHP ont d'ailleurs été récemment publiées (47, 48, 73, 84, 103).

3.5.4 AGS

Le Comité allemand pour les substances dangereuses AGS⁹⁰ (Ausschuss für Gefahrstoffe) établit des règles techniques en matière de substances dangereuses ou TRGS⁹¹. Ces règles fournissent de l'information concernant le travail avec les produits chimiques dangereux, notamment les mesures d'hygiène, la classification et l'étiquetage (41). Parmi ces TRGS, on note la série 600 qui traite spécifiquement de la substitution de substances et de procédés :

- La TRGS 602 sur les chromates de strontium et de zinc utilisés comme pigments anticorrosion et classés cancérigènes de catégorie 2 par l'UE.
- La TRGS 608 sur l'hydrazine dans l'eau et les systèmes de chauffage à la vapeur; l'hydrazine est également cancérigène de catégorie 2.
- La TRGS 614 sur les colorants azoïques (amines aromatiques) dont certaines sont cancérigènes de catégorie 2.

⁸⁸ Tétrabromobisphénol A (CAS 79-94-7)

⁸⁹ Hexabromocyclododécane (CAS 3194-55-6)

⁹⁰ L'AGS est un comité tripartite dont le secrétariat est situé au BAuA. Il fait des recommandations au ministère fédéral du Travail et des Affaires sociales qui publie les règlements dans la gazette officielle allemande.

⁹¹ Technische Regeln für Gefahrstoffe (Technical Rules for Hazardous Substances)

- La TRGS 616 sur les polychlorobiphényles.
- La TRGS 618 sur les produits de protection du bois contenant des chromates.
- La TRGS 619 sur les produits contenant de la laine de silicate d'aluminium.

La majorité des TRGS précédemment cités ne sont disponibles qu'en version allemande.

3.5.5 KEMI

L'Agence suédoise des produits chimiques a publié en 2006 une évaluation technique sur les substituts potentiels pour le TBBPA et le HBCDD utilisés comme ignifugeants dans les polymères et les produits textiles (83).

3.5.6 INRS

L'INRS publie sur son site Web des fiches d'aide à la substitution ou FAS⁹². Ces fiches sont rédigées par un groupe d'ingénieurs-conseils et de conseillers médicaux des Caisses régionales d'assurance maladie en France et ont pour objectif d'aider à la recherche de solutions de substitution (substances et procédés). Il s'agit de fiches pratiques concernant des agents cancérigènes qui seront mises à jour ou bonifiées en fonction de l'état des connaissances. Actuellement, une vingtaine de FAS peuvent être téléchargées. En dehors des solvants, il y a notamment les fiches concernant la substitution des fibres céramiques réfractaires utilisées pour l'isolation thermique, celle du formaldéhyde dans les fluides d'usinage aqueux, celle des oxydes de chrome VI dans le chromage électrolytique de l'acier ou encore la substitution du chromate de plomb utilisé en plasturgie.

Par ailleurs, l'INRS a également publié une brochure résumant les différents matériaux et technologies de rechange à l'amiante ainsi que les applications dans lesquelles ils pourraient être utilisés (59).

3.5.7 AFSSET

Depuis la fin de 2006, l'AFSSET se penche sur la substitution des agents chimiques CMR de catégories 1 et 2 selon le classement de l'UE à la demande de la Direction générale du travail en France. Une série de substances prioritaires font l'objet d'investigations, d'études et de recherches bibliographiques. Le site Web « enjeux-CMR⁹³ » a pour vocation d'héberger la base de données résultante. Ce site est par ailleurs un portail menant à diverses ressources reliées aux CMR et à la substitution, notamment la banque de cas Catsub citée ci-dessus. Notons également que l'AFSSET constitue sa propre banque de cas de substitution basée sur l'expérience des acteurs terrain de la prévention en France, base qui sera rendue accessible sur le même site Web en 2009.

⁹² Voir : <http://www.inrs.fr/>

⁹³ Voir : <http://www.enjeux-cmr.fr/>

3.5.8 U.S. EPA

Le U.S. EPA a publié plusieurs séries de documents pouvant aider à l'identification de substances et procédés de substitution. Parmi ces documents, on retient particulièrement les suivants :

- La série « Sector Notebooks⁹⁴ » qui dresse le profil d'une trentaine de secteurs industriels tels que les pâtes et papiers, le caoutchouc et le plastique ou encore l'industrie des pesticides. Les documents comprennent entre autres de l'information sur les procédés utilisés, les rejets environnementaux, les exigences réglementaires mais également les techniques de prévention de la pollution parmi lesquelles la substitution. Selon les secteurs, les données concernant la substitution représentent une part plus ou moins importante dans les méthodes de prévention disponibles.
- La série « Guide to Cleaner Technologies » et « Cleaner Technologies Substitutes Assessment » qui identifient et évaluent des substances, des matériaux et des technologies de remplacement plus sûres que ceux traditionnellement utilisés, et ce, pour une grande variété d'activités (113).
- Le document « The Product Side of Pollution Prevention : Evaluating the Potential for Safe Substitutes » recense de potentiels substituts à certains métaux comme le plomb et le mercure dans les batteries ou encore le cadmium et le chrome utilisés pour l'électrodéposition (33).

3.5.9 D-EPA

L'agence de protection de l'environnement danoise (D-EPA) a publié plusieurs monographies sur la substitution. On peut noter une étude ayant porté sur le remplacement des siccatifs au cobalt par des produits à base de manganèse et de vanadium. Différents produits y ont été évalués concernant leurs effets sur la santé et l'environnement ainsi que leurs performances techniques. Les siccatifs à base de manganèse se sont révélés meilleurs substituts que ceux à base de cobalt même s'il faut noter qu'ils présentent certains effets délétères et nocifs pour les organismes aquatiques (82). Le D-EPA a également étudié la substitution des phtalates utilisés comme plastifiants (96) et celle des ignifugeants bromés (69).

3.5.10 DPPEA

La DPPEA est le service de la prévention de la pollution et d'assistance environnementale⁹⁵ de la Caroline du Nord. Son site Web « Pollution Prevention Pays » (la prévention est rentable) contient les références de nombreux cas de substitution réussie. L'utilisateur peut faire une recherche par mot-clé et trouver des options de

⁹⁴ Voir : <http://www.epa.gov/compliance/resources/publications/assistance/sectors/notebooks/index.html>

⁹⁵ Division of Pollution Prevention and Environmental Assistance. Voir à l'adresse suivante : www.p2pays.org

remplacement de substances toxiques. Le site Web « Pollution Prevention Pays » est représentatif de plusieurs initiatives du genre réalisées par des États américains.

3.5.11 Ministère de la Défense des États-Unis

Différents services du ministère de la Défense des États-Unis ont participé à l'élaboration du manuel « Joint Service Pollution Prevention Opportunity Handbook⁹⁶ », disponible en ligne. Ce manuel permet d'identifier des techniques de prévention de la pollution, de meilleures pratiques de gestion et des changements dans le procédé qui vont conduire à une réduction de la quantité de déchets dangereux générés dans les installations industrielles. Le site Web renferme de nombreux exemples de produits et procédés de remplacement de substances toxiques, notamment dans le domaine de l'électrodéposition ou du traitement des surfaces métalliques, des fluides de coupe contenant des solvants ou encore de certaines substances appauvrissant la couche d'ozone utilisées pour la climatisation ou la réfrigération (75). De plus, le NDCEE⁹⁷, un autre organisme du ministère de la Défense des États-Unis, a publié un rapport portant sur le remplacement du cadmium utilisé comme revêtement d'inhibition de la corrosion pour différentes surfaces métalliques (27).

3.5.12 Gouvernement britannique

Deux ministères britanniques ont publié des rapports abordant le thème de la substitution. Il y a d'abord la Direction de la Normalisation du ministère de la Défense qui a réalisé un guide portant sur les substituts au cadmium, utilisé comme revêtement protecteur pour le matériel militaire. Ce document fournit une liste des différents substituts disponibles ainsi que des directives permettant d'identifier le substitut le plus adéquat selon le type de pièce et la nature du substrat (35). Il y a également le ministère pour l'environnement, l'Alimentation et les Affaires rurales (DEFRA⁹⁸) qui publie des monographies portant sur les stratégies de réduction des risques des produits chimiques, parmi lesquelles la substitution. Parmi les substances étudiées, il y a l'acrylamide (42), le nonylphénol (45) et l'octabromodiphényléther (29).

3.5.13 NIST

Le NIST⁹⁹ a produit en collaboration avec l'École des Mines du Colorado, une base de données en ligne gratuite portant sur la substitution du plomb utilisé comme métal d'apport pour la soudure. Cette base de données compile les caractéristiques physiques (résistance à la traction, au cisaillement, au fluage, résistivité électrique, dilatation

⁹⁶ Voir : http://205.153.241.230/P2_Opportunity_Handbook/introduction.html

⁹⁷ National Defence Center for Environmental Excellence

⁹⁸ Department for Environment, Food and Rural Affairs. Voir: <http://www.defra.gov.uk/index/default.htm>

⁹⁹ National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland

thermique, ductilité) de plusieurs métaux et alliages pouvant être utilisés à la place du plomb (92).

4. Discussion

Une quarantaine d'outils pouvant aider à la substitution des substances chimiques toxiques et divisés en cinq catégories ont été décrites dans ce rapport. Il s'agit de cinq démarches générales, de quatorze outils d'évaluation et de comparaison des substituts potentiels, de divers outils auxiliaires alimentant en données les outils précédents, de quatre banques de cas de substitution et enfin de la liste d'une dizaine d'organismes ayant produit des documents sur la substitution. Rappelons que les outils applicables plus spécifiquement aux solvants ont fait l'objet d'une recension séparée (12).

4.1 Démarches générales de substitution

Bien que certaines aient été développées spécifiquement pour les solvants, les démarches générales de substitution par étapes, résumées dans ce rapport peuvent être appliquées pour tout projet de substitution indépendamment de la nature du produit chimique à remplacer. Ces méthodologies, incluant PRIO, s'adressent essentiellement aux entreprises et définissent une série d'étapes à suivre afin de réaliser adéquatement un projet de substitution en tenant compte de dimensions multiples reliées principalement aux aspects santé et sécurité du travail et environnement. Elles sont très proches, bien que s'inscrivant dans des contextes réglementaires assez différents. La méthodologie présentée par le TURI, avec des étapes très semblables aux approches précédentes, découle quant à elle d'une démarche gouvernementale visant à favoriser la substitution sur un territoire donné, en tenant compte notamment du contexte industriel et économique spécifique.

Le cadre conceptuel (Alternatives Assessment Framework) développé par le LCSP est une approche qui se veut globale puisqu'elle ne se limite pas à l'identification et la comparaison des substances et produits chimiques afin de choisir l'option qui est préférable pour la santé et l'environnement. Le texte de Rossi et coll. présente un cadre de référence qui est en fait une politique générale de la substitution s'appliquant aux substances et procédés chimiques, mais également aux matériaux, aux systèmes économiques ou aux fonctions (89). À cet égard, ce document s'apparente au plaidoyer de Thorpe et Rossi pour la mise œuvre généralisée de la substitution par l'application systématique du principe de précaution (101) et ultimement au concept d'écologie industrielle présenté par van Berkel et coll. (116). Les trois « éléments » du cadre (« framework ») ne constituent pas en tant que tels un plan à suivre pour l'hygiéniste du travail ou de l'environnement. Le troisième élément de ce cadre de référence (« evaluation modules ») liste d'ailleurs plusieurs véritables outils (p. ex. Quick Scan, modèle à colonnes, P2OASys, Cradle-to-Cradle, CARS, par ailleurs décrits dans ce rapport) qui peuvent être utilisés, mais n'en recommande aucun en particulier. Les auteurs listent ces outils pour réaliser la partie sanitaire et environnementale de l'évaluation des solutions de rechange mais recommandent en plus d'évaluer la performance sociale des options de rechange (pratiques de travail, droits humains).

Le CTSA du U.S. EPA est la démarche générale la plus complète et la plus détaillée de toutes celles décrites dans le cadre de ce travail. Son utilisation nécessite plus de moyens financiers et d'expertise scientifique et technique (p. ex. toxicologie, analyse du risque). De ce fait, les utilisateurs cibles du CTSA devraient être de grandes entreprises, des experts ou encore des consultants travaillant pour le compte d'entreprises plus petites.

Les démarches générales de substitution ont comme objectif l'identification des principales étapes d'un projet de substitution d'une substance toxique. Elles ne permettent cependant pas de choisir le meilleur substitut et doivent donc être complétées par un outil de comparaison qui guidera la prise de décision quant à la meilleure option de remplacement.

4.2 Outils d'évaluation et de comparaison des substituts potentiels

Cette discussion porte sur les douze¹⁰⁰ outils d'évaluation et de comparaison des substituts potentiels pour lesquels une description détaillée est disponible. Une courte synthèse de ces outils est proposée au § 4.2.14 ainsi qu'au tableau IV qui résume les principales caractéristiques des différents outils.

4.2.1 Méthodes de gestion graduée

4.2.1.1 Méthodologie d'évaluation simplifiée du risque chimique

La méthodologie élaborée par Vincent et coll. permet l'évaluation des risques chimiques jugés prioritaires dans le contexte d'une entreprise donnée. L'évaluation du danger se base prioritairement sur l'information contenue dans la FDS d'où l'importance de vérifier que cette information est exacte. La méthodologie de Vincent et coll., comme Stoffenmanager, n'est pas à la base conçue pour comparer des substances. Elle peut cependant être utilisée à cette fin. Pour ce faire, deux solutions peuvent être envisagées par l'utilisateur. La première s'applique dans le cas où l'option de remplacement est une nouvelle substance n'ayant jamais été utilisée dans l'entreprise. Il faudrait alors faire une recherche bibliographique pour identifier le type de procédé dans lequel cette nouvelle substance est utilisée et quels moyens de maîtrise sont mis en place avant de pouvoir effectuer l'évaluation du risque. La deuxième solution serait de considérer que les conditions d'utilisation des substances à comparer (procédé, moyens de maîtrise) sont identiques; ce qui finalement revient à comparer les dangers inhérents aux substances à partir de leurs FDS et de leur état physique. L'utilisation des phrases de risque pour évaluer le danger pourrait être une limite dans la mesure où ces phrases disparaîtraient des FDS avec la mise en œuvre du Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques (SGH).

¹⁰⁰ Les outils CARS et Cradle-to-Cradle Design Protocol sont exclus parce qu'ils n'ont pas été consultés dans le cadre du présent travail.

La méthodologie globale d'évaluation des aspects « santé », « incendie » et « environnement » nécessite un nombre important de paramètres, ce qui rend difficile une mise en œuvre manuelle de la méthodologie. Le développement d'un logiciel a été envisagé par l'INRS (16) mais il est pour l'instant indisponible. Toutefois, un fichier Excel se basant sur la méthodologie de Vincent et coll. a récemment été mis en ligne par la Caisse régionale d'assurance maladie Alsace-Moselle. Ce fichier nommé CLARICE¹⁰¹ (Classeur d'aide à l'évaluation du risque chimique en entreprise) est accessible gratuitement (30).

4.2.1.2 Stoffenmanager

Stoffenmanager est avant tout un outil d'évaluation des risques liés à une substance chimique donnée. Il est pratique d'utilisation pour les PME parce qu'il est en ligne, qu'il nécessite des informations faciles d'accès, notamment les phrases de risques contenues dans la FDS, la description de la tâche accomplie, les moyens de maîtrise mis en place et les équipements de protection individuelle utilisés. C'est un outil d'aide à la substitution parce qu'il permet de mesurer l'impact qu'aurait le remplacement d'une substance dangereuse par une autre. Cependant, le calcul du score pour le substitut potentiel se fait en considérant que les conditions dans lesquelles la nouvelle substance est utilisée sont les mêmes (p. ex. durée, fréquence, équipements de protection individuelle) puisque l'utilisateur n'a pas à saisir de nouveau ces informations. Le nouveau risque calculé ne dépend donc que de la dangerosité (phrases de risques) de la substance. La consultation des FDS uniquement aurait donc permis une telle comparaison des deux substances. De plus, il faut remarquer que l'évaluation de l'impact de la substitution comme moyen de maîtrise ne peut se faire que s'il s'agit de risques par inhalation. Pour les risques cutanés, la version actuelle de Stoffenmanager ne permet pas à l'utilisateur de saisir les données concernant le substitut potentiel. Par ailleurs, comme dans la méthodologie de Vincent et coll., l'évaluation du danger dans Stoffenmanager se fait à partir des phrases de risque qui ne devraient plus apparaître sur les FDS avec la mise en œuvre du SGH.

4.2.2 Le modèle à colonnes

Le modèle à colonnes du BGIA est un outil d'utilisation facile destiné aux entreprises et ne nécessitant que l'information contenue dans les FDS allemandes, à savoir les phrases de risque et les classes de contaminants de l'eau. Si cette information est incomplète ou erronée, il y aura forcément une incidence sur les résultats de l'évaluation. L'approche est protectrice dans le cas où certaines données de toxicité sont indisponibles pour certaines substances puisqu'on leur assigne un niveau de risque élevé (p. ex. s'il n'y a aucune donnée sur la mutagénicité). De plus, quand aucune des substances évaluées ne présente le niveau de risque le plus faible pour toutes les catégories de risque, l'interprétation des résultats dépend logiquement du jugement de l'utilisateur quant aux colonnes les plus importantes dans la situation concrète à l'étude. Les mélanges de produits chimiques

¹⁰¹ Voir : <http://www.cram-alsace-moselle.fr/Prevent/doc/pdfreco/CLARICE25.xls> et <http://www.cram-alsace-moselle.fr/Prevent/doc/pdfreco/CLARICE100.xls>

peuvent être évalués par le modèle à colonnes, mais uniquement si une FDS leur est associée. Notons également qu'à l'instar des deux outils précédents, le modèle à colonnes utilise les phrases de risque pour évaluer le danger inhérent des produits chimiques, phrases qui sont appelées à disparaître avec le SGH.

Edwards et coll. soulignent que le modèle à colonnes est très subjectif et qu'il devrait être utilisé avec prudence du fait des incertitudes liées aux données et du mélange entre les données quantitatives, semi-empiriques et qualitatives utilisées pour compléter la matrice (39).

4.2.3 GISCODE

Les GISCODE font partie d'un système d'information (GISBAU) destiné aux entreprises de la construction en Allemagne. La consultation de ces codes permet à un utilisateur de choisir facilement le produit commercial le moins dangereux pour une application particulière. Ce système, par sa simplicité, est à rapprocher du MAL-code exigé par la législation danoise sur les produits contenant des solvants (36).

Une des caractéristiques majeures du GISBAU est qu'il s'agit d'un système issu de la collaboration entre les entrepreneurs en construction, les caisses mutuelles d'assurance accident et les fabricants de produits chimiques. Cette collaboration pour la mise en place du GISBAU explique le fait que même s'il ne s'agit pas d'une obligation légale, la grande majorité des fabricants de produits chimiques dans le domaine participent au système et fournissent l'information nécessaire à l'étiquetage de leurs produits. Des compétiteurs acceptent donc que leurs produits soient comparés sur la même base en matière de risque, ce qui ne peut que les encourager à fabriquer des produits présentant le moins de risques sanitaires possible.

Il y a peu de documentation officielle sur les GISCODE disponible autrement qu'en allemand. La base de données en ligne WINGIS contenant les différentes fiches est censée être traduite en anglais et en français. La traduction est en fait très partielle.

4.2.4 P2OASys

P2OASys est théoriquement simple d'utilisation puisqu'il s'agit d'un fichier de tableur et que le calcul se fait automatiquement une fois que les données sont saisies. Il nécessite cependant énormément de données quand on considère les onze catégories de dangers et la soixantaine de critères évalués. Certaines données sont difficilement accessibles (p. ex. WBGT¹⁰²) alors que d'autres sont propres à la réglementation des États-Unis (p. ex. NESHAP¹⁰³, HWQC¹⁰⁴). La présence dans le tableur de certains critères comme la solubilité aqueuse et la densité relative n'est pas formellement justifiée. Tickner (102)

¹⁰² Wet-bulb Globe Temperature : Température mesurée à l'aide d'un thermomètre à globe mouillé pour l'évaluation de la contrainte thermique.

¹⁰³ National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants

¹⁰⁴ Human Health Water Quality Criteria

affirme en outre qu'ils ne sont utilisés qu'à des fins qualitatives, n'intervenant pas dans le calcul du score. Des erreurs et oublis dans le tableur rajoutent à la confusion. Ainsi, le FBC est exprimé en kg/l alors qu'il est sans dimension et il n'est possible de saisir les valeurs de DIVS¹⁰⁵ et de CL₅₀ qu'en ppm alors que pour les solides (aérosols) l'unité est le mg/m³. Lors de l'évaluation de produits solides, il n'est donc pas possible de tenir compte de ces deux critères même s'ils sont disponibles. Une autre limite d'importance concernant P2OASys se trouve dans l'attribution des scores qualitatifs de type faible, moyen ou élevé pour certains critères tels que l'irritation respiratoire ou l'absorption cutanée. C'est à l'utilisateur d'évaluer le niveau de risque selon les données dont il dispose, ce qui pourrait entraîner des différences significatives dans l'attribution de ces scores selon l'utilisateur, les données disponibles et l'appréciation faite de ces données. En outre, soulignons que le manuel de l'utilisateur de P2OASys (102) est une ébauche, aucune version finale n'ayant été publiée à ce jour¹⁰⁶, ce qui pourrait expliquer les imprécisions mentionnées plus haut.

P2OASys peut être utilisé pour comparer des substances sans pour autant saisir toutes les données relatives aux 11 catégories de danger. Il est possible pour un utilisateur de cibler certaines catégories de danger et de comparer le score des différentes options en fonction de ces seules catégories (p. ex. effets aigus, effets chroniques chez l'humain, dangers aquatiques) selon son intérêt ou selon les données dont il dispose. De plus, P2OASys permet de saisir un score de validité pour chaque critère, mais aussi de pondérer les catégories de danger selon leur importance. L'incertitude liée aux données et l'importance accordée par l'utilisateur à une catégorie de danger par rapport à une autre se reflètent donc sur le score global pondéré. Les mélanges de produits chimiques peuvent être évalués si leur composition est connue. Toutefois, la méthode selon laquelle les mélanges sont évalués est assez protectrice puisque ne sont considérées dans le calcul du score d'un critère donné (p. ex. effets cancérigènes) que les proportions des constituants du mélange qui participent à ce critère. À titre d'exemple, pour un mélange de trois constituants (proportions respectives de 25, 30 et 45 % et scores pour les effets cancérigènes respectifs de 8, 4 et 0), le score du mélange pour les effets cancérigènes sera égal à $(25 \% * 8 + 30 \% * 4) / (25 \% + 30 \%)$ au lieu de $(25 \% * 8 + 30 \% * 4 + 45 \% * 0) / (25 \% + 30 \% + 45 \%)$. Cela donne un score pour le mélange de 5 au lieu de 3.

4.2.5 IRCHS

Le résultat final fourni par IRCHS est un score global entre 0 et 100. L'interprétation peut donc se faire facilement si la différence de score entre les substances est appréciable. La détermination du score d'impact aquatique est complexe puisqu'il équivaut à l'indice du danger total que calcule CHEMS. Pour utiliser IRCHS, il faut donc préalablement rechercher toutes les données toxicologiques et écotoxicologiques relatives à CHEMS (p. ex. DL₅₀, CL₅₀), disposer d'un logiciel QSAR pour estimer les données manquantes et effectuer les calculs. Les scores d'impact sur l'air, le sol et la couche d'ozone sont

¹⁰⁵ Concentration entraînant un danger immédiat pour la vie ou la santé

¹⁰⁶ Communication personnelle avec Jan Hutchins, gestionnaire de la bibliothèque du TURI, 2007-08-29.

déterminés à partir de données propres à la réglementation des États-Unis. Ces données sont toutefois pour la plupart accessibles gratuitement en ligne.

Un des critères permettant d'assigner un score pour la pulvérulence des solides et la capacité des liquides à former un brouillard est présenté de façon incomplète. En effet, Whaley mentionne une notation « poussière » ou « brouillard » qui accompagnerait la TLV de l'ACGIH. Cependant, la consultation des documents de l'ACGIH (1) n'a pas permis de savoir à quoi l'auteur se référait.

Une liste¹⁰⁷ comprenant près de 1000 substances avec leur score IRCHS normalisé est disponible sur le site Web du CMTI. Cette liste peut être consultée pour comparer les scores assignés à différentes substances. On peut notamment y retrouver les scores obtenus pour les CMR suivants : 30,2 pour le phosphate de plomb (CAS n° 7446-27-7), 25,9 pour le dichlorure de cobalt (CAS n° 7646-79-9) et 12,6 pour le trioxyde d'antimoine (CAS n° 1309-64-4).

4.2.6 Quick Scan

Quick Scan a été développé dans le cadre d'une stratégie globale de gestion des produits chimiques mise en place par les Pays-Bas pour se préparer à l'entrée en vigueur de la législation REACH de l'UE. Il ne s'agit pas en tant que tel d'un outil conçu dans le but de faire de la substitution, mais d'un outil de présélection pouvant être utilisé à la première étape de REACH et permettant de choisir les substances qui seraient prioritaires pour une évaluation approfondie. Il permet néanmoins une certaine comparaison des produits chimiques. Les dangers d'incendie et d'explosion ne sont pas évalués, ce qui pose problème au niveau de la sécurité, surtout en milieu de travail. L'approche est protectrice puisqu'en l'absence de données relatives à la dangerosité d'une substance, celle-ci est directement classée au niveau de préoccupation le plus élevé. Quick Scan se base en grande partie sur les phrases de risque pour l'évaluation des dangers, phrases qui disparaîtront à la mise en œuvre du SGH.

4.2.7 CARS et Cradle-to-Cradle Design Protocol

Ces deux outils d'aide à la décision quant à la gestion des produits chimiques sont destinés aux entreprises et combinent des éléments d'impact sur la santé et l'environnement, pondérés dans CARS par des données sur l'utilisation. Ces outils ne sont pas disponibles gratuitement et n'ont pas été consultés dans le cadre du présent travail.

¹⁰⁷ Voir : <https://engineering.purdue.edu/CMTI/IRCHS/hazscore-c.xls>

4.2.8 Green Screen

Le Green Screen est la seule méthode de comparaison des substituts potentiels qui intègre la classification selon le SGH dans ses critères d'évaluation des dangers des produits chimiques. Les dangers relatifs aux produits de dégradation potentiels des substances évaluées sont pris en compte, reflétant ainsi l'une des dimensions d'une analyse du cycle de vie. Toutefois, l'utilisateur doit effectuer une recherche documentaire supplémentaire afin d'identifier ces produits de dégradation ainsi que les dangers qui leur sont associés.

Certains critères qualitatifs utilisés pour l'attribution des niveaux de préoccupation pour les effets sur la santé sont vagues (p. ex. on attribue un niveau élevé pour les effets sur le développement « si le poids de la preuve démontre un potentiel d'effets nocifs pour l'humain »). De plus, l'un des critères utilisés pour classer à un niveau élevé la reprotoxicité d'un produit chimique est sa présence sur la liste des substances considérées pour une possible évaluation par le CERHR¹⁰⁸. Or, il est indiqué sur la page Web du CERHR que la présence d'une substance sur la liste signifie simplement qu'elle est à l'étude, sans impliquer qu'elle soit toxique. L'approche du Green Screen est donc là très protectrice.

De plus, les substituts potentiels sont comparés uniquement sur la base des dangers qu'ils peuvent présenter. Le potentiel d'exposition aux substances n'est pas pris en compte lors de l'évaluation. En effet, les auteurs s'inspirent d'un élément fondamental de la « chimie verte » qui stipule que la façon la plus fiable de réduire le risque est de réduire le danger et non l'exposition (7, 88). Cette position peut toutefois conduire au rejet de substances de remplacement intrinsèquement dangereuses, mais dont le potentiel d'exposition est faible en raison de leur nature (p. ex. faible volatilité ou pulvérulence négligeable) ou de leurs conditions de mise en œuvre (p. ex. circuit fermé). Cette réduction de l'exposition conduit forcément à une réduction du risque sanitaire.

4.2.9 CST

Le CST, tel que présenté par ses auteurs, est une méthodologie dont l'objectif est la comparaison des risques posés par les produits chimiques pour le travailleur, l'environnement et le public. Le CST manque cependant de précision concernant les paramètres à utiliser pour comparer les substances et pour estimer le potentiel d'exposition. Les auteurs ne fixent pas les paramètres qui devraient être utilisés, mais se contentent de donner quelques exemples à titre indicatif. C'est à l'utilisateur de choisir ses critères d'évaluation et de leur accorder une importance selon ses priorités. De plus, la comparaison qui se fait en utilisant des flèches ascendantes ou descendantes permet d'affirmer de façon qualitative que telle substance est plus dangereuse qu'une autre, sans refléter les dangers intrinsèques que pourraient représenter les substances.

¹⁰⁸ Center for the Evaluation of Risks to Human Reproduction. Voir : <http://cerhr.niehs.nih.gov/chemicals/>

4.2.10 Matrice d'évaluation à cinq niveaux

Rappelons d'abord que cet outil ne prend en compte que les risques des substances pour l'environnement. L'évaluation des propriétés toxicologiques est basée sur les FDS et les phrases de risque. La qualité et la fiabilité des données contenues dans la FDS sont donc des paramètres d'importance pour l'évaluation. L'utilisateur peut pondérer les différents facteurs de risque pour souligner celui qui lui semble le plus important dans sa situation. Les données relatives aux résultats des tests de dégradation de l'OCDE (p. ex. tests 301 et 302) ne sont pas des informations que l'on trouve systématiquement dans une FDS; une recherche documentaire supplémentaire de la part de l'utilisateur peut donc être nécessaire. Le risque de contamination des eaux est évalué en utilisant des critères propres à l'Allemagne et qui sont uniquement présents dans les FDS allemandes. Il faut donc disposer de cette information pour évaluer ce risque.

4.2.11 CHEMS

Dans CHEMS les paramètres utilisés pour estimer l'exposition (demi-vies de DBO et d'hydrolyse, FBC) ne reflètent que l'exposition des organismes aquatiques. Whaley et coll. considèrent que l'indice du danger total calculé par CHEMS n'est représentatif que de l'impact du produit chimique sur le milieu aquatique et l'utilisent comme score d'impact aquatique dans IRCHS (125). Les effets sur l'homme et sur la faune terrestre évalués seraient limités à ceux découlant de la consommation d'espèces aquatiques contaminées.

L'utilisation de CHEMS exige l'emploi d'un logiciel QSAR d'estimation des paramètres pour lesquels il n'y a pas de valeur expérimentale. Le logiciel recommandé par les auteurs de CHEMS est le MICROQSAR 2.0. Celui-ci n'est cependant plus disponible. Un certain nombre d'autres logiciels tels qu'EPI Suite (voir Annexe 10) peuvent être téléchargés gratuitement et peuvent prédire certains paramètres nécessaires à l'utilisation de CHEMS.

Les résultats donnés par CHEMS ne peuvent être interprétés en comparant deux substances l'une par rapport à l'autre, mais plutôt en comparant des groupes de substances. L'utilisation de cet outil pour un nombre restreint de substances pourrait donc donner des résultats ne permettant pas un choix clair du meilleur substitut potentiel.

4.2.12 PestScreen

PestScreen est un outil de hiérarchisation dédié aux pesticides. Il calcule un score (PestScore) permettant de les comparer sur la base de la dose d'application, du devenir environnemental, de l'exposition de la population et de la toxicité. L'utilisation de PestScreen nécessite l'obtention d'un nombre raisonnable de paramètres (sept) comparativement à d'autres outils (p. ex. P2OASys, IRCHS) et le calcul du score s'effectue facilement. Certaines données (persistance, LRTP, fraction ingérée) sont

toutefois estimées à l'aide de modèles de dispersion et d'exposition, lesquels doivent être maîtrisés pour pouvoir utiliser PestScreen.

4.2.13 Synthèse

Il ressort de cette discussion que les outils présentés ont une typologie très variée en ce qui concerne les destinataires (entreprises, secteurs spécialisés, groupes industriels, agences gouvernementales, recherche), les dimensions couvertes (santé, sécurité, environnement, exposition), le niveau de détail abordé dans chacune des dimensions ou catégories (pouvant aller jusqu'à 61 indicateurs au total pour P2OASys), les sources d'information utilisées (depuis les FDS et les phrases de risque jusqu'à des modèles QSAR), leur convivialité ou simplicité (disponibilité d'un logiciel ou tableur ou calcul manuel), leur contexte réglementaire et leur capacité à intégrer des éléments de jugement sur la pondération à apporter aux diverses dimensions en jeu (voir aussi tableau IV).

Les douze outils évalués peuvent être regroupés sommairement selon ces diverses caractéristiques, et en fonction de leur utilité pour les entreprises. On peut distinguer dans un premier temps les outils spécialisés quant aux types de substances couvertes, comme PestScreen pour les pesticides et GISBAU/GISCODE pour les produits du domaine de la construction. On note également trois outils spécialisés dans les aspects environnementaux, et donc limités, car n'abordant pas les aspects de santé et sécurité du travail. Il s'agit de CHEMS, de la matrice à cinq niveaux et à nouveau de PestScreen. Le CST est quant à lui très limité par son manque de précision et par l'impossibilité d'attribuer un score aux substances évaluées.

Les approches de gestion graduée telles que la méthodologie d'évaluation simplifiée du risque chimique de l'INRS ou le Stoffenmanager, bien que non destinées spécifiquement à la substitution, permettent d'attribuer relativement simplement des scores à diverses substances dans la situation concrète de petites et moyennes entreprises, et donc de les comparer sommairement dans une perspective de substitution. Le modèle à colonnes quant à lui a été développé spécifiquement dans une perspective de substitution en entreprise dans le contexte réglementaire allemand. Comme les deux outils précédents, il s'appuie en grande partie sur les renseignements présents sur les FDS et les phrases de risque, mais il laisse à l'utilisateur une large marge de manœuvre pour pondérer les catégories prises en compte dans la décision finale, en fonction du contexte particulier de l'entreprise. Avec la mise en place du SGH, les phrases de risque n'apparaîtront plus sur les FDS. Il sera alors nécessaire de disposer d'une correspondance entre ces phrases et le nouveau système SGH. À ce sujet, on peut noter le document publié par la Direction Entreprises et Industrie de la Commission européenne qui fournit cette correspondance (8).

Quick Scan est un autre outil relativement complet et s'appuyant en partie sur les phrases de risque. Sans être destiné à la substitution en entreprise mais plutôt à l'évaluation des substances par les industriels néerlandais dans le cadre de l'implantation de REACH, il permet cependant une évaluation du niveau de préoccupation des substances tenant

compte de leurs utilisations prévues. En ce qui concerne Green Screen, il faut noter son approche très large, incluant le cycle de vie, mais basée sur les propriétés dangereuses inhérentes des substances, sans tenir compte de leur contexte d'utilisation. L'identification de substances « à éviter » ou « à substituer » avec Green Screen peut s'avérer intéressante pour les entreprises dans une perspective de développement d'une approche « verte » de gestion des substances et dans la mesure où le contexte réglementaire peut évoluer dans la même direction dans certaines juridictions.

IRCHS et P2OASys sont tous deux des systèmes relativement complets qui intègrent un grand nombre de paramètres et mènent à un indice chiffré permettant une comparaison facile entre substances dans une perspective de substitution. Les deux outils sont cependant complexes, exigeant la consultation de banques de données et parfois l'utilisation de modèles. On note cependant que P2OASys, spécifiquement développé pour les entreprises, plutôt que pour les gouvernements ou les grands industriels, est plus souple qu'IRCHS, car il est accompagné d'un tableur et il permet à l'utilisateur de pondérer en fonction de l'importance à accorder aux diverses catégories de danger et à la validité des données.

Soulignons pour finir cette synthèse qu'il existe des outils génériques qui méritent l'attention des intervenants impliqués en substitution des substances hors solvants. Par exemple, pour les substances qui sont volatiles sans nécessairement être utilisées comme solvants, il est possible d'utiliser des outils de substitution généralement associés à ces derniers dans un projet de remplacement de substances hors solvants (12). C'est le cas notamment du VHR¹⁰⁹ défini comme le rapport de la concentration de vapeur saturante de la substance à sa valeur limite d'exposition professionnelle. On choisit ainsi le substitut, par ailleurs acceptable techniquement, dont le VHR est le plus faible, afin de réduire au minimum l'exposition du salarié par la voie aérienne. Dans le même ordre d'idée, la pulvérulence, un paramètre utilisé dans la méthodologie d'évaluation simplifiée du risque chimique de l'INRS (§ 3.2.1.1), Stoffenmanager (§ 3.2.1.2) et IRCHS (§ 3.2.5), aurait aussi avantage à être considérée dans tous les projets de substitution où des solides pulvérulents sont mis en œuvre. En effet, en fonction du procédé à l'étude, la pulvérulence peut être en étroite relation avec le degré d'exposition professionnelle à certains solides (81). Encore faudrait-il bien définir ce qu'on entend par ce terme, qui ne se résume pas uniquement à la taille des particules mais également à leur propension à l'empoussièrement des lieux de travail. Il existe enfin peu de données publiées sur la pulvérulence alors que les méthodes de mesure sont encore en développement (70).

¹⁰⁹ Vapour Hazard Ratio

Tableau IV : Grille comparative des outils d'évaluation et de comparaison des substituts potentiels

Outil Destinataires	Effets sur la santé et la sécurité	Effets sur l'environnement	Exposition	Indice ou score / Pondération	Points forts	Limites
Méthodologie d'évaluation simplifiée du risque chimique (INRS) (119) Entreprises	Toxicités aiguë et chronique (phrases R) Incendie et explosion (phrases R) Dangers causés par les procédés (procédé dispersif, ouvert, clos...)	Impacts sur l'eau, l'air et le sol (phrases R)	Température d'ébullition pour les liquides Pulvérisation des solides Gaz	Scores de risque allant de 0 à 1000 Pas de pondération	L'information nécessaire est facilement accessible. Destiné aux entreprises	Assujetti à la qualité des données contenues dans FDS Disparition des phrases de risques R avec le SGH ^a . N'est pas spécifiquement conçue pour faire de la substitution
Stoffenmanager (72) Entreprises	Toxicités aiguë et chronique (phrases R) Incendie et explosion (phrases R)	Toxicité pour la flore, la faune et les organismes terrestres, déplétion de la couche d'ozone (phrases R)	Description de la tâche Existence de moyens de maîtrise et d'équipements de protection individuelle	Niveau de risque faible, moyen ou élevé Pas de pondération	L'information nécessaire est facilement accessible. Outil en ligne Destiné aux PME ^b	Disparition des phrases de risques R avec le SGH. Seuls les dangers du substitut potentiel sont considérés pour mesurer l'impact de la substitution. N'est pas spécifiquement conçue pour faire de la substitution
Modèle à colonnes (95) Entreprises	Toxicités aiguë et chronique (phrases R) Incendie et explosion (phrases R) Dangers causés par les procédés (procédé fermé, ouvert, évacué...)	Toxicité aquatique (classification allemande) Toxicité pour la flore, la faune et les organismes terrestres, déplétion de la couche d'ozone (phrases R)	Pression de vapeur pour les gaz et liquides Pulvérisation des solides Aérosols	Niveau de risque par colonne : faible à très élevé Aucune pondération, l'utilisateur détermine quels dangers sont prioritaires dans sa situation	Facilité d'utilisation Nécessite uniquement les FDS ^c Les mélanges peuvent être évalués si une FDS leur est associée	Assujetti à la qualité des données contenues dans FDS Disparition des phrases de risques R avec le SGH

Outil Destinataires	Effets sur la santé et la sécurité	Effets sur l'environnement	Exposition	Indice ou score / Pondération	Points forts	Limites
GISCODE (40, 66) Entreprises	Toxicités aiguë et chronique Préparations commerciales classées en catégories selon leur dangerosité	Non pris en compte	Incluse implicitement, les GISCODE étant déterminés en fonction de la composition des produits	Codes chiffrés pour les préparations commerciales Aucune pondération	Information ciblée, documentée et complète pour le secteur de la construction Simplicité d'utilisation	Documentation disponible principalement en langue allemande Limité à un secteur d'activité Dangers physiques et environnement non inclus
P2OASys (102) Entreprises	Toxicités aiguë et chronique (p. ex., cancer, effets mutagènes, reprotoxiques) Dangers physiques (p. ex. bruit, chaleur, vibration) Inflammabilité corrosivité, réactivité.	Toxicité et persistance aquatiques Persistance et bioaccumulation Effet de serre, déplétion de la couche d'ozone Utilisation d'énergie et de ressources	Potentiel d'exposition estimé de façon semi-quantitative (faible, moyen, élevé) Pression de vapeur	Score global pondéré chiffré La pondération de chacune des catégories de danger doit être faite par l'utilisateur	Les substances peuvent être comparées pour certaines catégories de danger et pas d'autres. Prise en compte possible de la validité des données saisies et de la pondération des catégories de danger. Les mélanges peuvent être évalués si la proportion des constituants est connue. Fichier Excel, le calcul se fait automatiquement	Nombre élevé de données nécessaires à l'évaluation. Manuel non finalisé et diverses erreurs
IRCHS (22, 23) Agences gouvernementales	Toxicités aiguë et chronique Inflammabilité	Toxicité et persistance aquatiques, présence de la substance à l'étude sur diverses listes	Pression de vapeur, absorptions cutanée et orale, pulvérisation,	Indice global chiffré Aucune pondération	Aspect santé et sécurité du travail considéré à égalité avec l'aspect	Complexité de l'outil Aucune version informatisée n'est disponible pour le public.

Outil Destinataires	Effets sur la santé et la sécurité	Effets sur l'environnement	Exposition	Indice ou score / Pondération	Points forts	Limites
Industriels	réactivité, corrosivité	réglementaires aux États-Unis	brouillard (liquides).		environnement	
Quick Scan (120, 121) Industriels	Toxicités aiguë et chronique (phrases R)	Persistance, bioaccumulation, écotoxicité	Le potentiel d'exposition dépend de l'utilisation de la substance.	Niveau de préoccupation de faible à très élevé Pas de pondération	Outil pouvant être utilisé par les fabricants de produits chimiques pour identifier ceux qui nécessitent une évaluation plus approfondie.	Risques d'incendie et d'explosion non pris en compte. Disparition des phrases de risques R avec le SGH. Substance automatiquement classée au niveau de préoccupation le plus élevé s'il n'y a pas de données.
Green Screen (88) Entreprises Agences gouvernementales	Toxicité aiguë (p. ex. irritation, corrosion, sensibilisation) et chroniques (p. ex. cancer, mutagène, reprotoxique, développement)	Écotoxicité Persistance et bioaccumulation	Non	Points de référence 1, 2, 3 ou 4 (depuis « à éviter » jusqu' « à préférer ») Pas de pondération	Critères de classification selon le SGH sont considérés pour l'attribution des niveaux de préoccupation. Intégration de l'analyse du cycle de vie par l'évaluation des produits de dégradation.	Comparaison des dangers et non des risques, l'exposition n'est pas considérée
Chemical Substitution Tree (52, 53) Entreprises	Toxicités aiguë et chronique	Effets sur les organismes aquatiques et terrestres Déplétion de la couche d'ozone	Le potentiel d'exposition est estimé à partir des données de surveillance disponibles dans le milieu de travail	Pas d'indice Pas de pondération	-	Les critères d'évaluation ne sont pas clairement définis, c'est à l'utilisateur de les choisir La méthode d'évaluation qualitative des substances

Outil Destinataires	Effets sur la santé et la sécurité	Effets sur l'environnement	Exposition	Indice ou score / Pondération	Points forts	Limites
			(lors de la manipulation ou de déversements accidentels).			ne fait pas ressortir les dangers intrinsèques que pourrait présenter une substance
Matrice d'évaluation à 5 niveaux (4) Entreprises	Certains effets chroniques à partir des phrases R.	Persistance, bioaccumulation, toxicité aquatique et chronique chez l'humain et les animaux (phrases R)	Solubilité aqueuse, pression de vapeur, pulvérulence, adhérence à la matrice Exposition environnementale Quantité utilisée Conditions d'utilisation Rejets indirects	Indice de risque de faible à très élevé La pondération peut être faite par l'utilisateur	Adapté aux risques environnementaux des entreprises	Évalue uniquement les risques sur l'environnement Entrée en vigueur du SGH devrait éliminer l'utilisation des phrases de risques R
CHEMS (34) Agences gouvernementales	Toxicités aiguë et chronique (cancer, autres effets)	Effets terrestres et aquatiques	Potentiel d'exposition représenté par la persistance et la bioaccumulation.	Indice chiffré Les indices des substances ne se comparent pas de façon individuelle, la comparaison doit se faire par groupe de substances. On pondère avec la quantité de substance rejetée dans l'environnement.	Outil spécifiquement dédié à l'évaluation des risques environnementaux.	Évalue uniquement les risques à la santé et à l'environnement découlant d'une exposition environnementale Seule l'exposition des organismes aquatiques est prise en compte La connaissance d'un outil d'estimation QSAR est nécessaire. Le calcul du score est complexe et aucune

Outil Destinataires	Effets sur la santé et la sécurité	Effets sur l'environnement	Exposition	Indice ou score / Pondération	Points forts	Limites
						version informatisée de l'outil n'est disponible pour le public.
PestScreen (62) Recherche	Toxicité humaine	Devenir environnemental (persistance globale et potentiel de transport à grande distance) Toxicité pour le milieu terrestre Toxicité pour l'eau douce	Fraction ingérée par la population humaine Exposition environnementale.	PestScore chiffré Pas de pondération	Outil spécifique aux pesticides	Évalue uniquement les risques découlant d'une exposition environnementale Nécessite la connaissance de modèles de dispersion multimédia.

N.B : Les outils CARS et Cradle-to-Cradle Design Protocol ne figurent pas sur ce tableau comparatif parce qu'ils ne sont pas disponibles gratuitement

^a : Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques

^b : Petite et moyenne entreprise

^c : Fiche de données de sécurité

4.3 Banques de cas et documentation spécifique

Quatre banques de cas de substitution ont été présentées. Ces banques répertorient des cas de substitution réussie réalisés généralement dans des PME. Il faut souligner qu'Enviroclub et la banque du CCIPP s'intéressent également aux techniques de prévention de la pollution autres que la substitution, que la présente recherche n'a pas répertoriées systématiquement. Il faut rappeler également que le site Web sur les CMR de l'AFSSET a vocation de rassembler plusieurs banques de cas de substitution pertinentes à ces substances mais qui en pratique débordent le cadre des CMR.

En plus de l'AFSSET, plusieurs organismes ayant publié des documents relatifs à la substitution de substances déterminées sont listés ci-dessus dans la section 3.5. Cependant la recherche systématique de ces documents ne cadrerait pas avec le mandat de ce rapport. La plupart des organismes identifiés ne se limitent pas à la publication de cette documentation dite spécifique, plusieurs ayant développé également soit des démarches générales de substitution (p. ex. LCSP, U.S. EPA) soit des méthodes de comparaison des substituts (p. ex. TURI). Ces organismes, pour la plupart publics, bien que relevant de juridictions différentes, sont une source d'information cruciale pour tout projet de substitution, étant donné que ce domaine, très appliqué, fait l'objet de peu de publications dans la littérature scientifique traditionnelle.

5. Recommandations

L'objectif de cette recherche était de recenser les outils d'aide à la substitution disponibles pour les substances toxiques hors solvants. Les outils étudiés ont été classés en cinq catégories : démarches générales, méthodes d'évaluation et de comparaison, outils auxiliaires, banques de cas de substitution et documentation spécifique.

Il n'y a pas d'outil d'aide à la substitution propre aux substances hors solvants. La plupart des outils peuvent être employés pour l'ensemble des produits chimiques. La majorité des outils est complexe à l'encontre de certains outils destinés exclusivement au domaine des substances volatiles comme le VHR et le MAL-code (12). Cette complexité a d'ailleurs déjà été soulignée par Lanfers et Piringer (68). On remarque également le peu de travaux de validation sur ces outils. Le recours à un expert, notamment en toxicologies humaine et environnementale, est le plus souvent nécessaire. À titre d'exemple, plusieurs outils reposent sur les informations contenues dans les FDS et puisque plusieurs auteurs ont signalé des lacunes dans l'information qu'elles contiennent (2, 32, 46, 67, 80, 122), il est conseillé de valider ces informations auprès du fabricant et d'une autorité compétente. Soulignons aussi qu'il arrive souvent qu'il manque d'information sur les substances « nouvelles » ou même parfois sur des propriétés de substances « traditionnelles ». Une décision éclairée sur la substitution repose alors encore plus sur l'avis d'un expert. Il faut bien réaliser que les outils ne procèdent pas au choix final d'une solution de remplacement. Ils ne sont utiles que pour encadrer rationnellement le choix dans la mesure où l'on comprend bien leurs objectifs et limites. Le choix ultime se fera toujours avec une bonne dose de jugement professionnel, notamment pour pondérer les catégories de danger en fonction de la situation concrète d'une entreprise.

Les contraintes de temps et d'argent vont moduler le choix de l'outil approprié dans une situation donnée. Il est ainsi évident que le CTSA n'est pas à la portée des PME. Ces dernières auront avantage à l'utilisation d'outils simples comme le modèle à colonnes, mais également à avoir recours aux banques de cas. L'expérience des auteurs en ce qui concerne la substitution des solvants milite également en faveur du recours au réseautage par Internet (14). En effet, il arrive qu'une solution de remplacement puisse être suggérée simplement par la participation à un groupe de discussion spécialisé dans une branche industrielle (13).

Tous les outils présentés dans ce rapport peuvent être utiles lors d'un projet de substitution en fonction du contexte particulier. Il ne faut cependant pas faire abstraction des contextes réglementaires qui encadrent la substitution p. ex. l'obligation en France de substituer les CMR 1 et 2. Il y a néanmoins un réel besoin de développer de nouveaux outils de comparaison des substances toxiques hors solvants, ciblant des substances ou familles de substances particulières de par leur nature physique (p. ex. solides, huiles) ou leur fonction. Les agences gouvernementales responsables de la prévention et les organisations sectorielles devraient être partie prenante d'une telle entreprise.

6. Bibliographie

- [1] ACGIH (1995) **1995-1996 Threshold Limit Values (TLVs) for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices (BEIs)**. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, OH.
- [2] Agam, G. (2004) are MSDS Safe? Reflections at the MSDS's 20th Birthday. **Organic Process Research & Development** 8(6):1042-1044.
- [3] Ahrens, A.; Böhm, E.; Heitmann, K.; Hillenbrand, T. (2003) **Guidance for the use of environmentally sound substances - For producers and professional users of chemicals products relevant to the aquatic environment - Part One: Five steps for the evaluation of environmental risks**. Ökopol - Institute for Environmental Strategies, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, Hamburg.
- [4] Ahrens, A.; Böhm, E.; Heitmann, K.; Hillenbrand, T. (2003) **Guidance for the use of environmentally sound substances - Part 2: Guidance for taking inventory and comparative assessment of substances**. Ökopol - Institute for environmental strategies, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, Hamburg.
- [5] Ahrens, A.; Braun, A.; Gleich, A.V.; Heitmann, K.; Lißner, L. (2006) **Hazardous Chemicals in Products and Processes - Substitution as an Innovative Process**. Physica-Verlag, Heidelberg.
- [6] AIHA (2008) **Emergency Response Planning Guidelines (ERPG) and Workplace Environmental Exposure Level (WEEL) Handbook**. American Industrial Hygiene Association Fairfax, VA.
- [7] Anastas, P.T.; Warner, J.C. (1998) *What is green chemistry?* In: **Green Chemistry: Theory and Practice**, Oxford University Press, New York.
- [8] Anonymous (2007) **Draft Comparison between EU and GHS Criteria Human Health and Environment**. European Commission, Directorate General Enterprise & Industry, Brussels,
http://ec.europa.eu/enterprise/reach/docs/ghs/ghs_comparison_classifications_dec07.pdf,
page Web consultée le 8 octobre 2008.
- [9] Armenti, K.; Moure-Eraso, R. (2000) **Integration of Pollution Prevention and Occupational Health and Safety - Technical Report No. 50**. The Toxics Use Reduction Institute, Lowell, MA.
- [10] ASTM (2003) **ASTM D6355-98 Standard Test Method for Human Repeat Insult Patch testing of Medical Gloves**. American Standard for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [11] Beck, H.; Glienke, N.; Möhlmann, C. (2001) **GESTIS-DUST-EX Database - Combustion and explosion characteristics of dusts**. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin.
- [12] Bégin, D.; Debia, M.; Gérin, M. (2008) **Recension des outils de comparaison des solvants**. Études et recherches, rapport R-567. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, Montréal,
<http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSST/R-567.pdf>
- [13] Bégin, D.; Gérin, M. (2001) **Substitution des solvants - Étude de cas d'implantation**. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (R-269), Montréal.

- [14] Bégin, G. (2004) *Information et réseautage*. In: **Manuel d'hygiène du travail - Du diagnostic à la maîtrise des facteurs de risque**, pp. 719-730. B. Roberge, et coll., Eds. Modulo-Griffon, Mont-Royal (Québec).
- [15] Bonnard, R. (2001) **Les modèles multimédia pour l'évaluation des expositions liées aux émissions atmosphériques des installations classées**. Institut national de l'environnement industriel et des risques, Verneuil-en-Halatte.
- [16] Bonthoux, F.; Vincent, R. (2003) **Logiciel d'aide à l'évaluation du risque chimique**. In: 8th International Symposium of the ISSA Research Section "Tools for the application of European Directives on health at the workplace: The example of chemical risk". Athènes, 19-21 mai 2003, pp. 1-8. Association internationale de la sécurité sociale, Genève
http://www.elinyae.gr/en/lib_file_upload/FINAL%20TEXT%2051.1153130458391.pdf
- [17] Callahan, M.S.; Green, B. (1995) *How do I change?* In: **Hazardous Solvent Source Reduction**, pp. 43-66. McGraw-Hill, New York.
- [18] Carrier, G.; Bard, D. (2003) *Analyse du risque toxicologique*. In: **Environnement et Santé Publique - Fondements et pratiques**, pp. 203-226. M. Gérin, et coll., Eds. Edisem / Editions TEC & DOC, Sainte-Hyacinthe / Paris.
- [19] CCOHS (1992) **SOLUTIONS**. In: OSH Publications CD-ROM. Canadian Centre for Occupational Health and Safety, Hamilton, ON.
- [20] Cherrie, J.W.; Schneider, T. (1999) Validation of a new method for structured subjective assessment of past concentrations. **Annals of occupational hygiene** **43**(4):235-245.
- [21] Cherrie, J.W.; Schneider, T.; Spankie, S.; Quinn, M. (1996) A new method for structured, subjective assessment of past concentrations. **Occupational Hygiene** **3**:75-83.
- [22] CMTI (1997) **Environmental Hazard Value**. Clean Manufacturing Technology Institute, Purdue University, West Lafayette, IN,
<https://engineering.purdue.edu/CMTI/IRCHS/ENVHV.doc>, page Web consultée le 22 janvier 2008.
- [23] CMTI (1997) **Worker Exposure Hazard Value**. Clean Manufacturing Technology Institute, Purdue University, West Lafayette, IN,
<https://engineering.purdue.edu/CMTI/IRCHS/WORKHV.doc>, page Web consultée le 22 janvier 2008.
- [24] Commission des communautés européennes (21 août 2001) Directive 2001/59/CE de la commission du 6 août 2001 portant vingt-huitième adaptation au progrès technique de la directive 67/548/CEE du Conseil concernant le rapprochement des dispositions législatives, réglementaires et administratives relatives à la classification, l'emballage et l'étiquetage des substances dangereuses. **Journal officiel des Communautés européennes L225**:1-333.
- [25] Commission européenne (2006) **Instructions pratiques à caractère non contraignant concernant la protection de la santé et la sécurité des travailleurs face aux risques liés aux agents chimiques sur le lieu de travail**. Direction générale de l'emploi, des affaires sociales et de l'égalité des chances, Commission européenne. Office des publications officielles des Communautés européennes, Luxembourg,
http://ec.europa.eu/employment_social/health_safety/publications/ke6805058_fr.pdf
- [26] Committee on Hazardous Substances (AGS) (2002) **Technical Rule for Hazardous Substances No. 440 - Determination and assessment of chemical risks at workplaces:**

- determination of dangerous substances and methods for the assessment of substitutes (en Allemand)**. Federal Ministry of Labour and Social Affairs, Berlin.
- [27] Concurrent Technologies Corporation (2000) **Engineering and Technical Services for Joint Group on Pollution Prevention (JG-PP) Projects - Joint Test Report BD-R-1-1 for Validation of Alternatives to Electrodeposited Cadmium for Corrosion Protection and Threaded Part Lubricity Applications**. National Defense Center for Environmental Excellence (NDCEE), Johnstown, PA, <http://www.jgpp.com/projects/cadmium/bisdsjtr/bisdsjtr.pdf>, page web consultée le 22 avril 2008.
- [28] Conseil de l'Union européenne (5 mai 1998) Directive 98/24/CE du Conseil du 7 avril 1998 concernant la protection de la santé et de la sécurité des travailleurs contre les risques liés à des agents chimiques sur le lieu de travail. **Journal officiel des Communautés européennes L131**:11-23.
- [29] Corden, C.; Postle, M. (2002) **Risk Reduction Strategy and Analysis of Advantages and Drawbacks for Octabromodiphenyl Ether**. Department for Environment, Food and Rural Affairs, London, http://www.defra.gov.uk/environment/chemicals/pdf/octa_bdpe_rrs.pdf, page Web consultée le 13 juillet 2007.
- [30] CRAM Alsace-Moselle (2008) **Classeur d'aide à l'évaluation du risque chimique en entreprise - CLARICE**. Caisse régionale d'assurance maladie Alsace-Moselle, Strasbourg, <http://www.cram-alsace-moselle.fr/Prevent/doc/pdfreco/CLARICE25.xls>, <http://www.cram-alsace-moselle.fr/Prevent/doc/pdfreco/CLARICE100.xls>, page Web consultée le 28 octobre 2008.
- [31] Cramer, G.M.; Ford, R.A.; Hall, R.L. (1978) Estimation of toxic hazard - A decision tree approach. **Food and Cosmetics Toxicology** 16(3):255-276.
- [32] CSB (2008) **Barton Solvents - Static Spark Ignites Explosion Inside Flammable Liquid Storage Tank - Case Study No. 2007-06-I-KS**. United States Chemical Safety and Hazard Investigation Board, Washington, DC, http://www.csb.gov/completed_investigations/docs/CSB_Study_Barton_Final.pdf
- [33] Davis, G.A.; Kincaid, L.; Menke, D.; Griffith, B.; Jones, S.; Brown, K.; Goergen, M. (1994) **The Product Side of Pollution Prevention : Evaluating The Potential For Safe Substitutes**. United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development; Risk Reduction Engineering Laboratory (EPA/600/R-94/178), Cincinnati, OH.
- [34] Davis, G.A.; Kincaid, L.; Swanson, M.B.; Schultz, T.; Bartmess, J.; Griffith, B.; Jones, S. (1994) **Chemical Hazard Evaluation for Management Strategies: A method for Ranking and Scoring Chemicals by Potential Human Health and Environmental Impacts**. Risk Reduction Engineering Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency (EPA/600/R-94/177), Cincinnati, OH.
- [35] Defence Procurement Agency (2005) **Guidance to the Use of Cadmium Alternatives in the Protective Coating of Defence Equipment**. Ministry of Defence, Directorate of Standardization, Glasgow, <http://www.dstan.mod.uk/data/03/036/00000100.pdf>, page Web consultée le 22 avril 2008.
- [36] DWES (1993) **Executive Order No. 302 of 13 May 1993 on Work with Code-numbered Products**. Danish Working Environment Service, Copenhagen.

- [37] ECETOC (2006) **Guidance for Setting Occupational Exposure Limits: Emphasis on Data-Poor Substances - Technical Report No. 101**. European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals, Brussels.
- [38] ECETOC (2003) **(Q)SARs: Evaluation of the commercially available software for human health and environmental endpoints with respect to chemical management applications - Technical Report No. 89**. European Centre for Ecotoxicology and Toxicology of Chemicals Brussels, <http://staging.idweaver.com/ECETOC/Documents/TR%20089.pdf>, page consultée le 20 août 2008.
- [39] Edwards, S.; Rossi, M.; Civie, P. (2005) **Alternatives Assessment for Toxics Use Reduction: A Survey of Methods and Tools**. Toxics Use Reduction Institute, University of Massachusetts, Lowell, MA.
- [40] European Agency for Safety and Health at Work (2004) **Construction case studies - Dealing with dangerous substances**. Bilbao, http://osha.europa.eu/good_practice/sector/construction/construction_case_studies_2.pdf, page Web consultée le 1^{er} août 2007.
- [41] Federal Institute for Occupational Safety and Health (2007) **Committee on Hazardous Substances (AGS)**. Dortmund, http://www.baua.de/nm_37642/en/Topics-from-A-to-Z/Hazardous-Substances/Committee-on-Hazardous-Substances.pdf, page Web consultée le 10 juillet 2007.
- [42] Fenn, T. (2000) **Risk Reduction Strategy and Analysis of Advantages and Drawbacks for Acrylamide**. Department of Environment, Transport and Regions, London, http://www.defra.gov.uk/environment/chemicals/pdf/acrylamide_rrs.pdf, page Web consultée le 13 juillet 2007.
- [43] Filskov, P.; Goldschmidt G.; Hansen, M.K.; Höglund, L.; Johansen, T.; Pedersen, C.L.; Wibroe, L. (1996) **Substitutes for Hazardous Chemicals in the Workplace**. CRC Lewis Publisher, Boca Raton, FL.
- [44] Filskov, P.; Goldschmidt G.; Hansen, M.K.; Höglund, L.; Johansen, T.; Pedersen, C.L.; Wibroe, L. (1989) **Substitution in practice: Company Health Service experiences (Substitution i praksis - erfaringer fra BST) - HSE Translation No. 143501 (May 1992)**. Working Environment Fund (Arbejdsmiljøfondet), Copenhagen.
- [45] Footitt, A.; Virani, S.; Corden, C.; Graham, S. (1999) **Nonylphenol Risk Reduction Strategy**. Department of the Environment, Transport and Regions, London, http://www.defra.gov.uk/environment/chemicals/pdf/nonylphenol_rrs.pdf, page Web consultée le 13 juillet 2007.
- [46] Frazier, L.M.; Beasley, B.W.; Sharma, G.K.; Mohyuddin, A.A. (2001) Health information in material safety data sheets for a chemical which causes asthma. **Journal of General Internal Medicine** 16(2):89-93.
- [47] Galligan, C.; Morose, G. (2004) **An investigation of alternatives to miniature batteries containing mercury**. Lowell Center for Sustainable Production, University of Massachusetts, Lowell, MA <http://sustainableproduction.org/downloads/MaineDEPButtonBatteryReportFinal12-17-04.pdf>, page Web consultée le 30 juillet 2007.
- [48] Galligan, C.; Morose, G.; Giordani, J. (2003) **An Investigation of Alternatives to Mercury Containing Products - Prepared for the Maine Department of Environmental Protection**. Lowell Center for Sustainable Production, University of

Massachusetts, Lowell, MA <http://www.maine.gov/dep/mercury/lcspfinal.pdf>, page Web consultée le 30 juillet 2007.

- [49] Gérin, M.; Bégin, D. (2002) *Substitution: démarches et outils*. In: **Solvants industriels - Santé, sécurité, substitution**, M. Gérin, Ed. Masson, Paris.
- [50] Government of the United States (2008) **Electronic Code of Federal Regulations, Title 40: Protection of the Environment, Part 63 - National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants for Source Categories, Subpart D - Regulations Governing Compliance Extensions for Early Reductions of Hazardous Air Pollutants**. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, <http://ecfr.gpoaccess.gov/>, page Web consultée le 31 janvier 2008.
- [51] Government of the United States (2008) **Electronic Code of Federal Regulations, Title 40: Protection of the Environment, Part 261 - Identification and Listing of Hazardous Waste, Subpart D - Lists of Hazardous Wastes, § 261.31 Hazardous wastes from non-specific sources ("F"), § 261.32 Hazardous wastes from specific sources ("K"), § 261.33 Discarded commercial chemical products, off-specification species, container residues, and spill residues thereof ("P", "U")**. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, <http://ecfr.gpoaccess.gov/>, page Web consultée le 31 janvier 2008.
- [52] Gray, G.M.; Kassalow Hartwell, J. (1995) The Chemical Substitution Tree. **Pollution Prevention Review** 5:7-17.
- [53] Gray, G.M.; Kassalow Hartwell, J. (1994) **The role of risk in chemical substitution decisions**. Toxics Use Reduction Institute, University of Massachusetts, Lowell, MA.
- [54] Groupe du comité scientifique sur les limites d'exposition (1999) **Méthodologie de fixation des valeurs limites d'exposition professionnelle : document de référence**. Office des publications officielles des Communautés européennes (EUR 19253 FR), Luxembourg.
- [55] Hall, B. (1990) The SHARE program. **Journal of Occupational Health and Safety: Australia and New Zealand** 6(1):35-38.
- [56] HSE (1994) **7 Steps to successful substitution of hazardous substances**. Health and Safety Executive, HSE Books (HSG110), Sudbury, UK.
- [57] HSE (1999) **COSHH Essentials - Easy steps to control chemicals**. Health and Safety Executive, Sudbury, UK.
- [58] Huijbregts, M.A.J.; Struijs, J.; Goedkoop, M.; Heijungs, R.; Jan Hendriks, A.; Van De Meent, D. (2005) Human population intake fractions and environmental fate factors of toxic pollutants in life cycle impact assessment. **Chemosphere** 61(10):1495-1504.
- [59] Huré, P.; Kauffer, E.; Roos, F.; Dornier, G. (2003) **Le Point des Connaissances sur....Substitution de l'amiante (ED5006)**. Institut national de recherche et de sécurité Paris.
- [60] INRS (2007) **La substitution des agents chimiques dangereux (ED 6004)**. Institut national de recherche et de sécurité, Paris.
- [61] Jarvis, J.; Seed, M.J.; Elton, R.A.; Sawyer, L.; Agius, R.M. (2005) Relationship between chemical structure and the occupational asthma hazard of low molecular weight organic compounds. **Occupational and Environmental Medicine** 62(4):243-250.
- [62] Juraske, R.; Antón, A.; Castells, F.; Huijbregts, M.A.J. (2007) PestScreen: A screening approach for scoring and ranking pesticides by their environmental and toxicological concern. **Environment International** 33(7):886-893.

- [63] Juraske, R.; Castells, F.; Antón, A.; Huijbregts, M.A.J. (2007) **PestScreen: Screening, scoring and ranking of pesticides by life-cycle impact assessment approach**. In: 3rd International Conference on Life Cycle Management, 27-29 August 2007, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich.
- [64] Kincaid, L.E.; Geibig, J.R. (1998) **Printed Wiring Board Cleaner Technologies Substitute Assessment: Making Holes Conductive - Volume I**. United States Environmental Protection Agency; Prevention, Pesticides and Toxic Substances (EPA 744-R-98-004a), Washington, DC.
- [65] Kincaid, L.E.; Meline, J.D.; Davis, G.A. (1996) **Cleaner Technologies Substitute Assessment - A Methodology & Resource Guide**. United States Environmental Protection Agency, Office of Pollution Prevention and Toxics (EPA744-R-95-002), Washington, DC.
- [66] Kluger, N. (2004) **Instruments of implementation: GISBAU - A practical approach to risk communication**. In: Sustainable Chemicals - Integrated Management of Chemicals, Products and Processes. Federal Environment Agency (UBA) in cooperation with OECD and Federal Institute of Occupational Health (BAuA), Dessau, Germany.
- [67] Kolp, P.W.; Williams, P.L.; Burtan, R.C. (1995) Assessment of the Accuracy of Material Safety Data Sheets. **American Industrial Hygiene Association Journal** 56(2):178-183.
- [68] Lanter, W.; Piringer, R. (2003) **Contrôle des risques - Exposition et contrôle - Recherche sur les modèles de substitution** In: Compte-rendu du séminaire "Substances dangereuses sur le lieu de travail - Minimiser les risques" Paris, 15 octobre 2002, pp 4-5. Agence européenne pour la sécurité et la santé au travail, Bilbao
<http://osha.europa.eu/fr/publications/forum/10>
- [69] Lassen, C.; Løkke, S.; Andersen, L.I. (1999) **Brominated Flame Retardants: Substance Flow Analysis and Assessment of Alternatives**. Environmental Project 494, Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen,
http://www2.mst.dk/Udgiv/publications/1999/87-7909-416-3/word/helepubl_eng.doc , page Web consultée le 22 avril 2008.
- [70] Lidén, G. (2006) Dustiness Testing of Materials Handled at Workplaces. **Annals of occupational hygiene** 50(5):437-439.
- [71] Lohse, J.; Wirts, M.; Ahrens, A.; Heitmann, K.; Lundie, S.; Lißner, L.; Wagner, A. (2003) **Substitution of Hazardous Chemicals in Products and Processes**. Directorate General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection of the Commission of the European Communities, Hamburg.
- [72] Marquart, H.; Heussen, H.; Maaïke, L.F.; Noy, D.; Tielemans, E.; Schinkel, J.; West, J.; Van Der Schaaf, D. (2008) Stoffenmanager, a Web-Based Control Banding Tool Using an Exposure Process Model. **Annals of occupational hygiene** 52(6):429-441.
- [73] Morose, G. (2006) **An overview of alternatives to tetrabromobisphenol A (TBBPA) and Hexabromocyclododecane**. Lowell Center for Sustainable Production, Lowell, MA
<http://www.sustainableproduction.org/downloads/AlternativestoTBBPAandHBCD.pdf>, page Web consultée le 22 avril 2008.
- [74] Morris, M.; Wolf, K. (2000) **Alternative Adhesive Technologies in the Foam Furniture and Bedding Industries: A Cleaner Technologies Substitute Assessment**.

- Volume 1: Cost and Performance Assessment.** Prepared for the U.S. Environmental Protection Agency, Office of Pollution Prevention Technology, Design for the Environment Program. Institute for Research and Technical Assistance, Glendale, CA.
- [75] Naval Facilities Engineering Services Center (1999) **Joint Service Pollution Prevention Opportunity Handbook.** United States Department of Defense, Port Hueneme, CA, http://205.153.241.230/P2_Opportunity_Handbook/introduction.html, page web consultée le 17 janvier 2008.
- [76] NFPA (2007) **NFPA 704 - Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response.** National Fire Protection Association, Quincy, MA.
- [77] NOAA (2008) **Chemical Reactivity Worksheet Version 1.9.2.** Office of Response and Restoration, National Ocean Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, Seattle, WA.
- [78] Oppl, R.; Kalberlah, F.; Evans, P.G.; Van Hemmen, J.J. (2003) A Toolkit for Dermal Risk Assessment and Management: An Overview. **Annals of occupational hygiene** 47(8):629-640.
- [79] Parlement européen et Conseil de l'Union européenne (30 décembre 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). **Journal officiel de l'Union européenne L396**:1-849.
- [80] Paul, M.; Kurt, S. (1994) Analysis of Reproductive Health Hazard Information on Material Safety Data Sheets for Lead and Ethylene Glycol Ethers. **American Journal of Industrial Medicine** 25(3):403-415.
- [81] Perkins, J.L. (2008) **Modern Industrial Hygiene, Volume 1: Recognition and Evaluation of Chemical Agents.** American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, OH.
- [82] Pilemand, C.; Wallström, E.; Hoffmann, L.; Poulsen, P.B. (2003) **Substitution of Cobalt Driers and Methyl Ethyl Ketoxime.** Danish Environmental Protection Agency, Danish Ministry of the Environment, Copenhagen, <http://www2.mst.dk/udgiv/publications/2004/87-7614-097-0/pdf/87-7614-098-9.pdf>, page Web consultée le 22 avril 2008.
- [83] Posner, S. (2006) **Survey and technical assessment of alternatives to TBBPA and HBCDD.** Swedish Chemicals Inspectorate (KEMI), Sundbyberg, http://www.kemi.se/upload/Trycksaker/Pdf/PM/PM1_06.pdf, page Web consultée le 02 août 2007.
- [84] Pure Strategies Inc. (2005) **Decabromodiphenylether: An Investigation of Non-Halogen Substitutes in Electronic Enclosure and Textile Applications.** The Lowell Center for Sustainable Production, Lowell, MA <http://www.sustainableproduction.org/downloads/DecaBDESubstitutesFinal4-15-05.pdf>, page Web consultée le 03 août 2007.
- [85] République française (12 mars 2008) Code du travail, Partie réglementaire, Annexe au décret no 2008-244 du 7 mars 2008. Journal officiel de la République Française, Annexe au no 61: 37003-37461.

- [86] Rideout, K.; Teschke, K.; Dimich-Ward, H.; Kennedy, S.M. (2005) Considering risks to healthcare workers from glutaraldehyde alternatives in high-level disinfection. **Journal of Hospital Infection** **59**(1):4-11.
- [87] Roelofs, C. (2007) **Preventing Hazards at the Source**. American Industrial Hygiene Association, Fairfax, VA.
- [88] Rossi, M.; Heine, L. (2007) **The Green Screen for Safer Chemicals: Evaluating Flame Retardants for TV Enclosures Version 1.0**. Clean Production Action, Spring Brook, NY.
- [89] Rossi, M.; Tickner, J.; Geiser, K. (2006) **Alternatives Assessment Framework** Lowell Center for Sustainable Production, University of Massachusetts, Lowell, MA.
- [90] Rühl, R.; Lechtenberg-Auffarth, E.; Hamm, G. (2002) The Development of Process-specific Risk Assessment and Control in Germany. **Annals of occupational hygiene** **46**(1):119-125.
- [91] Rühl, R.; Smola, T.; Lechtenberg-Auffarth, E.; Hamm, G.; Vater, U. (2002) **Gefahrstoffe ermitteln und ersetzen - BIA Report 2/2002**. Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften (HVBG), Sankt Augustin.
- [92] Siewert, T.; Liu, S.; Smith, D.R.; Madeni, J.C. (2002) **Database for Solders Properties with Emphasis on New Lead-free Solders, Release 4.0**. National Institute of Standards and Technology and Colorado School of Mines, Bolder, CO, http://www.boulder.nist.gov/div853/lead_free/solders.html, page Web consultée le 22 août 2008.
- [93] Silverstein, B.D. (2006) *Control Banding / COSHH Essentials*. In: **A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures - Third Edition**, W.H. Bullock, et coll., Eds. American Industrial Hygiene Association, Fairfax, VA.
- [94] Simpson, C. (2002) Solvents by the Numbers. **CleanTech** **2**(1):16-22.
- [95] Smola, T. (2006) **The Column Model, An aid to substitute assessment**. BG-Institute for Occupational Safety and Health, Sankt Augustin, www.hvbg.de/bgia, page Web consultée le 24 mai 2007.
- [96] Stuer-Lauridesen, F.; Mikkelsen, S.; Havelund, S.; Birkved, M.; Hansen, L.P. (2001) **Environmental and Health Assessment of Alternatives to Phthalates and to flexible PVC**. Environmental Project N° 590, Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen, <http://www2.mst.dk/udgiv/Publications/2001/87-7944-407-5/pdf/87-7944-408-3.pdf>, page Web consultée le 12 juin 2007.
- [97] Swanson, M.B.; Davis, G.A.; Kincaid, L.; Schultz, W.; Bartmess, J.E.; Jones, S.; Georges, E.L. (1997) A screening method for ranking and scoring chemicals by potential human health and environmental impacts. **Environmental Toxicology and Chemistry** **16**(2):372-383.
- [98] Swanson, M.B.; Geibig, J.R.; Kelly, K.E. (2002) **Alternative Adhesives Technologies: Foam Furniture and Bedding Industries. Draft. Volume 2: Risk Screening and Comparison. A Cleaner Technologies Substitutes Assessment**. Prepared for EPA's Design for the Environment Branch, Economics, Exposure & Technology Division, Office of Pollution Prevention and Toxics under grant # X825373 by the University of Tennessee Center for Clean Products and Technologies, Knoxville, TN.
- [99] Swuste, P.; Hale, A.; Pantry, S. (2003) Solbase: A Databank of Solutions for Occupational Hazards and Risks. **Annals of occupational hygiene** **47**(7):541-547.

- [100] Syracuse Research Corporation (2003) **PBT Profiler, Version 1.203**. Office of Pollution Prevention and Toxics, United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, <http://www.pbtprofiler.net/default.asp>, page Web consultée le 17 janvier 2008.
- [101] Thorpe, B.; Rossi, M. (2007) Require safer substitutes and solutions: making the substitution principle the cornerstone of sustainable chemical policies. **New Solutions** **17**(3):177-192.
- [102] Tickner, J. (1997) **Pollution Prevention Options Analysis System - P2OASys Users Guide**. Toxics Use Reduction Institute, University of Massachusetts, Lowell, MA.
- [103] Tickner, J. (1999) **The use of Di-2ethylhexyl-Phthalate in PVC medical devices: Exposure, Toxicity and Alternatives**. Lowell Center for Sustainable Production, Lowell, MA
<http://www.sustainableproduction.org/downloads/DEHP%20Full%20Text.pdf>, page Web consultée le 3 août 2007.
- [104] Toffel, M.W.; Marshall, J.D. (2004) Improving Environmental Assessment - A Comparative Analysis of Weighting Methods Used to Evaluate Chemical Release Inventories. **Journal of Industrial Ecology** **8**(1-2):143-172.
- [105] TURI (2006) **Five chemicals alternatives assessment study**. Toxics Use Reduction Institute, University of Massachusetts, Lowell, MA.
- [106] UNEP (1999) **POPs Database on Alternatives**. United Nations Environment Programme, Geneva.
- [107] USEPA (1998) **Cleaner Technologies Substitutes Assessment for Professional Fabricare Processes**. United States Environmental Protection Agency, Office of Pollution Prevention and Toxics, Economics, Exposure and Technology Division (EPA 744-B-98-001), Washington, DC.
- [108] USEPA (1997) **Cleaner Technologies Substitutes Assessment: Lithographic Blanket Washes**. United States Environmental Protection Agency, Design for the Environment Program, Washington, DC.
- [109] USEPA (1994) **Cleaner Technologies Substitutes Assessment: Screen Printing Screen Reclamation (Draft)**. United States Environmental Protection Agency, Office of Pollution Prevention and Toxics, Design for the Environment Program (EPA 744R-94-005), Washington, DC.
- [110] USEPA (2007) **Estimation Program Interface EPI Suite™ Version 3.20**. Washington, DC, United States Environmental Protection Agency, Office of Pollution Prevention and Toxics, <http://www.epa.gov/oppt/exposure/pubs/episuite.htm>, page web consultée le 14 janvier 2008.
- [111] USEPA (2002) **Flexographic Ink Options: A Cleaner Technologies Substitutes Assessment, Volume 1**. Design for the Environment Program, Economics, Exposure and Technology Division, Office of Pollution Prevention and Toxics, United States Environmental Protection Agency (EPA 744-R-02-001A), Washington, DC.
- [112] USEPA (2002) **Flexographic Ink Options: A Cleaner Technologies Substitutes Assessment, Volume 2**. Design for the Environment Program, Economics, Exposure and Technology Division, Office of Pollution Prevention and Toxics (7404), United States Environmental Protection Agency (EPA 744-R-02-001B), Washington, DC.
- [113] USEPA (1994) **Guide to Cleaner Technologies Alternative Metal Finishes**. United States Environmental Protection Agency (EPA/625/R-94-007), Cincinnati, OH.

- [114] USEPA (2005) **Oncologic™ - An Expert System for the Evaluation of the Carcinogenic Potential of Chemicals - Version 6.0**. United States Environmental Protection Agency, Office of Pollution Prevention and Toxics, Washington, DC.
- [115] USEPA (1998) **Printed Wiring Board Cleaner Technologies Substitute Assessment: Making Holes Conductive - Volume 2: Appendices**. United States Environmental Protection Agency, Prevention, Pesticides and Toxic Substances (EPA 744-R-98-004b), Washington, DC.
- [116] van Berkel, R.; Willems, E.; Lafleur, M. (1997) The Relationship between Cleaner Production and Industrial Ecology. **Journal of Industrial Ecology** 1(1):51-66.
- [117] Vanlaer, H. (2007) **La substitution dans REACH**. In: Substitution: un enjeu pour les CMR. Paris, 26 mars 2007, Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort.
- [118] Vincent, R. (2000) Évaluation du risque chimique - Hiérarchisation des "risques potentiels". **Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail** 178:29-34.
- [119] Vincent, R.; Bonthoux, F.; Mallet, G.; Iparraguirre, J.F.; Rio, S. (2005) Méthodologie d'évaluation simplifiée du risque chimique: un outil d'aide à la décision. **Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail** 200:39-61.
- [120] VROM Netherlands (2002) **Implementation Strategy on Management of Substances - 2nd Progress Report**. The Netherlands Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, The Hague.
- [121] VROM Netherlands (2001) **Implementation Strategy on Management of Substances - Progress report**. The Netherlands Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, The Hague.
- [122] Welsh, M.S.; Lamesse, M.; Karpinski, E. (2000) The Verification of Hazardous Ingredients Disclosures in Selected Material Safety Data Sheets. **Applied Occupational and Environmental Hygiene** 15(5):409-420.
- [123] Wexler, P. (2001) TOXNET: An evolving web resource for toxicology and environmental health information. **Toxicology** 157(1-2):3-10.
- [124] Whaley, D.A.; Barrett, S.S. (2000) Field trials - Measuring progress in pollution prevention using a chemical hazard score. **Drug and Chemical Toxicology** 23(4):645-670.
- [125] Whaley, D.A.; Keyes, D.; Khorrami, B. (2001) Incorporation of endocrine disruption into chemical hazard scoring for pollution prevention and current list of endocrine disrupting chemicals. **Drug and Chemical Toxicology** 24(4):359-420.

Annexe 1 : CTSA

Module « Propriétés chimiques » (65)

Le module « Propriétés chimiques » a pour but d'identifier les caractéristiques physiques et chimiques des substances dans le groupe d'utilisation pour faciliter l'identification des substituts potentiels ayant des propriétés similaires. Les paramètres à connaître incluent les suivants : le numéro CAS¹¹⁰, le poids moléculaire, la structure chimique, l'état physique, les données sur le point d'ébullition, la corrosivité, la réactivité, l'explosivité, la pression de vapeur ou encore la solubilité aqueuse. Des exemples de sources d'information sont donnés notamment le Hazardous Substances Data Bank, la base de données RTECS (Registry of Toxic Effects of Chemical Substances) ou la base de données IRIS (Integrated Risk Information System) du U.S. EPA. Dans le cas où certaines de ces propriétés ne sont pas obtenues à partir des sources précédentes, les auteurs suggèrent l'utilisation de modèles d'estimation mathématiques tels que MicroQSAR version 2.0.

Module « Aperçu du devenir environnemental » (65)

Le devenir des substances dans l'environnement est étudié à partir des paramètres de persistance dans l'air, l'eau et le sol, de réactivité, de biodégradation, de migration dans les eaux souterraines et de bioaccumulation dans les organismes aquatiques et terrestres. Les données à obtenir comprennent entre autres la demande biologique en oxygène, le facteur de bioconcentration, la demi-vie, le coefficient de partage octanol-eau, la demi-vie d'hydrolyse ou encore la constante de la loi de Henry. Les sources d'information sur les données environnementales ainsi que des modèles d'estimation disponibles sont aussi précisés.

Module « Aperçu des dangers pour la santé » (65)

Concernant les dangers sur la santé, il s'agit de compiler l'information existante sur les effets potentiels aigus et chroniques chez l'humain résultant de l'exposition aux substances chimiques et les niveaux auxquels ces effets surviennent, d'évaluer la toxicité à partir des données humaines disponibles, complétées si nécessaire par des données animales, d'identifier les organes cibles et de déterminer les substances représentant le moins de risque. Parmi les données à recueillir, il y a les toxicités aiguë et chronique, la cancérogénicité (p. ex. classification du CIRC), la mutagénicité, la reprotoxicité, la neurotoxicité, les effets sur le développement, l'irritation, la dose létale médiane (DL₅₀¹¹¹) pour les mammifères, la dose de référence (RfD¹¹²), les valeurs limites

¹¹⁰ Chemical Abstracts Service, American Chemical Society, Columbus, OH. Voir: <http://www.cas.org/>

¹¹¹ La DL₅₀ orale est la dose unique déduite statistiquement, censée provoquer la mort de 50% des animaux auxquels la substance a été administrée.

¹¹² C'est une estimation (avec une certaine incertitude qui peut atteindre un ordre de grandeur) de l'exposition journalière d'une population humaine (y compris les sous-groupes sensibles) qui, vraisemblablement, ne présente pas de risque appréciable d'effets néfastes durant une vie entière. Elle s'exprime en masse de substance par unité de masse corporelle.

d'exposition (ACGIH, OSHA, NIOSH). Un certain nombre de sources d'information sur l'évaluation des dangers des substances chimiques ainsi que des programmes informatiques permettant l'estimation des paramètres toxicologiques sont rapportés.

Module « Aperçu des dangers environnementaux » (65)

L'évaluation des dangers environnementaux est quant à elle uniquement axée sur la toxicité aquatique. Il s'agit de collecter les données sur la toxicité mesurée ou prédite des substances chimiques sur les organismes aquatiques afin de caractériser le danger potentiel des rejets dans les eaux. La concentration létale médiane (CL_{50}^{113}), la constante de vitesse et la demi-vie d'hydrolyse ou encore le coefficient de partage octanol-eau sont des exemples de paramètres devant être connus.

Module « Évaluation de l'exposition » (65)

Les objectifs sont d'estimer l'exposition professionnelle, l'exposition des consommateurs pendant l'utilisation s'il y a lieu, celle du public, ainsi que celle des organismes aquatiques à partir des rejets de la substance chimique dans l'environnement. L'évaluation devrait se faire en suivant les étapes suivantes : 1) identifier les populations exposées (travailleurs ou autres), 2) caractériser l'exposition en utilisant par exemple des données sur le nombre de travailleurs ou sur les différentes activités impliquant la manutention des produits chimiques, 3) identifier les voies d'exposition, 4) chercher dans la littérature les données sur les concentrations retrouvées dans l'air, 5) estimer les concentrations à partir de mesures ou de modèles de devenir et de transport, 6) sélectionner les paramètres d'exposition (p. ex. fréquence de l'exposition, durée), 7) quantifier l'exposition à partir des équations données dans les documents de référence du U.S. EPA pour l'évaluation de l'exposition, 8) évaluer les incertitudes, et 9) transférer les informations sur l'exposition dans les différents autres modules où c'est nécessaire (p. ex. la connaissance des voies potentielles d'exposition est utile dans le module sur les dangers pour la santé).

Module « Caractérisation du risque » (65)

Le but de ce module est de combiner les informations sur les dangers des substances et celles sur l'exposition afin d'évaluer et de comparer les risques pour l'environnement, le consommateur et le travailleur. Il faut identifier d'une manière qui facilite la prise de décision les sujets de préoccupation pour chaque substitut. Si la différence de risque entre les différents substituts est subtile, il est alors nécessaire de procéder à une analyse quantitative et détaillée du risque. Une approche en neuf étapes est proposée pour cette analyse quantitative, seules les sept premières présentées ci-dessous sont d'intérêt pour le présent travail :

¹¹³ La CL_{50} est la concentration d'une substance déduite statistiquement qui devrait provoquer au cours d'une exposition ou après celle-ci, pendant une période définie la mort de 50% des animaux exposés pendant une durée déterminée.

1. Collecter et organiser les données du module « Aperçu des dangers à la santé » incluant les données sur la cancérogénicité, les toxicités aiguë ou chronique, le q_1^* ¹¹⁴, la RfD pour les substances ne causant pas le cancer, le LOAEL¹¹⁵ ou le NOAEL¹¹⁶ pour les substances dont la RfD ou la concentration de référence (RfC¹¹⁷) n'est pas disponible, celles du module « Aperçu des dangers environnementaux » ainsi que celles du module « Évaluation de l'exposition » incluant les scénarios d'exposition, les PDR¹¹⁸, les niveaux d'exposition, etc.
2. Calculer le risque chimique. Pour un risque cancérogène, il s'obtient à partir de l'équation suivante :

$$\text{Risque de cancer} = LADD \times q_1^* \quad (16)$$

LADD ou Lifetime Average Daily Dose est la dose potentielle estimée reçue pendant la durée d'exposition pondérée sur la durée de la vie. L'équation linéaire précédente n'est valide qu'à faibles doses, c'est-à-dire si le risque est inférieur à 0,01.

Si la substance chimique cause un effet autre que le cancer, le risque est calculé à partir de l'équation suivante :

$$HQ = \frac{PDR}{RfD} \quad (17)$$

HQ ou Hazard Quotient est l'indice de danger. Il repose sur l'hypothèse qu'il y a un niveau d'exposition en deçà duquel il est improbable qu'il y ait des effets nuisibles sur la santé même pour les sous-groupes les plus sensibles.

Dans le cas de substances induisant des effets sur le développement, le risque est calculé séparément en utilisant une RfD correspondant à ce type d'effets. Pour les substances qui n'ont ni RfD ni RfC, on calcule le MOE (Margin of Exposure) à partir de l'équation suivante :

$$MOE = \frac{NOAEL}{PDR} \text{ ou } \frac{LOAEL}{PDR} \quad (18)$$

¹¹⁴ q_1^* est le coefficient unitaire de risque. Il correspond à la limite supérieure de l'intervalle de confiance à 95 % de la pente de la droite (relation dose-réponse) établie à partir du modèle « Multi-stage » linéarisé. Le modèle « Multi-stage » est un modèle mécaniste utilisé par le U.S. EPA pour évaluer le risque cancérogène à faible dose (18).

¹¹⁵ LOAEL : Lowest-Observed Adverse Effect Level, c'est la dose la plus faible à laquelle il y a une augmentation statistiquement ou biologiquement significative dans la fréquence et la sévérité des effets nuisibles chez la population exposée par rapport au groupe témoin.

¹¹⁶ NOAEL : No-Observed Adverse Effect Level, c'est la dose la plus élevée où il n'y a pas d'augmentation statistiquement ou biologiquement significative dans la fréquence et la sévérité des effets nuisibles chez la population exposée par rapport au groupe témoin.

¹¹⁷ C'est une estimation (avec une certaine incertitude qui peut atteindre un ordre de grandeur) de l'exposition par l'inhalation continue d'une population humaine (y compris les sous-groupes sensibles) sans risque appréciable d'effets néfastes durant une vie entière. Elle s'exprime en masse de substance par m3 d'air inhalé.

¹¹⁸ PDR : Potential Dose Rate, c'est la quantité d'une substance chimique ingérée, inhalée ou appliquée sur la peau par unité de temps.

3. Calculer le risque pour une exposition à plusieurs substances : dans ce cas, il faut faire la somme des risques individuels relatifs à chaque substance comme calculés à l'étape 2. Il faut cependant noter que cela n'est valable que si les effets sont additifs.
4. Obtenir le risque total s'il y a plusieurs voies d'exposition (p. ex. un travailleur qui inhalerait une substance chimique volatile en même temps qu'il serait exposé par voie cutanée). Il faut alors faire la somme des risques pour chacune des voies d'accès. Pour les substances induisant d'autres effets que le cancer, il faut faire la somme séparément en fonction de la durée d'exposition (p. ex. chronique, subchronique, aiguë).
5. Calculer s'il y a lieu le risque de cancer au niveau de la population en multipliant le risque unitaire par le nombre total de personnes exposées.
6. Évaluer l'incertitude et la variabilité provenant des données utilisées pour évaluer le danger et l'exposition.
7. Récapituler les résultats sous la forme d'un tableau présentant le risque de cancer, HQ et MOE pour chacune des substances étudiées.

Module « Prise de décision » (65)

Le module « Prise de décision » est le dernier module du CTSA. Il combine les données concernant le risque, la compétitivité, la conservation des ressources, les bénéfices sociaux ainsi que l'évaluation des coûts pour déterminer les avantages et inconvénients globaux de la substance de référence et des substituts potentiels sous une perspective individuelle du décideur et d'un point de vue sociétal. La décision finale d'implanter ou non une solution de remplacement est prise par les décideurs qui doivent considérer en plus des résultats du CTSA d'autres facteurs tels que la conjoncture économique de l'entreprise.

Annexe 2 : Le modèle à colonnes

Colonne	1a	1b	2	3	4	5
Risque	Toxicité aiguë	Toxicité chronique	Danger pour l'environnement	Danger incendiaire et explosibilité	Potentiel d'exposition	Dangers causés par les procédés
Très élevé	Substances ¹¹⁹ très toxiques (R26, R27, R28) Substances pouvant produire des gaz très toxiques lorsqu'en contact avec des acides (R32)	Substances cancérogènes de catégorie 1 ou 2 (R45, R49) Substances mutagènes de catégorie 1 ou 2 (R46) ¹²⁰		Substances explosives (R2, R3) Gaz et liquides extrêmement inflammables (R12) Substances spontanément inflammables (R17)	Gaz, Liquides avec pression de vapeur > 250 hPa (> 187,5 mmHg) Solides pulvérulents Aérosols	
Élevé	Substances toxiques (R23, R24, R25) Substances très corrosives (R35) Substances pouvant produire des gaz toxiques lorsqu'en contact avec de l'eau ou des acides (R29, R31) Substances provoquant une sensibilisation cutanée (R43) Substances	Substances toxiques pour la reproduction de catégorie 1 ou 2 (R60, R61) ¹²³ Substances cancérogènes de catégorie 3 (R40) Substances mutagènes de catégorie 3 (R68) ¹²⁴ Substances pouvant s'accumuler dans l'organisme (R33)	Substances avec le symbole « N » (dangereux pour l'environnement) et les phrases de risque R50, R51, R53, R54, R55, R56, R57, R58, R59 Substances très dangereuses pour les eaux (catégorie WGK3) ¹²¹	Substances facilement inflammables (R11) Substances libérant des gaz extrêmement inflammables au contact avec l'eau (R15) Substances oxydantes (R7, R8, R9) Substances comportant les phrases de risque R1, R4, R5, R6, R7, R14, R16, R18, R19, R30, R44	Liquides avec une pression de vapeur entre 50 et 250 hPa (37,5 à 187,5 mmHg)	Procédé ouvert Possibilité de contact cutané direct Application sur une grande surface

¹¹⁹ Le mot « substance » dans ce tableau inclut les préparations ou mélanges

¹²⁰ Applicable pour les préparations contenant $\geq 0,1\%$ de substances cancérogènes ou mutagènes de catégories 1 ou 2.

¹²¹ Classification allemande pour les contaminants de l'eau, WGK1 : faible danger pour les eaux, WGK2 : danger pour les eaux, WGK3 : Danger sévère pour les eaux. Voir <http://www.umweltbundesamt.de/wgs-e/index.htm>

Colonne Risque	1a	1b	2	3	4	5
	Toxicité aiguë	Toxicité chronique	Danger pour l'environnement	Danger incendiaire et explosibilité	Potentiel d'exposition	Dangers causés par les procédés
	provoquant une sensibilisation respiratoire (R42) ¹²²					
Moyen	Substances nocives (R20, R21, R22) Substances pouvant s'accumuler dans le lait maternel (R64) Substances corrosives (R34, pH $\geq 11,5$, pH ≤ 2) Substances provoquant des lésions oculaires graves (R41) Gaz non toxiques pouvant causer une suffocation par déplacement d'air (azote)	Substances toxiques pour la reproduction de catégorie 3 (R62, R63) ¹²⁵	Substances sans le symbole « N » mais comportant les phrases de risque R52, R53 Substances dangereuses pour les eaux (catégorie WGK2) ¹²¹	Substances inflammables (R10)	Liquides avec une pression de vapeur entre 10 et 50 hPa (7,5 à 37,5 mmHg)	Procédés en circuit fermé mais avec des possibilités d'exposition lors de certaines activités (p. ex. nettoyage, échantillonnage, remplissage)
Faible	Substances irritantes (R36, R37, R38) Atteinte cutanée lors d'un travail en milieu humide	Substances sans phrases de risques mais néanmoins dangereuses, provoquant une affection chronique	Substances faiblement dangereuses pour les eaux (catégorie WGK1) ¹²¹	Substances à peine inflammables (point d'éclair entre 55 et 100°C)	Liquides avec une tension de vapeur entre 2 et 10 hPa (1,5 à 7,5 mmHg)	

¹²² Applicable pour les préparations contenant ≥ 1 % ($\geq 0,2$ % pour les gaz) de substances provoquant la sensibilisation cutanée ou respiratoire

¹²³ Applicable pour les préparations contenant $\geq 0,5$ % ($\geq 0,2$ % pour les gaz) de substances toxiques pour la reproduction de catégories 1 ou 2.

¹²⁴ Applicable pour les préparations contenant ≥ 1 % de cancérogènes ou de mutagènes de catégorie 3.

¹²⁵ Applicable pour les préparations contenant ≥ 5 % (≥ 1 % pour les gaz) de substances toxiques pour la reproduction de catégorie 3.

Colonne Risque	1a Toxicité aiguë	1b Toxicité chronique	2 Danger pour l'environnement	3 Danger incendiaire et explosibilité	4 Potentiel d'exposition	5 Dangers causés par les procédés
	<p>Substances provoquant une atteinte des poumons en cas d'ingestion (R65)</p> <p>Substances provoquant le dessèchement de la peau ou des gerçures (R66)</p> <p>Substances dont les vapeurs provoquent des somnolences ou des vertiges (R67)</p>					
Négligeable	Substances sans danger (p. ex. eau, sucre, paraffine)		Substances sans danger pour les eaux ¹²¹	Substances ininflammables ou très difficilement inflammables (liquides dont le point d'éclair est >100°C)	<p>Liquides avec pression de vapeur < 2 hPa (> 1,5 mmHg)</p> <p>Solides non pulvérulents</p>	<p>Procédé hermétiquement clos</p> <p>Procédé en circuit fermé avec des dispositifs pour évacuer les polluants aux points d'émission.</p>

Annexe 3 : P2OASys

Catégories de danger et critères d'évaluation	Unité	Scores				
		2	4	6	8	10
1. Effets aigus chez l'humain						
CL ₅₀ inhalation	ppm	≥ 10 000	≥ 1000 – 10 000	≥ 150 - 1000	≥ 15 - 150	<15
PEL/TLV ¹²⁶	ppm	≥ 200	≥ 100 - 200	≥ 25 - 100	≥ 5 - 25	<5
PEL/TLV (aérosols)	mg/m ³	≥ 10	≥ 5 - 10	≥ 1 - 5	≥ 0,1 - 1	< 0,1
DIVS ¹²⁷	ppm	≥ 1000	≥ 500 - 1000	≥ 50 - 500	≥ 10 - 50	<10
Irritation respiratoire	F/M/E ¹²⁸	F	F/M	M	M/E	E
DL ₅₀ orale	mg/kg	≥ 5000	≥ 500 - 5000	≥ 50 - 500	≥ 5 - 50	<5
Irritation cutanée	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
Absorption cutanée	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
DL ₅₀ cutanée	mg/kg	≥ 5000	≥ 500 - 5000	≥ 50 - 500	≥ 5 - 50	<5
Irritation oculaire	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
2. Effets chroniques chez l'humain						
Dose de référence (RfD)	mg/kg/jour	≥ 0,1	≥ 0,05 – 0,1	≥ 0,01 - 0,05	≥ 0,001 - 0,05	< 0,001
Cancérogénicité	EPA/CIRC	4,E	3,D	2B,C	2A,B	1,A
Mutagénicité	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
Effets reprotoxiques	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
Neurotoxicité	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
Effets sur le développement	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
Sensibilisation ou maladie respiratoire	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
Autres effets chroniques sur les organes	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
3. Dangers physiques						
Chaleur	WBGT ¹²⁹ , °C	< 25	≥ 25 - 27	≥ 27 - 30	≥ 30 - 32	> 32
Bruit	dba	< 80	≥ 80 - 85	≥ 85	> 85 - 90	> 90

¹²⁶ Threshold Limit Values: valeurs limites d'exposition professionnelle à caractère sanitaire définies par l'ACGIH. Voir : <http://www.acgih.org>

¹²⁷ Concentration entraînant un danger immédiat pour la vie ou la santé (Immediately Dangerous for Life or Health ou IDLH en anglais). Elles peuvent être trouvées en ligne à l'adresse <http://www.cdc.gov/niosh/idlh/intridl4.html>

¹²⁸ F/M/E : faible/moyen/élevé

¹²⁹ Wet-bulb globe temperature : Température mesurée à l'aide d'un thermomètre à globe mouillé pour l'évaluation de la contrainte thermique.

Catégories de danger et critères d'évaluation	Unité	Scores				
		2	4	6	8	10
Vibration	m/s ²	< 4	≥ 4 - 6	≥ 6 - 8	≥ 8 - 12	>12
Danger ergonomique	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
Danger psychosocial	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
4. Dangers aquatiques						
Critère de qualité de l'eau HWQC ¹³⁰	mg/L	> 10	6-8	4-6	1-4	<1
CL ₅₀ aquatique	mg/L	≥ 1000	≥ 50 - 1000	≥ 1 - 50	≥ 0,1 - 1	<0,1
NOAEC ¹³¹ poisson	mg/L	≥ 0,2	≥ 0,02 - 0,2	≥ 0,002 - 0,02	≥ 0,0002 - 0,002	< 0,0002
CE ₅₀ ¹³²	mg/L	≥ 100	≥ 10 - 100	≥ 1 - 10	≥ 0,1 - 1	< 0,1
Effets écologiques observés	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
5. Persistance / bioaccumulation						
Persistance	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
Demi-vie de demande biologique en oxygène	jours	< 4	≥ 4 - 10	≥ 10 - 100	≥ 100 - 500	>500
Demi-vie d'hydrolyse	jours	< 4	≥ 4 - 10	≥ 10 - 100	≥ 100 - 500	>500
Bioconcentration	log K _{oc}	< 1	≥ 1 - 2	≥ 2 - 4	≥ 4 - 6	> 6
Facteur de bioconcentration (FBC)	Sans unité	< 10	≥ 10 - 100	≥ 100 - 200	≥ 200 - 1000	> 1000
6. Dangers atmosphériques						
Gaz à effet de serre ¹³³	O/N ¹³⁴					
Substance appauvrissant la couche d'ozone ¹³³	Unités de PDO ¹³⁵					
Formation de pluie acide ¹³³	O/N					
NESHAP ¹³⁶ , ¹³³	O/N					
7. Dangers liés à l'élimination						
Décharge	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
Quantité rapportable	livres ¹³⁷	≥ 5000	≥ 1000 - 5000	≥ 100 - 1000	≥ 10 - 1000	≥ 1 - 10

¹³⁰ Critères établis en vertu du "Clean Water Act" des États-Unis: Human Health Water Quality Criteria (HWQC). Voir : <http://www.epa.gov/waterscience/criteria/humanhealth/15table-fs.htm>

¹³¹ No Observed Adverse Effect Concentration

¹³² Concentration effective 50 : concentration aqueuse d'une substance causant plus de 5% et moins de 50% de réduction de croissance végétale.

¹³³ Ces critères sont qualitatifs et n'interviennent pas dans le calcul des scores ; ils peuvent être utiles lors de la comparaison des scores de catégorie des différentes options.

¹³⁴ O : oui, N : non

¹³⁵ PDO : Potentiel de déplétion de la couche d'ozone

¹³⁶ National Emission Standards for Hazardous Air Pollutants, en vertu du « Clean Air Act » des États-Unis. Voir : <http://www.epa.gov/ttn/atw/mactfnlalph.html>

¹³⁷ Une livre équivaut à 454 g.

Catégories de danger et critères d'évaluation	Unité	Scores				
		2	4	6	8	10
Incinération	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
Recyclage	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
8. Dangers chimiques						
Pression de vapeur	mm Hg	< 0,1	≥ 0,1 - 1	≥ 1 - 10	≥ 10 - 100	>100
Solubilité dans l'eau ¹³³	mg/L					
Densité ¹³³	Sans unité					
Inflammabilité ¹³⁸	0, 1, 2, 3, 4	0	1	2	3	4
Point d'éclair	°C	≥ 100	≥ 75 -100	≥ 25 - 75	≥ 10 - 25	<10
Réactivité ¹³⁹	0, 1, 2, 3, 4	0	1	2	3	4
pH		7	6-7, 7-8	5-6, 8-9	3-5, 9-11	1-3, 11-14
Corrosivité	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
Système à haute pression	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
Système à haute température	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
Potentiel de réaction ¹⁴⁰	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
Seuil de détection olfactive	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
Composé organique volatil	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
9. Utilisation d'énergie et de ressources						
Ressource non renouvelable	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
Utilisation d'eau	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
Utilisation d'énergie	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
10. Dangers liés au cycle de vie du produit						
Effets des matières premières utilisées dans la fabrication	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
Danger pour le consommateur	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
Danger lié à la mise au rebut	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E
11. Potentiel d'exposition¹⁴¹						
Potentiel d'exposition	F/M/E	F	F/M	M	M/E	E

¹³⁸ Classification de la NFPA

¹³⁹ Classification du ministère des Transports des États-Unis

¹⁴⁰ C'est le potentiel qu'a la substance de réagir avec d'autres substances présentes dans le procédé ou dans d'autres procédés de l'installation.

¹⁴¹ Le score le pour potentiel d'exposition doit être déterminé par l'utilisateur à partir d'une enquête préliminaire. Le potentiel d'exposition peut être évalué qualitativement (p. ex. inspections visuelles, entrevues avec les travailleurs) ou quantitativement (p. ex. échantillonnage dans le milieu de travail ou dans l'environnement, évaluation de l'exposition).

Annexe 4 : IRCHS

Tableau V : Attribution du score I_{tox} en fonction de la valeur limite d'exposition professionnelle sur 8h

TLV ¹⁴² (mg/m ³)	I_{tox}
> 2500	0
≤ 2500 mais > 250	1
≤ 250 mais > 25	2
≤ 25 mais > 2,5	3
≤ 2,5 mais > 0,25	4
≤ 0,25	5

Tableau VI : Attribution du score I_{cancer} en fonction du classement du U.S. EPA ou de l'ACGIH

U.S. EPA	ACGIH	I_{cancer}
E	A5	0
D	A4	0
C	Sans objet	1,5
B2	A3	3,5
B1	A2	4
A	A1	5

Tableau VII : Attribution du score I_{pv} en fonction de la pression de vapeur de la substance à 25 °C

Pression de vapeur (Torr*)	I_{pv}
< 0,076	0
≥ 0,076 mais < 0,76	1
≥ 0,76 mais < 7,6	2
≥ 7,6 mais < 76	3
≥ 76 mais < 760	4
≥ 760	5

* 760 torr = 760 mm Hg

¹⁴² Threshold Limit Value de l'ACGIH

Tableau VIII : Attribution du score de pulvéulence I_{pb} pour les solides

Catégorie	Critères	I_{pb}
a	Point de fusion > 25°C, on suppose qu'il s'agit d'un solide à la température et la pression standard; pas de notation « poussière » accompagnant la TLV de l'ACGIH	1,5
b	Présence de la notation « poussière » accompagnant la TLV de l'ACGIH	3,5
c	Substance pouvant être à la fois manipulée ou utilisée sous la forme d'un solide pulvérulent et d'une solution pulvérisée de ce solide (en l'absence de notation « poussière » ou « brouillard » accompagnant la TLV de l'ACGIH) ou, Substance utilisée dans une solution de placage et capable de générer un brouillard lorsqu'elle est chauffée ou agitée, dans ce cas un score combiné est assigné (voir catégorie c pour les liquides)	3
d	Substance dont le point de fusion est proche de 25°C et qui peut exister sous la forme d'un solide ou d'un liquide à la température ambiante	2
e	Le solide fait partie de la liste des substances de Davis et coll. (34), il est uniquement sous la forme d'une solution ou est typiquement utilisé seulement en solution.	1,5
f	Solide ayant tendance à être présent dans les particules de fumée de combustion, particulièrement les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les polychlorodibenzodioxines et polychlorodibenzofuranes.	1,5
g	Tous types d'amiante friable	5

Tableau IX : Attribution du score de pulvéulence I_{pb} pour les liquides

Catégorie	Critères	I_{pb}
a	Point de fusion < 25°C, Point d'ébullition > 25°C, on suppose qu'il s'agit d'un liquide à la température et à la pression standard, on considère particulièrement les acides inorganiques liquides, l'acide acétique, les acides gras à courte chaîne ou les alcalis et les solutions alcalines susceptibles de former un brouillard lorsqu'agités mécaniquement, éclaboussés ou chauffés, sans mention de brouillard dans la TLV de l'ACGIH. Cette catégorie inclut le chlorure d'hydrogène, le bromure d'hydrogène, le fluorure d'hydrogène, l'iodure d'hydrogène, l'ammoniac et le cyanure d'hydrogène qui lorsqu'en solution aqueuse sont connus respectivement sous les dénominations acide chlorhydrique, acide bromhydrique, acide fluorhydrique, acide iodhydrique, hydroxyde d'ammonium et acide cyanhydrique.	1,5
b	La TLV de l'ACGIH pour cette substance comporte la mention « brouillard »	3,5
c	Point de fusion > 25°C, on suppose que la substance est solide à la température et à la pression standard, mais aucune mention de « poussière » dans la TLV de l'ACGIH, elle peut être manipulée, pulvérisée ou employée en solution, habituellement comme pesticide, herbicide ou dans des opérations de pulvérisation à la surface du sol (voir catégorie c pour les solides).	1,5

Si le point d'ébullition de la substance est inférieur à 25°C, on suppose qu'il s'agit d'un gaz et on assigne un I_{pb} de 0.

Annexe 5 : Quick Scan

Tableau X : Détermination du niveau de danger

Propriété toxicologique	Niveau de danger	Critères
Persistance P	P1	Pas intrinsèquement biodégradable, dégradation abiotique non rapide
	P2	Biodégradabilité inhérente lente
	P3	Biodégradabilité inhérente : adaptative ou incomplète
	P4	Facilement ou rapidement biodégradable
Bioaccumulation B	B1a	$FBC^{143} \geq 5000$ $\log K_{oe} \geq 5$
	B1b	$FBC \geq 2000$
	B2	$FBC \geq 500$ $\log K_{oe} \geq 4$
	B3	$FBC \geq 100$ $\log K_{oe} \geq 3$
Écotoxicité T	B4	$FBC < 100$ $\log K_{oe} < 3$
	T1	$NOEC^{144} 0,01 \text{ mg/l}$ $CL_{50} \leq 0,1 \text{ mg/l}$
	T2	$NOEC \leq 0,1 \text{ mg/l}$ $CL_{50} \leq 1 \text{ mg/l}$
	T3	$NOEC \leq 1 \text{ mg/l}$ $CL_{50} \leq 10 \text{ mg/l}$
Effets délétères chez l'humain He (24)	T4	$NOEC > 1 \text{ mg/l}$ $CL_{50} > 10 \text{ mg/l}$
	G1	Toxique : risques d'effets graves en cas d'exposition prolongée (R48/23, R48/24, R48/25) Très toxique : risques d'effets irréversibles très graves par inhalation (R26 et R39/26), contact avec la peau (R27 et R39/27) ou ingestion (R28 et R39/28)
	G2	Toxique : risques d'effets irréversibles très graves par inhalation (R23 et R39/23), contact avec la peau (R24 et R39/24) ou ingestion (R25 et R39/25) Sensibilisation par contact cutané R43, par inhalation R42, Provoque des brûlures (graves) R34, R35, Dégage des gaz toxiques ou des acides au contact avec l'eau (R29, R31, R32), Inhalation des vapeurs peut provoquer somnolences et vertiges R67
	G3	Nocif : risques d'effets graves pour la santé en cas d'exposition prolongée (R48/20, R48/21 et R48/22) Nocif et possibilité d'effets irréversibles par inhalation (R20, R68/20), contact avec la peau (R21 et R68/21), ou ingestion (R22 et R68/22) Risques de lésions oculaires graves R41, Nocif, peut provoquer une atteinte des poumons par ingestion R65
Cancérogénicité C (24)	G4	Irritant pour les yeux R36, pour les voies respiratoires R37 ou pour la peau R38 Exposition répétée peut provoquer gerçures et dessèchement de la peau R66 Substance non classée
	C1	Peut causer le cancer (R45, R49, cat. 1 & 2)
	C2	Effet cancérogène suspecté, preuves insuffisantes (R40, cat. 3)
	C4	Substance non classée

¹⁴³ FBC : Facteur de bioconcentration

¹⁴⁴ NOEC : Concentration sans effet observé

Propriété toxicologique	Niveau de danger	Critères
Mutagénicité M (24)	M1	Peut causer des altérations génétiques héréditaires (R46) Effet cancérigène suspecté, preuves insuffisantes (R40)
	M4	Substance non classée
Reprotoxicité R (24)	R1	Peut altérer la fertilité (R60) Risque pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant (R61)
	R2	Risque possible d'altération de la fertilité (R62) Risque possible pendant la grossesse d'effets néfastes pour l'enfant (R63) Risque possible pour les bébés nourris au lait maternel (R64)
	R4	Substance non classée
Perturbation hormonale Ho	H2	
	H4	Substance non classée

Tableau XI : Détermination du niveau de préoccupation pour les propriétés PBT

	Classe de danger	T1	T2	T3	T4
P1	B1a	VHC ¹⁴⁵	VHC	VHC	VHC
	B1b	VHC	VHC	HC	C
	B2	HC	HC	C	LC
	B3	HC	C	C	LC
	B4	HC	C	C	LC
P2	B1	HC	HC	C	C
	B2	HC	HC	C	LC
	B3	C	C	C	LC
	B4	C	C	C	LC
P3	B1	HC	C	C	LC
	B2	C	C	C	LC
	B3	C	C	C	LC
	B4	C	C	C	LC
P4	B1	HC	C	C	LC
	B2	C	C	C	LC
	B3	C	C	C	LC
	B4	C	C	LC	LC

¹⁴⁵ VHC : Very High Concern (Niveau de préoccupation très élevé), HC : High Concern (Niveau de préoccupation élevé), C : Concern (Niveau de préoccupation moyen), LC : Low Concern (Niveau de préoccupation faible).

Tableau XII : Détermination du niveau de préoccupation selon les effets sur la santé

	Classe de danger	Niveau de préoccupation
He	G1	VHC
	G2	HC
	G3	C
	G4	LC
C	C1	VHC
	C2	HC
	C4	LC
M	M1	VHC
	M4	LC
R	R1	VHC
	R2	HC
	R4	LC
Ho	H1	HC
	H4	LC

Tableau XIII : Détermination du niveau de préoccupation en fonction du danger de la substance et de son utilisation

Niveau de préoccupation basé sur le danger	Utilisation de la substance comme indicateur de l'exposition			
	Intermédiaire de synthèse	Substance à usage industriel	Utilisation en procédé ouvert par un professionnel	Substance dans des produits de grande consommation
	Exposition faible	Exposition moyenne	Exposition élevée	Exposition très élevée
Très élevé	Élevé	Élevé	Très élevé	Très élevé
Élevé	Moyen	Moyen	Élevé	Élevé
Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Élevé
Faible	Faible	Faible	Faible	Moyen
Pas de données, Très élevé	Très élevé	Très élevé	Très élevé	Très élevé

Annexe 6 : Green Screen

Niveau de préoccupation Nature du danger	Très élevé	Élevé	Modéré	Faible
Devenir environnemental				
Persistance ¹⁴⁶ (demi-vie en jours)	Sol ou sédiments : >180 ou Eau : > 60	Sol ou sédiments : > 60 - 180 Eau : > 40 – 60 ou Potentiel de transport sur longue distance	Sol ou sédiments : 30 - 60 ou Eau : 7 - 40	Sol ou sédiments : < 30 Eau : < 7 ou Biodégradabilité immédiate
Potentiel de bioaccumulation ¹⁴⁶	FBC ¹⁴⁷ /FBA ¹⁴⁸ > 1000 - 5000 Si pas de données, log K _{oc} > 5	FBC/FBA > 1000 – 5000; Si pas de données, log K _{oc} > 4,5-5, ou Poids de la preuve indique une bioaccumulation chez l'humain ou les espèces sauvages	FBC/FBA : 500 – 1000; Si pas de données, log K _{oc} : 4-4,5 Éléments de preuve suggérant la bioaccumulation chez l'humain ou les espèces sauvages.	FBC/FBA < 500; si pas de données, log K _{oc} < 4
Écotoxicité				
Toxicité aquatique aiguë ¹⁴⁶		CL ₅₀ /CE ₅₀ /CI ₅₀ ¹⁴⁹ : < 1 mg/l ou SGH ¹⁵⁰ Catégorie 1	CL ₅₀ /CE ₅₀ /CI ₅₀ : 1-100 mg/l ou SGH Catégorie 2 ou 3	CL ₅₀ /CE ₅₀ /CI ₅₀ : > 100 mg/l
Toxicité aquatique chronique ¹⁴⁶		NOEC ¹⁵¹ < 0,1 mg/l ou SGH Catégorie 1	NOEC : 0,1-10 mg/l, ou SGH Catégorie 2, 3, 4	NOEC > 10 mg/l
Effets sur la santé humaine				
Cancérogénicité ¹⁵²		Éléments de preuves d'effets	Études animales suggérant	Aucune base de préoccupation

¹⁴⁶ Les données expérimentales sont préférables, en leur absence, des valeurs basées sur des relations structure-activité suffisent.

¹⁴⁷ Facteur de bioconcentration

¹⁴⁸ Facteur de bioaccumulation

¹⁴⁹ Concentration inhibitrice 50, c'est la concentration qui inhibe 50% d'une activité biologique donnée en un temps déterminé.

¹⁵⁰ SGH : Système général harmonisé de classification et d'étiquetage des produits chimiques

¹⁵¹ NOEC : Concentration sans effet observé

¹⁵² Certains effets sur la santé sont considérés dans le Green Screen comme prioritaires soit parce qu'ils interviennent à faible dose, qu'ils sont irréversibles, qu'ils sont difficilement gérables avec les moyens de maîtrise conventionnels ou parce qu'ils sont considérés comme prioritaires dans des programmes

Niveau de préoccupation Nature du danger	Très élevé	Élevé	Modéré	Faible
		nocifs chez l'humain Poids de la preuve démontrant un potentiel d'effets nocifs chez l'humain NTP ¹⁵³ : cancérogène humain connu ou raisonnablement anticipé OSHA : cancérogène U.S. EPA : cancérogène probable Substances listées dans la Proposition 65 ¹⁵⁴ de la Californie CIRC : groupe 1 ou 2A UE : catégorie 1 ou 2 ou SGH catégorie 1A ou 1B	la cancérogénicité Données analogues Classe chimique connue pour causer de la toxicité U.S. EPA : possiblement cancérogène CIRC : groupe 2B UE : catégorie 3 ou SGH catégorie 2	CIRC : groupe 3 ou 4
Mutagénicité/Génotoxicité ¹⁵²		Éléments de preuves d'effets nocifs chez l'humain Poids de la preuve démontrant un potentiel d'effets nocifs chez l'humain UE : catégorie 1 ou 2, ou SGH catégorie 1A ou 1B	Études animales suggérant la mutagénicité Données analogues Classe chimique connue pour causer de la toxicité UE : catégorie 3 ou SGH catégorie 2	Aucune base de préoccupation identifiée
Reprotoxicité ¹⁵²		Éléments de preuves d'effets nocifs chez l'humain Poids de la preuve démontrant un potentiel d'effets nocifs	Études animales suggérant la reprotoxicité Données analogues Classe chimique connue	Aucune base de préoccupation identifiée

d'évaluation gouvernementaux existants. Les effets prioritaires sont la cancérogénicité, la mutagénicité/génotoxicité, la toxicité sur le développement, la neurotoxicité et ceux causés par les perturbateurs endocriniens.

¹⁵³ NTP : National Toxicology Program. Voir à l'adresse suivante : <http://ntp.niehs.nih.gov/ntp/roc/tox11.html>

¹⁵⁴ Proposition 65 (Safe Drinking Water and Toxic Enforcement Act of 1986) est une loi de l'État de la Californie dont le but est de protéger les citoyens et les sources d'eau potable de l'État contre les substances chimiques causant le cancer, les anomalies congénitales ou d'autres sources de danger pour la reproduction et d'informer les citoyens sur l'exposition à de telles substances. Voir : <http://www.oehha.org/prop65.html>

Niveau de préoccupation Nature du danger	Très élevé	Élevé	Modéré	Faible
		chez l'humain Centre pour l'évaluation des risques pour la reproduction humaine du NTP Proposition 65 de la Californie UE : catégorie 1 ou 2, ou SGH : catégorie 1A ou 1B	pour causer la toxicité UE : catégorie 3 ou SGH catégorie 2	
Toxicité pour le développement ¹⁵²		Éléments de preuves d'effets nocifs chez l'humain Poids de la preuve démontrant un potentiel d'effets nocifs chez l'humain Centre pour l'évaluation des risques pour la reproduction humaine du NTP Proposition 65 de la Californie	Études animales suggérant la toxicité pour le développement Données analogues Classe chimique connue pour causer de la toxicité	Aucune base de préoccupation identifiée
Perturbation endocrinienne ¹⁵²		Éléments de preuves d'effets nocifs chez l'humain Poids de la preuve démontrant un potentiel d'effets nocifs chez l'humain	Études animales suggérant la perturbation endocrinienne Données analogues Classe chimique connue pour causer de la toxicité Liste de l'UE ¹⁵⁵ : catégorie 1 ou 2 Liste japonaise ¹⁵⁶	Aucune base de préoccupation identifiée
Neurotoxicité ¹⁵²		Éléments de preuves d'effets nocifs chez l'humain Poids de la preuve démontrant un potentiel d'effets nocifs chez l'humain	Études animales suggérant de la neurotoxicité Données analogues Classe chimique connue pour causer de la toxicité	Aucune base de préoccupation identifiée

¹⁵⁵ Une liste de substances prioritaires devant faire l'objet d'une évaluation approfondie quant à leur rôle de perturbateur endocrinien a été établie par l'UE. Voir : http://ec.europa.eu/environment/docum/01262_en.htm

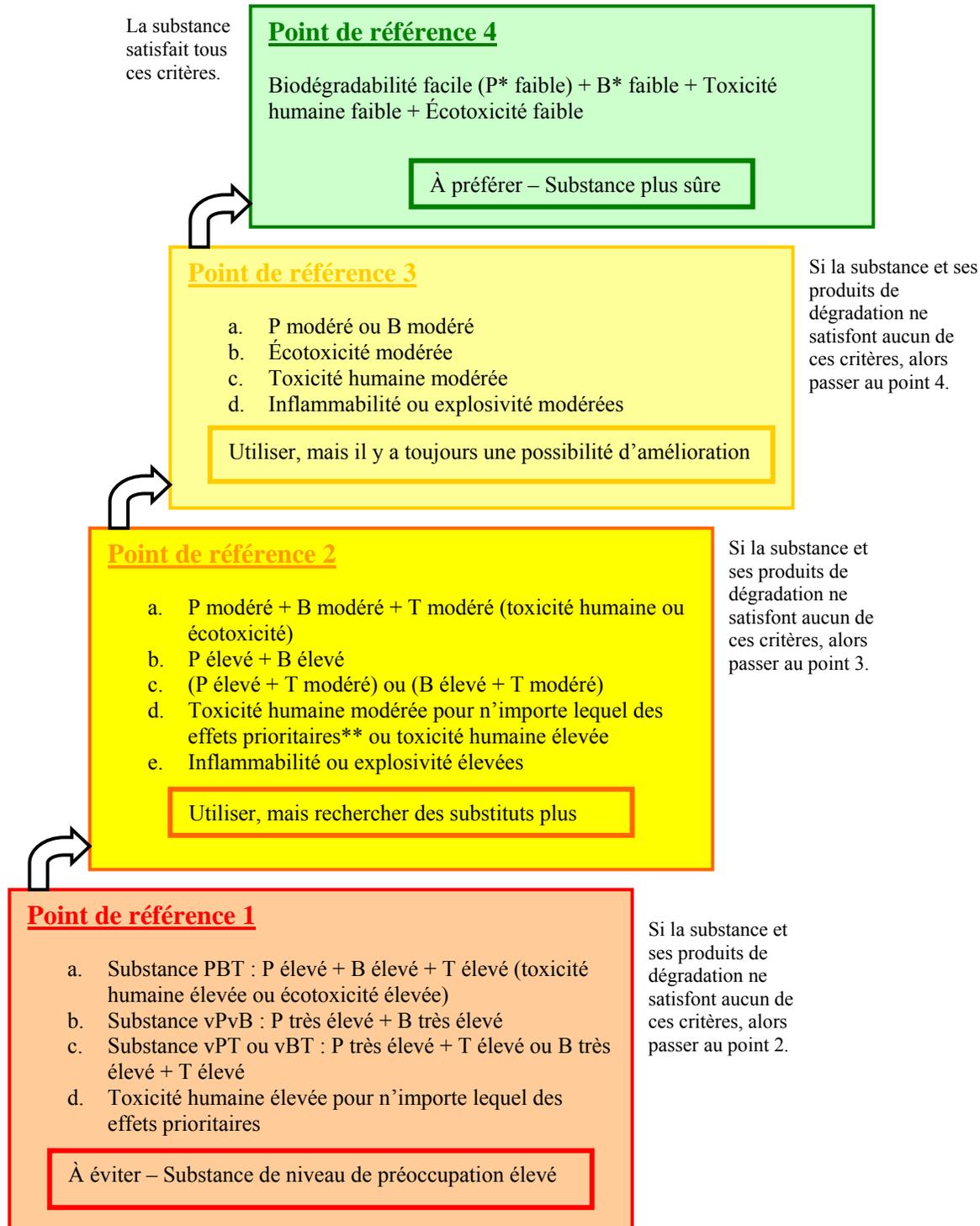
¹⁵⁶ Base de données du Ministère japonais de l'environnement sur les perturbateurs endocriniens. Voir : <http://www.env.go.jp/en/chemi/ed/speed98/sp98t3.html>

Niveau de préoccupation Nature du danger	Très élevé	Élevé	Modéré	Faible
Toxicité aiguë (orale, cutanée, inhalation)		DL ₅₀ < 50 mg/kg PC (oral) DL ₅₀ < 200 mg/kg PC (cutané) CL ₅₀ < 500 ppm (gaz) CL ₅₀ < 2 mg/l (vapeur) CL ₅₀ < 0,5 mg/l (poussière ou brouillard) Liste du U.S. EPA des substances extrêmement dangereuses ¹⁵⁷ , ou SGH catégorie 1 ou 2	DL ₅₀ : 50-200 mg/kg PC (oral) DL ₅₀ : 200-2000 mg/kg PC (cutané) CL ₅₀ : 500-5000 ppm (gaz) CL ₅₀ : 2-20 mg/l (vapeur) CL ₅₀ : 0,5-5 mg/l (poussières ou brouillard) SGH catégorie 3 ou 4	Aucune base de préoccupation identifiée
Corrosion / Irritation de la peau ou des yeux		Éléments de preuves d'effets irréversibles lors d'études chez l'humain Poids de la preuve démontrant des effets irréversibles lors d'études animales, ou SGH catégorie 1 (peau ou yeux)	Éléments de preuve d'effets réversibles lors d'études chez l'humain ou l'animal; SGH catégorie 2 ou 3 (irritation de la peau); ou SGH catégorie 2A ou 2B (yeux)	Aucune base de préoccupation identifiée
Sensibilisation de la peau ou du système respiratoire		Éléments de preuves d'effets nocifs chez l'humain; Poids de la preuve démontrant un potentiel d'effets nocifs chez l'humain SGH catégorie 1 (peau ou système respiratoire) ou Réponses positives lors du test prédictif « Human Repeat Insult Patch Test » (peau) (10)	Études animales suggérant une sensibilisation cutanée ou respiratoire Données analogues Classe chimique connue pour causer de la toxicité	Aucune base de préoccupation identifiée
Effets sur le système immunitaire		Éléments de preuves d'effets	Études animales suggérant	Aucune base de préoccupation

¹⁵⁷ Extremely Hazardous Substance (EHS). La liste des substances classées EHS aux États-Unis en vertu de la section 302 du « Emergency Planning and Community Right-to-Know Act » est disponible à l'adresse suivante : <http://ecfr.gpoaccess.gov/cgi/t/text/text-idx?c=ecfr&sid=5fc8e8e3aaf2d0c06a2e4422bd279c23&rgn=div5&view=text&node=40%3A27.0.1.1.11&idno=40>

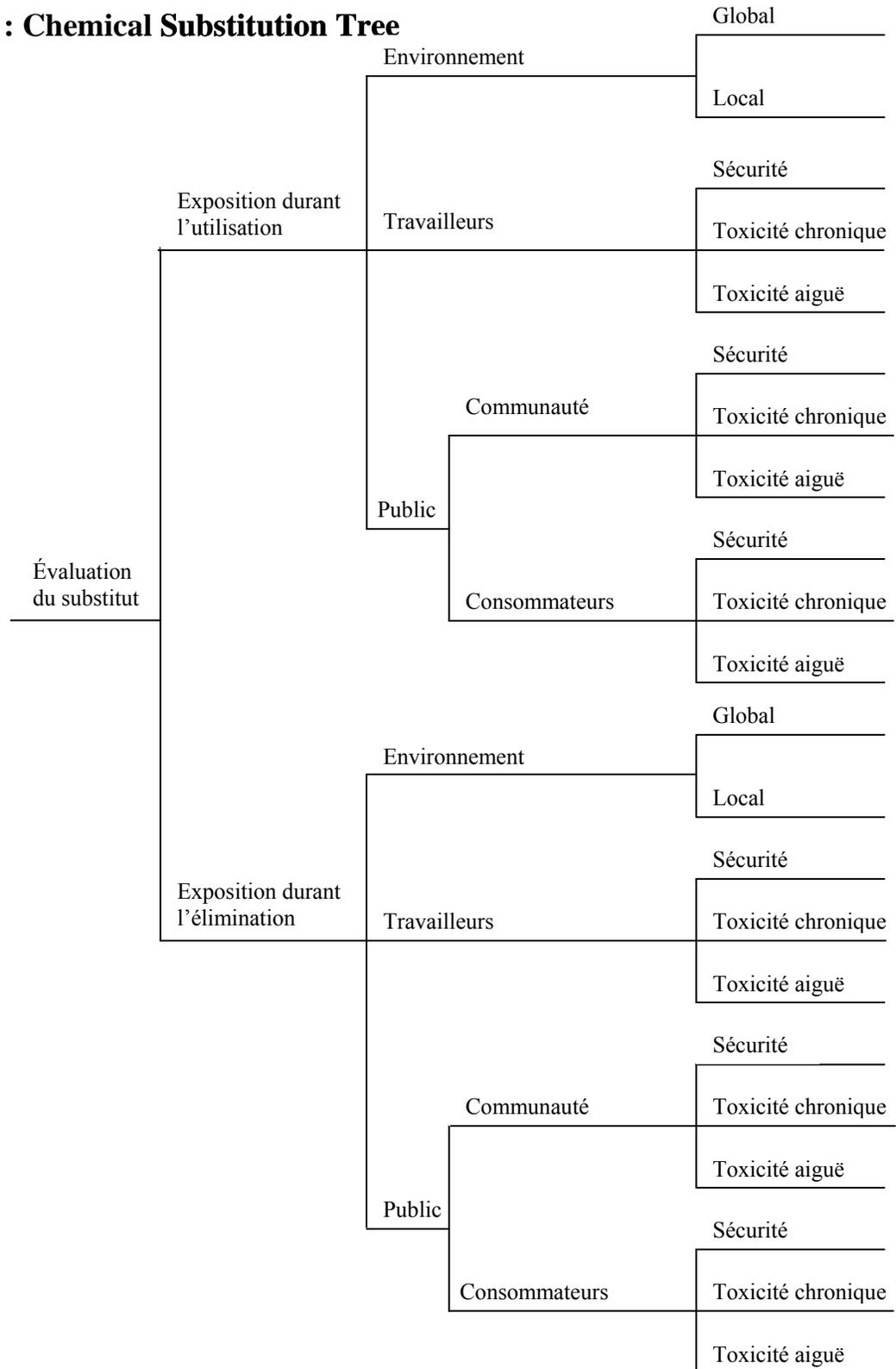
Niveau de préoccupation Nature du danger	Très élevé	Élevé	Modéré	Faible
		nocifs chez l'humain; ou Poids de la preuve démontrant un potentiel d'effets nocifs chez l'humain	de l'immunotoxicité Données analogues Classe chimique connue pour causer de la toxicité	identifiée
Toxicité systémique / Effets sur les organes (via une exposition unique ou expositions répétées)		Éléments de preuves d'effets nocifs chez l'humain; ou Poids de la preuve démontrant un potentiel d'effets nocifs chez l'humain SGH catégorie 1 (organes / toxicité systémique suivant une ou plusieurs expositions)	Études animales suggérant de la toxicité systémique Données analogues Classe chimique connue pour causer de la toxicité, SGH catégorie 2 ou 3 (exposition unique); ou Catégorie 2 (expositions répétées)	Aucune base de préoccupation identifiée
Propriétés physicochimiques				
Explosivité		SGH catégorie : explosifs instables ou Divisions 1.1, 1.2, 1.3	SGH catégorie : Divisions 1.4 ou 1.5	Aucune base de préoccupation identifiée
Inflammabilité		SGH catégorie 1 (gaz inflammables) SGH catégorie 1 (aérosols inflammables) ou SGH catégorie 1 ou 2 (Liquides inflammables)	SGH catégorie 2 (gaz inflammables) SGH catégorie 2 (aérosols inflammables) ou SGH catégorie 3 ou 4 (Liquides inflammables)	Aucune base de préoccupation identifiée

Figure 1: Schéma de comparaison des substances avec les points de référence dans Green Screen (88)



* P : Persistance, B : Bioaccumulation

** Effets prioritaires : cancérogénicité, mutagénicité, reprotoxicité ou toxicité sur le développement, perturbation endocrinienne, neurotoxicité.

Annexe 7 : Chemical Substitution Tree

Source : Gray et Hartwell (52)

Annexe 8 : Matrice d'évaluation à 5 niveaux

Tableau XIV : Détermination du niveau de danger selon les propriétés PBT - Première étape

Dangerosité Niveau de dangerosité	Classe ¹⁵⁸ de contaminant pour l'eau	Persistance et bioaccumulation		Toxicité ¹⁵⁹ aquatique (mg/l)	Toxicité chronique pour l'humain et les animaux (24)
		Persistance (Tests de biodégradation de l'OCDE 301 et 302)	Bioaccumulation $\log K_{oc}$ ¹⁶⁰ ou FBC ¹⁶¹		
Très élevé E	3	Pas facilement ou pas intrinsèquement dégradables selon les tests de l'OCDE	$\log K_{oc} > 4$ et FBC > 500	$CL_{50} \leq 1$	R45, R46, R60, R61
Élevé D	3				$CL_{50} \leq 10$
Moyen C	2				
Faible B	1			$CL_{50} \leq 100$	
Très faible A					

Dans le cas où la FDS de la substance ne contiendrait pas toute l'information nécessaire c'est-à-dire s'il y est seulement indiqué que la substance se dégrade lentement ou qu'elle a une tendance à la bioaccumulation, des données supplémentaires devraient être collectées dans une seconde étape. Le tableau XVI montre les critères d'évaluation utilisés dans cette seconde étape (4).

¹⁵⁸ Classification allemande pour les contaminants de l'eau, WGK1 : faible danger pour les eaux, WGK2 : danger pour les eaux, WGK3 : Danger sévère pour les eaux. Il faut cependant noter que ce classement reflète plus les risques qui seraient liés à un déversement accidentel de contaminants que ceux liés à des émissions quotidiennes sous des conditions normales d'utilisation. Voir : <http://www.umweltbundesamt.de/wgs-e/index.htm>

¹⁵⁹ Il s'agit des résultats de tests effectués chez les poissons, les daphnies ou les algues.

¹⁶⁰ $\log K_{oc}$ est le logarithme décimal du coefficient de partage entre l'octanol et l'eau.

¹⁶¹ Facteur de bioconcentration

Tableau XV : Détermination du niveau de danger selon les propriétés PBT - Seconde étape

Dangérosité Niveau de dangérosité	Persistance et bioaccumulation		Toxicité	
	Persistance ¹⁶²	Bioaccumulation	Toxicité aquatique ¹⁵⁹ (mg/l)	Toxicité chronique chez l'humain ou les animaux (24)
Très élevé E	et		ou	
	Pas facilement ou pas intrinsèquement dégradable, sauf si $DT_{50}^{163} < 60$ jours	$\log K_{oc}^{160} > 4,5$ Si $FBC^{161} > 5000$	Pas pertinent pour les substances très persistantes et très bioaccumulables.	
	Pas facilement ou pas intrinsèquement dégradable, sauf si $DT_{50} < 40$ (eau douce) ou 60 jours (eau de mer)	$\log K_{oc} > 4,5$ Si $FBC > 2000$	$CL_{50} \leq 0,1$ (R50)	R45, R46, R60, R61
Élevé D	et/ou		ou	
	Pas facilement ou pas intrinsèquement dégradable, sauf si $DT_{50} < 40$ (eau douce) ou 60 jours (eau de mer)	$\log K_{oc} > 4$ Si $FBC > 2000$	$CL_{50} \leq 0,1$ (R50)	R45, R46, R60, R61
	Pas facilement ou pas intrinsèquement dégradable, sauf si $DT_{50} < 40$ (eau douce) ou 60 jours (eau de mer)	$\log K_{oc} > 4$ Si $FBC > 500$	$CL_{50} \leq 1$ (R50)	R40, R68, R62, R63, R64, R48
Moyen C	Pas facilement mais intrinsèquement dégradable	$\log K_{oc} \geq 3$ Si $FBC > 100$	$CL_{50} \leq 10$	
Faible B	Facilement dégradable	$\log K_{oc} < 3$	$CL_{50} \leq 100$	
Très faible A			$CL_{50} > 100$	

Il faut noter que le tableau XVI ne représente pas tous les cas imaginables. Il est possible que toutes les propriétés toxiques ne soient pas, pour une substance donnée, au même niveau de dangérosité pour les trois facteurs de risques (PBT). Le niveau de danger le plus élevé est assigné uniquement pour une substance qui serait persistante et bioaccumulable. Dans le cas où il y aurait des données manquantes (p. ex. ni le $\log K_{oc}$ ni la toxicité aquatique ne sont disponibles), la substance devra être classée au niveau le plus élevé jusqu'à ce que l'information soit rapportée par le fournisseur (4).

¹⁶² La persistance est évaluée à partir des tests standards de biodégradabilité de l'OCDE : le test 301 sur la biodégradabilité facile, le test 302 sur la biodégradabilité inhérente et le test 308 qui détermine la demi-vie de dégradation.

¹⁶³ La DT_{50} (Dissipation Time 50) ou durée de vie est le temps nécessaire pour dégrader 50 % de la substance chimique.

Tableau XVI : Détermination du niveau de danger selon la mobilité intrinsèque

Exposition potentielle	Solubilité dans l'eau ¹⁶⁴	Pression de vapeur ¹⁶⁵ ou pulvérulence	Adhérence à la matrice Migration dans les tests standard
Très élevée E	> 100 mg/l	Substances pulvérulentes ou aérosols 1 – 10 ⁴ Pa	N'est pas lié à la matrice
Élevée D	10 – 100 mg/l	10 ⁻³ – 1 Pa	Mobilité élevée dans la matrice
Moyenne C	0,1 – 10 mg/l	10 ⁻³ – 10 ⁻⁶ Pa	Mobilité moyenne dans la matrice
Faible B	1 – 100 µg/l	< 10 ⁻⁶ Pa	Difficilement mobile dans la matrice
Très faible A	< 1 µg/l	Substances non pulvérulentes, non-aérosols < 10 ⁻⁸ Pa	Liaison chimique réelle avec la matrice

Tableau XVII : Détermination du potentiel d'exposition selon la quantité utilisée

Potentiel d'exposition	Quantité annuelle (en t*) pour une substance destinée à l'usage commercial général ou à l'usage privé par les ménages	Quantité annuelle (en t*) pour une substance utilisée dans des procédés et installations industriels maîtrisés
Très élevé E	> 10	> 50
Élevé D	> 1	> 5
Moyen C	> 0,1	> 0,5
Faible B	> 0,01	> 0,05
Très faible A	< 0,01	< 0,05

* t : tonne métrique

¹⁶⁴ Solubilité aqueuse à 20°C. L'échelle a été développée en utilisant les évaluations de risque de l'UE pour différents additifs pour le plastique.

¹⁶⁵ Pression de vapeur mesurée en pascal à 20/25°C. L'échelle a également été développée en utilisant les évaluations de risque de l'UE pour différents additifs pour le plastique. Les classes de pression de vapeur définies dans le tableau XVII se rapportent aux risques potentiels pour les écosystèmes aqueux en raison des émissions dans l'air.

Tableau XVIII : Détermination du niveau de risque selon les conditions d'utilisation

Potentiel de décharge	Conditions d'utilisation dans des installations appropriées	Conditions d'utilisation en dehors d'installations	Conditions d'utilisation des articles finis
Très élevé E	Procédés aqueux et déversement sans traitement des eaux usées	Produits destinés à une utilisation ouverte dans l'environnement (p. ex. lubrifiants pour scie mécanique)	Usage répandu par le public pour des applications extérieures (p. ex. recouvrements pour toits)
Élevé D	Procédés aqueux et système d'évacuation vers un traitement biologique des eaux usées	Utilisation ouverte dans l'environnement; les substances sont plus ou moins liées à la matrice (p. ex. peinture murale), Produits utilisés à l'extérieur Procédés aqueux et système d'évacuation vers un traitement biologique des eaux usées	Articles nettoyés régulièrement à l'eau (p. ex. textiles)
Moyen C	Procédés sans eau à des températures élevées, Procédés ouverts ou semi-ouverts, Déversement via un traitement spécial selon la meilleure technique disponible	Utilisation ouverte dans l'environnement; les substances sont plus ou moins liées à la matrice (p. ex. peinture murale), Produits utilisés à l'intérieur Équipements mobiles, confinés Élimination des déchets maîtrisés selon la meilleure technique disponible	Usage par le public pour des applications à l'extérieur (p. ex. cadres de fenêtres)
Faible B	Procédés sans eau à des températures normales	Équipements mobiles, confinés Pas d'élimination des résidus dans le réseau municipal ou dans d'autres réseaux généraux d'évacuation	Peu ou pas de pertes dans l'environnement durant l'utilisation
Très faible A	Confinement rigoureux, aucun déversement des résidus dans le réseau municipal ou dans d'autres réseaux généraux d'évacuation		Peu ou pas de pertes dans l'environnement durant l'utilisation, faible diffusion (p. ex. accumulateurs pour l'industrie)

Annexe 9 : Bases de données physicochimiques et toxicologiques

L'évaluation des substituts potentiels par les outils décrits au chapitre 3.2 ne peut se faire sans la connaissance des propriétés inhérentes aux produits chimiques. Les banques de données présentées ci-dessous permettent généralement de trouver l'information nécessaire concernant notamment les propriétés physicochimiques, les données toxicologiques et environnementales et les valeurs limites d'exposition professionnelle réglementaires ou recommandées.

a. HSDB

Le Hazardous Substances Data Bank (HSDB) est une banque de données créée et mise à jour par la U.S. National Library of Medicine et disponible sur Toxnet¹⁶⁶ (123). Elle est axée sur la toxicologie des produits chimiques dangereux et permet de trouver de l'information pour près de 5000 substances selon les catégories suivantes :

- Les toxicologies humaine et animale (effets chroniques et aigus sur la santé humaine, études de toxicité chez l'animal, traitements médicaux d'urgence, données sur le métabolisme et la pharmacocinétique des substances, données de pharmacologie).
- Le devenir environnemental (biodégradation, bioconcentration) et les voies d'exposition.
- La réglementation au niveau environnemental notamment la dose journalière acceptable et les normes atmosphériques valables aux États-Unis.
- Les propriétés physiques et chimiques.
- La sécurité chimique (inflammabilité, réactivité, limites d'explosivité, entreposage, etc.)
- Les valeurs limites d'exposition professionnelle (ACGIH, OSHA).
- Les données sur la fabrication et l'utilisation des produits chimiques.

L'utilisateur peut faire une recherche par nom de substance chimique ou par numéro CAS. Les données fournies par HSDB proviennent de livres, de documents gouvernementaux, de rapports techniques et de journaux scientifiques et sont soumises à une revue par un comité formé d'experts dans les principaux domaines abordés.

b. Gestis

Gestis¹⁶⁷ est un système d'information sur les substances dangereuses mis en ligne par le BGIA. Gestis donne accès à huit bases de données sur les produits chimiques parmi lesquelles les suivantes :

¹⁶⁶ Toxicology Data Network. HSDB est accessible gratuitement à l'adresse URL suivante : <http://toxnet.nlm.nih.gov>

¹⁶⁷ Voir : <http://www.hvbg.de/e/bia/gestis/stoffdb/index.html>

- Une base de données sur les substances dangereuses (Gestis-database on hazardous substances) qui regroupe de l'information concernant les propriétés physiques et chimiques de près de 8000 substances, leurs effets toxiques, leurs utilisations et leur manipulation sécuritaires ainsi que les données sur la réglementation européenne et allemande (classification, étiquetage).
- Une base de données (Gestis International Limit Values for Chemical Agents) qui regroupe les valeurs limites d'exposition professionnelle provenant de différents pays de l'UE, des États-Unis (OSHA), du Canada et du Japon pour plus de 1000 produits chimiques.
- Gestis-Dust-Ex qui contient des caractéristiques de combustion et d'explosivité de plus de 4000 poussières. Ces caractéristiques sont entre autres la taille des particules, l'énergie minimale d'inflammation et l'explosivité exprimée par la constante K_{st}^{168} , la valeur P_{max}^{169} et la limite inférieure d'explosivité (LIE¹⁷⁰) (11). Les données fournies par Gestis-Dust-Ex peuvent donc être utilisées pour la comparaison des substances solides.

c. eChemPortal

L'OCDE en partenariat avec l'UE et d'autres pays et organismes a lancé en 2007 eChemPortal¹⁷¹, un portail donnant accès gratuitement à de l'information concernant les propriétés physicochimiques des produits chimiques, leur devenir environnemental, leur toxicité pour l'humain et leur écotoxicité de même qu'à l'évaluation des risques qui leur sont attribués. La recherche d'informations se fait de façon simultanée sur plusieurs bases de données faisant partie du portail en utilisant le numéro CAS ou le nom de la substance. Les bases de données incluses sont les suivantes :

- European Chemical Substances Information System (ESIS), un système fournissant de l'information sur les produits et préparations chimiques classés et étiquetés selon la réglementation européenne ou ceux concernés par la Directive européenne sur les produits biocides. ESIS donne également accès aux données contenues dans l'Inventaire européen des produits chimiques commercialisés (EINECS¹⁷²), la Liste européenne des substances chimiques notifiées (ELINCS¹⁷³) ou encore la liste des substances à haut volume de production

¹⁶⁸ K_{st} définit la vitesse maximale de montée en pression mesurée au cours de l'explosion d'une ATEX (atmosphère explosive) du produit considéré dans un récipient sphérique de 1 m³ pour un domaine de concentration qui couvre la totalité du domaine d'explosivité.

¹⁶⁹ P_{max} est la pression maximale développée par l'explosion d'une ATEX en récipient fermé et donc la valeur de la pression à laquelle doit résister ce récipient pour ne pas subir de dommages au cours de l'évènement.

¹⁷⁰ C'est la limite inférieure de la fourchette de concentration de poussière dans l'air à laquelle le mélange poussière-air peut exploser (11).

¹⁷¹ Voir : <http://webnet3.oecd.org/echemportal/Home.aspx>

¹⁷² European Inventory of Existing Commercial Substances

¹⁷³ European List of Notified Chemical Substances

(HPVCs¹⁷⁴) et celle des substances à bas volume de production (LPVCs¹⁷⁵) de l'UE.

- Chemical Safety Information from Intergovernmental Organizations (INCHEM) qui fournit de l'information provenant d'organisations intergouvernementales telles que les évaluations du CIRC ou les Fiches internationales de sécurité chimique.
- Information on Biodegradation and Bioconcentration of the Existing Chemical Substances in the Chemical Risk Information Platform (CHRIP), une base de données de l'Institut national de technologie et d'évaluation du Japon qui contient des résultats de tests de biodégradation et de bioconcentration.
- High Production Volume Information System (HPVIS), la base de données du U.S. EPA qui fournit des données sur les effets chez l'humain et sur l'environnement des substances fabriquées en grande quantité aux États-Unis.
- Australian National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme (NICNAS) – Priority Existing Chemicals qui donne notamment accès à des rapports d'évaluation des risques pour le travailleur, le public ou l'environnement.
- Screening Information Data Sets (SIDS) qui contient des rapports d'étude de l'OCDE concernant des substances à haut volume de production.

¹⁷⁴ High Production Volume Chemicals

¹⁷⁵ Low Production Volume Chemicals

Annexe 10 : Modèles QSAR

Cette annexe présente deux logiciels gratuits permettant d'estimer certains paramètres physicochimiques et toxicologiques des substances chimiques.

a. EPI Suite

EPI Suite contient une série de modèles d'estimation des propriétés physicochimiques et du devenir environnemental des substances chimiques. En l'absence de données expérimentales, les paramètres estimés par EPI Suite pourraient être utilisés lors de l'évaluation de substances avec les méthodes de comparaison précédemment décrites. EPI Suite contient 14 modèles autonomes pouvant être utilisés de façon indépendante de l'interface globale (110). Ces modèles sont les suivants :

- KOWWIN pour l'estimation du logarithme du coefficient de partage octanol-eau ($\log K_{oe}$) à partir de la structure moléculaire de la substance.
- BCFWIN qui calcule le facteur de bioconcentration à partir du $\log K_{oe}$.
- BIOHCWIN qui estime la demi-vie de biodégradation des hydrocarbures pétroliers.
- AOPWIN pour l'estimation du taux d'oxydation atmosphérique des produits chimiques organiques c'est-à-dire leur demi-vie dans l'air.
- BIOWIN qui estime la probabilité d'une rapide biodégradation aérobie d'un produit chimique organique en présence de microorganismes environnementaux.
- ECOSAR (Ecological Structure Activity Relationships) qui permet d'estimer la toxicité (CL_{50}) des produits chimiques chez les organismes aquatiques tels que les poissons, les algues en se basant sur des relations quantitatives structure-activité.
- HENRYWIN qui permet d'obtenir deux estimations de la constante de la loi d'Henry. La première se base sur la contribution des liaisons chimiques et la seconde sur celle des groupements chimiques qui forment la molécule.
- HYDROWIN qui estime le taux d'hydrolyse aqueux pour les esters, les carbamates, les époxydes, les halométhane et quelques halogénures d'alkyle.
- KOAWIN qui permet d'obtenir le coefficient de partage octanol-air.
- MPBWIN qui estime les points de fusion, d'ébullition et la pression de vapeur des produits chimiques organiques.
- PCKOCWIN qui estime le coefficient d'adsorption dans le sol des produits chimiques organiques.
- WSKOWWIN qui estime la solubilité aqueuse à partir du coefficient de partage octanol-eau.
- WATERNT qui estime également la solubilité aqueuse à 25°C mais à partir de la structure moléculaire de la substance.
- DERMWIN qui estime le coefficient de perméabilité cutanée et la dose absorbée par voie cutanée à partir de la durée du contact, de la concentration et du $\log K_{oe}$.

En plus des modèles autonomes précédents, EPI Suite permet d'estimer d'autres paramètres tels que le taux de volatilisation à partir de l'eau ou l'adsorption sur les particules atmosphériques.

L'utilisation d'EPI Suite se fait en entrant un numéro CAS ou un nom de substance parmi ceux inclus dans la base de données ou en utilisant la notation SMILES¹⁷⁶ dans le cas de substances qui ne sont pas comprises dans la base de données. SMILES est un système de représentation simplifiée des substances chimiques en utilisant une série linéaire de symboles.

Le logiciel EPI Suite peut être téléchargé à partir du site Web du U.S. EPA¹⁷⁷.

b. PBT Profiler

PBT Profiler permet de prédire la persistance (P), la bioaccumulation (B) et la toxicité chronique pour le poisson (T) des substances pour lesquelles il n'y a pas de données expérimentales. Il contient une base de données de près de 100 000 composés chimiques. L'estimation des paramètres se fait en entrant soit le numéro CAS d'une substance soit sa notation SMILES. S'il s'agit de substances non incluses dans la base de données; l'utilisateur a la possibilité de dessiner leur structure chimique (100).

Évaluation de la persistance

La persistance dans chaque compartiment environnemental est évaluée à partir des demi-vies des substances chimiques dans l'air, l'eau, le sol et les sédiments. De plus, la persistance globale dans l'environnement est calculée en utilisant un modèle de dispersion multimédia de niveau III¹⁷⁸.

Évaluation de la bioaccumulation

La bioaccumulation est estimée à partir du facteur de bioconcentration lui-même calculé à l'aide du logiciel BCFWIN (voir Annexe 10.a EPI Suite).

Évaluation de la toxicité

La toxicité chronique pour le poisson est estimée à l'aide du programme ECOSAR (voir Annexe 10.a EPI Suite).

Les résultats fournis par le PBT Profiler sont de trois ordres: 1) des valeurs chiffrées pour les paramètres P, B et T qui sont comparées aux seuils publiés par le U.S. EPA, 2) une classification selon un code de couleurs de ces valeurs (orange si la valeur dépasse le seuil, rouge si elle le dépasse de façon importante et verte si elle ne le dépasse pas) et 3)

¹⁷⁶ Simplified Molecular Input Line Entry System. Les notations SMILES peuvent être trouvées sur PubChem Substance à l'adresse URL suivante : <http://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>

¹⁷⁷ Voir: <http://www.epa.gov/oppt/exposure/pubs/episuite.htm>

¹⁷⁸ Il s'agit de modèles de fugacité (grandeur thermodynamique homogène à une pression et représentant la tendance d'une substance à s'échapper à partir d'un compartiment donné) qui se déclinent en quatre niveaux de complexité successifs. Au niveau 3, on considère il n'y a plus d'équilibre entre les compartiments (15).

de l'information additionnelle sur les résultats obtenus notamment concernant les moyens de prévention de la pollution. De plus, la page Web du PBT Profiler donne accès aux résultats de l'évaluation de 64 substances organiques classées PBT par le U.S. EPA et 12 POP du PNUE.

Il faut cependant remarquer que le PBT Profiler ne peut être utilisé pour évaluer certaines catégories de substances chimiques. Il s'agit des substances inorganiques incluant les composés organométalliques, les substances réactives qui pourraient avoir une demi-vie dans l'environnement inférieure à 60 jours (p. ex. les peroxydes ou les composés qui s'hydrolysent rapidement), les sels organiques de sodium, de potassium ou d'ammonium, les substances ayant un poids moléculaire élevé, les mélanges, les agents tensioactifs et les composés hautement fluorés (100).