

NOTE TECHNIQUE ET SCIENTIFIQUE

Étude de cas de substitution de solvant pour le nettoyage de disjoncteurs haute tension

Par Maximilien Debia, Denis Bégin et Michel Gérin¹

Résumé

Cet article présente une étude de substitution d'un solvant utilisé pour le nettoyage de graisse de silicone lors de la maintenance de disjoncteurs haute tension. Une méthodologie systématique de substitution en neuf étapes a été appliquée. Un comité de substitution a été mis en place. Le solvant Securo (mélange de trichloroéthylène, perchloroéthylène et hydrocarbures saturés) a été identifié comme la source de problèmes d'irritation des muqueuses relevés chez plusieurs travailleurs. Des mesurages ont mis en évidence un potentiel de surexposition. Par ailleurs, le trichloroéthylène et le perchloroéthylène sont classés comme cancérigènes. Des recherches documentaires et auprès de fournisseurs ont permis d'identifier sept substituts potentiels : OS-20 (octaméthyltrisiloxane), lactate d'éthyle, Varsol® 3139, Skysol (mélange d'hydrocarbures saturés et de MMB (3-méthoxy-3-méthyl-1-butanol)), Voltz Red (mélange d'hydrocarbures saturés et de d-limonène), Ultrasolv 221 (hydrocarbures saturés) et Teksol (mélange d'hydrocarbures saturés et de lactate de n-butyle). Des tests à petite échelle ont permis d'écarter quatre solvants sur la base d'évaporation trop lente ou de leur odeur. Les trois solvants Varsol® 3139, Skysol et OS-20 ont été sélectionnés pour une évaluation plus approfondie des aspects santé, sécurité et environnement. La recommandation finale a porté sur l'OS-20. Cette option n'a pas été retenue par l'entreprise pour des raisons économiques. Le solvant Skysol a été préféré. L'utilisation du rapport de danger de vapeur (« Vapour Hazard Ratio » (VHR)) a facilité la comparaison des options de substitution, bien qu'elle se heurte à l'absence de valeur limite d'exposition pour certaines substances comme le MMB.

Mots clés : substitution, solvant, disjoncteurs, dégraissage, rapport de danger de vapeur

Abstract

Case study of solvent substitution in the cleaning of high voltage circuit breakers

This article presents a study of substitution of a solvent used for the cleaning of silicone grease when performing maintenance tasks on high voltage circuit breakers. A nine steps systematic methodology of substitution was applied. A substitution committee was set up. The Securo solvent (mixture of trichloroethylene, perchloroethylene and saturated hydrocarbons) was identified as the source of problems of mucous membrane irritation experienced by several workers. Exposure monitoring revealed a potential of overexposure. In addition, trichloroethylene and perchloroethylene are classified as carcinogens. A literature search and information from suppliers made it possible to identify seven potential substitutes: OS-20 (octamethyltrisiloxane), ethyl lactate, Varsol® 3139, Skysol (mixture of saturated hydrocarbons and MMB (3-methoxy-3-methyl-1-butanol)), Voltz Red (mixture of saturated hydrocarbons and d-limonene), Ultrasolv 221 (saturated hydrocarbons) and Teksol (mixture of saturated hydrocarbons and n-butyl lactate). Small scale tests discarded four solvents on the basis of slow evaporation or objectionable odour. Three solvents, Varsol® 3139, Skysol and OS-20 were selected for a thorough evaluation based on considerations of health, safety and environment. The final recommendation was the OS-20 solvent. For cost considerations, the company did not select the latter but chose Skysol. The use of the Vapour Hazard Ratio (VHR) made the comparison of the replacement options easier, although it was limited by the absence of occupational exposure limits for certain substances like MMB.

Keywords : substitution, solvent, circuit-breakers, degreasing, vapour hazard ratio.

INTRODUCTION

Le 1,1,2-trichloroéthène, communément appelé trichloroéthylène (TCE) et le 1,1,2,2-tétrachloroéthène, communément appelé perchloroéthylène (PERC) sont des solvants organiques halogénés traditionnellement employés comme produits de nettoyage et dégraissage dans une grande variété de procédés industriels. Ces solvants présentent l'avantage d'être très efficaces, de s'évaporer rapidement et d'être ininflammables. Bien qu'utilisés en majorité pour le dégraissage à la vapeur, le TCE et le PERC liquides

servent également pour le dégraissage à froid (1). Le TCE et le PERC sont employés dans le dégraissage des métaux (2, 3) et dans le domaine du nettoyage d'équipement électrique (p.ex. modules électriques complexes, circuits imprimés et panneaux électroniques de composantes d'ordinateurs) (4-7). Le solvant à remplacer dans cette étude de cas est un mélange de TCE, de PERC et de coupe pétrolière (8).

D'un point de vue toxicologique, l'exposition aiguë au TCE et au PERC est associée à des effets de dépression du système nerveux central (SNC), d'irritation de la peau, des yeux et des voies respiratoires ainsi qu'à des effets systémiques d'atteintes rénales et hépatiques (9, 10). De plus, le TCE et le PERC sont classés probablement cancérigènes pour l'humain par le Centre international de recherche sur le

cancer (CIRC) (11). Sur le plan environnemental, d'après le Gouvernement du Canada, les concentrations de TCE sont susceptibles de constituer un danger pour la vie ou la santé humaine, alors que les concentrations de PERC peuvent être nocives pour l'environnement (12, 13). Les risques associés à l'utilisation de ces substances doivent être maîtrisés et gérés de façon prioritaire.

En santé au travail, la substitution constitue une méthode de prévention privilégiée car elle permet l'élimination à la source des facteurs de risque avant même d'envisager la possibilité de ventilation, d'isolement, ou de port d'équipements de protection individuelle (14-16). La substitution consiste à éliminer l'utilisation d'une substance dangereuse en la remplaçant par une autre substance,

1. GROUPE DE RECHERCHE INTERDISCIPLINAIRE EN SANTÉ (GRIS), DÉPARTEMENT DE SANTÉ ENVIRONNEMENTALE ET SANTÉ AU TRAVAIL, FACULTÉ DE MÉDECINE, UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL, C.P. 6128 SUCCURSALE CENTRE-VILLE, MONTRÉAL, QUÉBEC H3C 3J7, CANADA.

moins dangereuse, ou par un procédé différent. Diverses recherches ont permis de mettre au point des procédures pour l'implantation de la substitution (17-23).

Cet article présente l'application de la méthodologie proposée par Gérin et Bégin (2002) (18) à un projet de substitution d'un mélange comprenant des solvants chlorés utilisés pour le nettoyage et le dégraissage de disjoncteurs pneumatiques haute tension. L'objectif est double : présenter des pistes de solutions pour ce type de travaux et discuter de l'application de la méthodologie.

MÉTHODOLOGIE

La démarche systématique en neuf étapes a été appliquée au projet de substitution (18).

Les deux premières étapes (identification du problème et formation du comité de substitution) concernent les phases préalables à la réalisation du projet de substitution. Une visite préliminaire de l'atelier a été effectuée afin de rencontrer les différents intervenants et d'apprécier le travail à réaliser. Lors de la 3^e étape, une nouvelle visite du lieu de travail a été réalisée afin de recueillir l'ensemble de l'information nécessaire au projet de substitution. Lors d'une troisième visite, des mesures de vapeurs de solvants ont été effectuées pour établir les niveaux d'exposition des travailleurs et la contribution relative de chacun des solvants. L'exposition a été évaluée pour trois travailleurs en poste personnel (24). À la 4^e étape de la démarche, plusieurs options de rechange ont été proposées pour remplacer le solvant indésirable. Le choix des options provient de sources variées : proposition des fournisseurs, recherches documentaires et bibliographiques, études de cas de substitution des solvants. Pour la 5^e étape, des tests à petite échelle ont été réalisés. Les solvants substitutifs ont été placés dans des vaporisateurs numérotés sans indication sur leur contenu. Il a ensuite été demandé à deux travailleurs, à raison de quatre solvants chacun, d'effectuer la tâche de nettoyage des disjoncteurs et de répondre à des questions concernant l'odeur, la performance et la vitesse d'évaporation des solvants. Une première sélection a alors été effectuée. Afin d'évaluer les conséquences des options de substitution retenues (6^e étape), une recherche de littérature a été effectuée en considérant les dimensions santé, sécurité et environnement. Des soumissions pour les différents solvants ont été demandées auprès de plusieurs fournisseurs de la région de Montréal. Pour effectuer la comparaison des options (7^e étape), un tableau a été conçu avec les éléments de comparaison suivants : apparence, couleur, odeur, performance technique, point d'éclair, classification du CIRC,

effets sur la santé, tension de vapeur, valeur limite d'exposition (VLE), « Vapour Hazard Ratio » (VHR), potentiel de formation d'ozone troposphérique et prix. Le VHR (ou rapport de danger de vapeur) représente la propension d'une substance à dépasser sa VLE. Il peut aussi être défini comme un potentiel de surexposition. Le VHR d'une substance est égal au rapport de sa concentration de vapeur saturante (C_{sat}) et de sa VLE exprimées en ppm (cf. équation 1) (25). Pour les mélanges, le VHR_m se calcule en faisant la somme des VHR des composantes en les pondérant par la fraction molaire correspondante (x_i) (cf. équation 2) (19).

$$VHR = \frac{C_{sat}}{VLE} = \frac{P_{vapeur} \text{ (Pa)}}{101325 \text{ (Pascal)}} \times 10^6 \text{ (ppm)} \quad (1)$$

$$VHR_m = \sum x_i \frac{C_{sat,i}}{VLE_i} \quad (2)$$

Les 8^e et 9^e étapes de la démarche concernant l'implantation et l'évaluation de l'option de substitution sélectionnée ont été complétées par l'entreprise elle-même.

RÉSULTATS

Identification du problème (étape 1)

Une enquête d'hygiène du travail a été initiée en raison de plaintes de certains employés, des problèmes d'irritation des muqueuses et d'assèchement de la peau ayant été rapportés. Le solvant Securo a été identifié comme la source des problèmes d'irritation. L'enquête a alors mené à un projet de substitution afin de maîtriser l'exposition des électriciens d'appareillage aux vapeurs de solvants. Deux solvants étaient utilisés à des fins de nettoyage et de dégraissage lors de la maintenance et de la remise à neuf des disjoncteurs haute tension : le Securo (mélange de TCE, de PERC et d'une coupe pétrolière d'hydrocarbures saturés) et le propan-2-ol communément appelé alcool isopropylique ou isopropanol. Le TCE et le PERC sont des irritants de la peau, des yeux, et des voies respiratoires et sont classés probablement cancérigènes pour l'humain par le CIRC (9-11).

Le comité de substitution (étape 2)

Un comité de substitution a été mis en place avec les personnes suivantes :

- Représentants de l'entreprise (hygiéniste du travail, contremaître)
- Spécialistes universitaires en santé au travail, Université de Montréal
- Travailleurs (électriciens d'appareillage)

Étude du problème et définition des critères de sélection (étape 3)

Description générale du fonctionnement des disjoncteurs

Les disjoncteurs haute tension sont des éléments qui permettent d'interrompre les circuits lors de surtensions afin de protéger le réseau électrique. Lors de ces perturbations, le disjoncteur ouvre le circuit en séparant deux contacts électriques. La séparation physique ne suffit pas pour interrompre le courant car il se crée un arc électrique entre les deux contacts. Le disjoncteur pneumatique doit alors éliminer cet arc en augmentant rapidement la rigidité diélectrique entre les deux contacts en « soufflant » l'arc électrique avec de l'air comprimé (26, 27). La chambre de coupure est la partie du disjoncteur où se produit l'interruption du circuit. C'est une chambre fermée avec des parties conductrices en aluminium et en tungstène et des parties isolantes en porcelaine. Elle contient un contact fixe et un contact mobile et doit supporter de fortes pressions. Les disjoncteurs pneumatiques utilisés possèdent plusieurs chambres reliées par des condensateurs de répartition de la tension.

Programme de maintenance des disjoncteurs

Les disjoncteurs sont des éléments essentiels des réseaux de transport d'énergie électrique. Un fonctionnement optimal est nécessaire et est assuré par un programme de maintenance. Ce dernier comprend les étapes d'entretien suivantes : démontage, nettoyage, dégraissage et remontage.

Origine de la graisse

Le guide d'entretien des disjoncteurs, interne à l'entreprise, spécifie l'utilisation de deux graisses du fabricant Dow Corning, la graisse M111 concernant les surfaces de contacts électriques concernant et celles de l'aluminium n'ayant plus d'anodisation et la graisse 33 pour lubrifier les surfaces de contact dynamique où se produit un frottement. La graisse permet ainsi de minimiser l'usure mécanique et de protéger les surfaces électriques contre la corrosion (28, 29). De la graisse M111 est également appliquée sur tous les joints, excepté ceux qui sont en silicone, afin de les protéger contre l'abrasion et afin de réduire le taux de fuite de l'air comprimé des chambres de coupure.

Les solvants utilisés

Après le démontage, le nettoyage des pièces métalliques du disjoncteur s'effectue à

l'aide de deux solvants : le mélange Securo et l'isopropanol. Le mélange Securo est utilisé pour le dégraissage par aspersion et essuyage au chiffon et au tampon abrasif (ou bien à l'aide d'une ponceuse manuelle si nécessaire). L'opération est suivie d'une seconde aspersion avec de l'isopropanol et d'un essuyage au chiffon afin de ne laisser aucune trace. Le solvant

Securo est un mélange de solvants industriels composé de 15 à 35 % de TCE, 20 à 40 % de PERC et 35 à 60 % de coupe pétrolière (8). Le numéro du Chemical Abstracts Service (C.A.S.) de la coupe pétrolière (64742-48-9) indique qu'il s'agit d'une fraction lourde hydrotraitée C₆-C₁₃ qui s'apparente à l'Isopar K de la compagnie Esso (30). On estime que les travail-

leurs (6 à 10) utilisent au total 200 litres par an de chacun des solvants.

L'exposition des travailleurs

Il existe une certaine concordance entre les effets d'irritation des muqueuses observés chez les travailleurs et les effets de toxicité intrinsèque des substances, particulièrement pour le TCE et le PERC considérés comme des irritants (9, 10). Selon l'utilitaire « Interactions toxicologiques » le TRI, le PERC, le solvant Stoddard et l'isopropanol ont des effets appartenant à la classe d'effets similaires 19 (Atteinte du SNC) (31). Le calcul du ratio du mélange (Rm) est alors justifié afin d'évaluer l'exposition par inhalation relative à ce type d'effet (24). Par ailleurs, ces substances ne sont pas considérées comme ayant un potentiel significatif de pénétration percutanée (32). Les résultats des mesures d'exposition présentés dans le tableau 1 montrent un dépassement des normes pour un des trois travailleurs (Rm = 2). En moyenne, pour les trois travailleurs, les vapeurs d'isopropanol contribuent à moins de 15 % des valeurs de Rm, ce qui confirme l'importance accordée au solvant Securo par rapport à l'isopropanol.

Les exigences de l'entreprise

La pièce nettoyée avec le solvant ne doit pas comporter de résidu. L'élimination de la graisse ne peut pas être envisagée car elle est un élément essentiel du fonctionnement des disjoncteurs. Le solvant substitutif doit minimiser les risques pour les travailleurs et l'environnement.

Proposition d'options de rechange (étape 4)

Sept options de rechange ont été envisagées pour remplacer le solvant Securo (cf. tableau 2). Le Varsol® 3139 a été la première solution envisagée étant donné que ce solvant est utilisé par d'autres ateliers de l'entreprise qui effectuent des tâches similaires. L'OS-20, le Skysol et le lactate d'éthyle ont été proposés par le comité de substitution à partir d'une revue de la littérature. L'OS-20 est un organosiloxane formé essentiellement d'octaméthyltrisiloxane. Les organosiloxanes sont peu toxiques, sont efficaces pour dissoudre les graisses à base de silicone comme celles qui sont utilisées sur les disjoncteurs et ce sont des solvants approuvés par l'Environmental Protection Agency (EPA) des États-Unis en vertu de son programme SNAP (Significant New Alternatives Program)

Tableau 1. Niveaux d'exposition aux solvants de travailleurs nettoyant des disjoncteurs.

Travailleur	Durée de l'échantillonnage (min)	Concentrations mesurées (mg/m ³)				Rm
		Isopropanol	Hydrocarbures saturés	PERC	TCE	
1	60	13	37	77	44	0,3
	39	2 ***	17,5 ***	12	17	
	55	1,5 ***	12,5 ***	7	12	
	EQM (8h) *	6	23	31	23	
2	35	290	44	95	72	2
	45	530	110	260	200	
	44	330	42	140	120	
	EQM (8h) *	391	67	170	135	
3	83	38	8,5 ***	24	17	0,2
	32	190	21,5 ***	5,5 ***	4,5 ***	
	EQM (8h) *	70	12	19	13	
	VLE (RSST)	983	1200 **	170	269	

* EQM : exposition quotidienne moyenne, la durée d'échantillonnage est considérée comme représentative du quart de travail de 8h

** VLE proposée par Esso pour l'Isopar K de numéro C.A.S. 64742-48-9

*** Concentrations estimées à la moitié des limites de détection selon la méthode de Hornung et Reed (49).

Abréviations :
Rm : Ratio du mélange
RSST : Règlement sur la santé et la sécurité du travail (42)

Tableau 2. Description des options de rechange proposées lors de l'étape 4.

Nom commercial	vendeur	Ingrédients (C.A.S.)	Concentration (% en poids)	VLE du RSST (mg/m ³)	Point d'éclair (°C)	SIMDUT
Securo	Kara	Trichloroéthylène (79-01-6)	15-35	269	47	B3, D1B, D2A et D2B
		Hydrocarbures saturés (64742-48-9)	35-60	1200*		
		Perchloroéthylène (127-18-4)	20-40	170		
OS-20	Dow Corning	Octaméthyltrisiloxane (107-51-7)	>60	200 (ppm) ***	34	B2, D2A et D2B
		Octaméthylcyclotétrasiloxane (556-67-2)	0,1-1,0	10 (ppm) ***		
Skysol	Magnus	Hydrocarbures saturés (64742-48-9)	60-100	1200*	43	B3, D2B
		3-méthoxy-3-méthyl-1-butanol (56539-66-3)	10-30	-		
Varsol 3139	Esso	Solvant Stoddard (8052-41-3)	100	525	43	B3, D2B
Lactate d'éthyle	Spectrum Chemical MFG	Lactate d'éthyle (97-64-3)	>98	25 ****	46	B3
Teksol	Magnus	Hydrocarbures saturés (64742-48-9)	60-100	1200*	64	B3
		Lactate de n-butyle (138-22-7)	5-10	30		
Ultra-solv 221	National Chemsearch	Hydrocarbures saturés (64742-47-8)	60-100	1200**	105	D2B
Voltz Red	National Chemsearch	Hydrocarbures saturés (64742-47-8) d-limonène (5989-27-5)	60-100 10-30	1200** 150 ****	61	B3, D2B

* VLE proposée par Esso pour l'Isopar K de numéro C.A.S. 64742-48-9

** VLE proposée par Esso pour l'Exsol D110 de numéro C.A.S. 64742-47-8

*** VLE proposées par Dow Corning

**** VLE de la Suède (50)

Abréviations :

C.A.S. : Chemical Abstracts Service, American Chemical Society (Columbus, OH)

VLE : Valeurs limites d'exposition

RSST : Règlement sur la santé et la sécurité du travail

SIMDUT : Système d'information sur les matières dangereuses utilisées au travail

B2 : Liquides inflammables

B3 : Liquides combustibles

D2A : Matières très toxiques ayant d'autres effets

D2B : Matières toxiques ayant d'autres effets

D1B : Matières toxiques ayant des effets immédiats et graves

comme substitut des substances appauvrissant la couche d'ozone (SACO) dans le nettoyage métallique (33). Le lactate d'éthyle est un « nouveau » solvant fabriqué à partir de la fermentation de glucides, approuvé comme additif alimentaire par la Food and Drug Administration (FDA) des États-Unis et proposé comme dégraissant de pièces métalliques (34). Le Skysol est un mélange de coupe pétrolière hydrotraitée et de 3-méthoxy-3-méthyl-1-butanol (MMB) utilisé comme solvant de substitution par des sociétés telles que Rolls-Royce (Canada) Ltée dans le nettoyage de surface métallique (35). Les solvants Voltz Red et Ultrasolv 221 ont été proposés par un fournisseur local de solvants. Ces deux solvants sont majoritairement constitués de coupe pétrolière hydrotraitée. Le Voltz Red contient en outre 10 à 30 % de d-limonène. Tout comme les organosiloxanes, le d-limonène est approuvé par l'EPA en vertu de son programme SNAP. De plus, plusieurs projets de substitution ont permis de remplacer avec succès des solvants chlorés traditionnels par des solvants contenant du d-limonène (36).

Essais à petite échelle (étape 5)

Les résultats des essais sont présentés dans le Tableau 3. Parmi les huit solvants testés, seuls sept ont pu être évalués, le Securo ayant été immédiatement reconnu par le travailleur effectuant l'essai. Le Skysol et l'OS-20 ont été évalués le plus positivement par les travailleurs. Le Teksol, l'Ultrasolv et le Varsol® 3139 ont également obtenu des appréciations favorables. Néanmoins, pour le Teksol et l'Ultrasolv, l'évaporation a été jugée moyenne, plus lente que celle des autres solvants. Pour le Varsol® 3139, les odeurs ont été jugées tout juste tolérables. En revanche, le lactate d'éthyle et le Voltz Red ont été immédiatement rejetés à cause de leur odeur inacceptable. L'odeur du lactate d'éthyle a été jugée intolérable et celle du Voltz Red a été jugée agréable sur une courte période mais désagréable sur une période prolongée de travail. Les trois options retenues après les tests à petite échelle selon les critères d'odeur, d'efficacité et d'évaporation sont l'OS-20, le Varsol® 3139 et le Skysol.

Évaluation des conséquences des options retenues (étape 6) OS-20

L'OS-20 est constitué principalement d'octaméthyltrisiloxane avec une faible quantité (0,1 à 1 %) d'octaméthylcyclotérasiloxane qui se présente dans le mélange comme une impureté. C'est un solvant inflammable en

Tableau 3. Observations réalisées par deux travailleurs lors des essais à petite échelle.

Solvant	Odeur	Performance	Évaporation
Skysol	Tout juste détectable	Très bonne	Bonne
Teksol	Bonne	Très bonne	Moyenne
Voltz Red	Désagréable	Très bonne	Trop lente
Ultra-solv 221	Tolérable	Très bonne	Moyenne
OS-20	Inodore	Excellente	Bonne
Varsol® 3139	Tolérable	Très bonne	Bonne
Lactate d'éthyle	Intolérable	Bonne	Trop lente

vertu des critères du Système d'information sur les matières dangereuses utilisées au travail (SIMDUT) (37) et un irritant oculaire (33). De plus, le fabricant Dow Corning indique que l'octaméthylcyclotérasiloxane présente des effets sur la reproduction chez le rat à des concentrations de 500 ppm. Il classe ainsi la substance et le mélange OS-20 toxiques sur la reproduction conformément au SIMDUT. Dow Corning propose une VLE de 200 ppm (8 h) pour l'octaméthyltrisiloxane et de 10 ppm (8 h) pour l'octaméthylcyclotérasiloxane (38). L'EPA a jugé l'OS-20 acceptable en vertu de son programme SNAP pour remplacer les SACO dans le nettoyage de surfaces métalliques. Par ailleurs, l'OS-20 contribue de façon négligeable à la production d'ozone troposphérique (33).

Varsol® 3139

Le Varsol® 3139 est la coupe pétrolière combustible correspondant au solvant Stoddard (CAS 8052-41-3). Le Varsol® 3139 contient typiquement 18 % d'hydrocarbures aromatiques dont le triméthylbenzène, le xylène, l'éthylbenzène et le naphthalène (39, 40). Les coupes pétrolières, comme le solvant Stoddard, sont classées dans le groupe 3 du CIRC c'est-à-dire que ces mélanges ne peuvent être classés quant à leur potentiel cancérigène chez l'humain (41). La valeur limite réglementaire du Règlement sur la santé et la sécurité du travail du Québec (RSST) est de 525 mg/m³ afin de prévenir des effets d'irritation des yeux et des muqueuses ainsi que des effets de dépression du SNC (42). En raison de la présence d'hydrocarbures aromatiques, le Varsol® 3139 fait partie de la famille des composés organiques volatils contribuant à la formation d'ozone troposphérique (43).

Skysol

Le Skysol est un mélange d'hydrocarbures saturés et de MMB. Le Skysol possède un point d'éclair de 43 °C, il n'est donc pas un solvant inflammable mais combustible en vertu du SIMDUT. Le Skysol est utilisé depuis cinq ans par la compagnie Rolls-Royce (Canada) Ltée

(Lachine, Québec) comme produit de remplacement du TCE, employé pour le dégraissage manuel (35). L'expérience de l'utilisation du Skysol chez Rolls-Royce (Canada) Ltée n'a pas révélé de problèmes sanitaires apparents (44). Le MMB contenu dans le Skysol est un éther de glycol qui a fait son apparition depuis peu sur le marché. Il est soluble dans l'eau, bout à 173 °C, son point d'éclair et sa tension de vapeur sont respectivement de 68 °C et 125 Pa à 25 °C (45). Une revue de la toxicologie de cette substance effectuée par le gouvernement japonais ne soulève d'inquiétude que pour l'irritation oculaire et cutanée (45). Les sources d'information concernant cette substance sont néanmoins très limitées alors que rien n'a été publié dans la littérature scientifique et qu'il n'existe pas de VLE. Le numéro C.A.S. de la coupe pétrolière (64742-48-9) indique qu'il s'agit d'un mélange d'hydrocarbures saturés dont le nombre de carbone se situe entre C₆ et C₁₃ avec un point d'ébullition entre 65 °C et 230 °C. Comme pour le Securo, nous avons fait l'hypothèse qu'elle s'apparente à l'Isopar K de la société Esso avec une VLE de 1200 mg/m³ ou 177 ppm (8h) pour prévenir l'irritation des voies respiratoires et des yeux ainsi que ses effets dépressifs sur le système nerveux central (30).

Comparaison des options et choix (étape 7)

Les principaux éléments de comparaison entre les trois options sont présentés dans le Tableau 4 qui inclut également le solvant à substituer.

Du point de vue technique, l'OS-20 semble être le meilleur choix des trois options retenues. Cela s'explique par le fait que l'OS-20 est un organosiloxane qui dissout nécessairement bien les graisses à base de silicone.

Concernant la sécurité, seul l'OS-20 se classe dans la catégorie des liquides inflammables. Néanmoins, le point d'éclair de l'OS-20 est de 34 °C, proche de la limite combustible/inflammable, et constitue un risque jugé acceptable par le comité de substitution. En effet, le

deuxième solvant utilisé, l'isopropanol, possède un point d'éclair encore plus faible à 12 °C.

D'un point de vue santé, le Securo présente des effets de dépression du SNC, d'irritation de la peau, des yeux, et des voies respiratoires, des effets systémiques d'atteintes rénales et hépatiques ainsi qu'un potentiel cancérigène pour l'humain (9,10). Pour les autres solvants, ce sont essentiellement des problèmes d'irritation qui doivent être pris en compte. Mentionnons que le potentiel de toxicité sur la reproduction du solvant OS-20 rapporté par Dow Corning conformément au SIM-DUT concerne l'octaméthylcyclotérasiloxane présent en très faible quantité dans le solvant (0,1 % à 1 %). Le risque associé à cet effet est jugé extrêmement faible et donc acceptable par le comité de substitution. En effet, en se plaçant dans la pire situation [à une concentration d'octaméthylcyclotérasiloxane dans le liquide de 1 % en poids, pour une concentration dans l'air d'octaméthyltrisiloxane correspondant à la valeur limite d'exposition de 200 ppm recommandée par Dow Corning] et en tenant compte des différences de tensions de vapeur, la concentration d'octaméthylcyclotérasiloxane

dans l'air ne devrait pas dépasser 0,4 ppm soit 4 % de la VLE de 10 ppm recommandée par Dow Corning. Toujours par rapport à la dimension santé, on constate que les VHR de l'OS-20 (VHR=22) et du Varsol® 3139 (VHR=41) sont beaucoup plus faibles que celui du Securo (VHR=698). Bien que les tensions de vapeur du MMB et des hydrocarbures saturés du Skysol laissent présager un VHR du mélange faible, l'absence de VLE du MMB ne permet pas de le calculer.

En considérant la dimension environnementale, le potentiel de formation d'ozone troposphérique du Varsol® est le plus élevé des trois options.

Le Skysol semble être un candidat intéressant car il est efficace techniquement, il a un potentiel de formation d'ozone troposphérique faible et possède un point d'éclair élevé. Il y a cependant un manque de données toxicologiques publiées concernant le MMB en plus de l'absence d'une VLE. L'incertitude relative à la toxicité du MMB contenu dans le Skysol nous pousse alors à faire preuve de prudence à l'égard de ce solvant et à émettre des réserves sur son utilisation tant que sa toxicologie n'est pas

mieux connue. Il existe plus de données toxicologiques pour l'OS-20 et ce solvant bénéficie d'une approbation sanitaire de l'EPA en vertu de son programme SNAP et d'une recommandation de VLE de Dow Corning.

Le Varsol® 3139 pourrait constituer une solution de rechange acceptable, son prix militant certainement en sa faveur. Nous considérons toutefois ses caractéristiques environnementales et son odeur jugée, tout juste tolérable par les travailleurs, comme moins favorables.

La recommandation a finalement porté sur le solvant OS-20 car il apparaît que le risque relatif au point d'éclair est facilement gérable, que le risque de toxicité sur la reproduction associé à l'octaméthylcyclotérasiloxane est négligeable, que le potentiel de surexposition est faible et que le facteur coût représente une dépense supplémentaire acceptable d'environ 1200 \$ par rapport au Securo pour une utilisation annuelle estimée à 200 litres.

Implantation/Évaluation (étapes 8 et 9)

Après avoir recommandé l'OS-20, cette option n'a pas été retenue par l'entreprise pour des raisons économiques. Le solvant Skysol a été préféré. Notre équipe n'a pas participé à ces étapes d'implantation et d'évaluation.

DISCUSSION

Le projet présenté a permis d'évaluer en détail trois options de rechange au solvant Securo utilisé pour le nettoyage et le dégraissage des disjoncteurs haute tension : OS-20, Varsol® 3139 et Skysol. L'OS-20 apparaît comme l'option à privilégier. Il est important de considérer que cette recommandation n'est valable que dans la situation étudiée et que tout autre projet de substitution nécessitera de reconsidérer l'ensemble de la procédure d'analyse de substitution. Ce solvant peut par contre être retenu comme solution envisageable lors de l'étape 4 de la démarche de substitution concernant un projet de nettoyage et dégraissage de graisses à base de silicone.

Lors de l'étape 5 de la démarche, Gérin et Bégin recommandent de réaliser les tests à petite échelle en laboratoire ou en milieu de travail (18). Dans les deux cas, il est important d'effectuer ces tests en collaboration avec les travailleurs afin de considérer leurs préoccupations. Dans les tests effectués à petite échelle, il a été démontré que les travailleurs considèrent l'odeur des solvants comme un critère essentiel

Tableau 4. Comparaison des solvants Securo, OS-20, Varsol®3139 et Skysol.

Éléments de comparaison	Securo	OS-20	Varsol® 3139	Skysol
Apparence, couleur, odeur	Liquide incolore à forte odeur	Liquide incolore à très faible odeur	Liquide clair et incolore	Liquide incolore à faible odeur
Performance technique	Excellent	Pratiquement indétectable	Odeur jugée tolérable	
Point d'éclair	47 °C	34 °C	43 °C	43 °C
Sécurité	Combustible	Inflammable	Combustible	Combustible
Santé	Irritation des yeux et des muqueuses, dépression du système nerveux central TCE et PERC classés 2A d'après le CIRC	Irritation des yeux et des muqueuses, Impureté toxique sur la reproduction	Irritation des yeux et des muqueuses, dépression du système nerveux central	Irritation des yeux et des muqueuses, incertitude concernant le MMB
Tension de vapeur (kPa)	TCE : 8,6 PERC : 1,9 CP : 0,1	0,45 à 25 °C	0,3 à 20 °C	0,09 à 20 °C
VLE (ppm)	TCE : 50 PERC : 25 CP : 177	200 (impureté : 10)	175	CP : 177 MMB : -
VHR	698 ***	22	41	**
Potentiel de formation d'ozone*	0,12 (Isopar)	négligeable	0,38 (Mineral Spirits)	0,12 (Isopar)
Prix	5 \$/kg	12,89 \$/kg	2,82 \$/kg	5,95 \$/kg

* <http://solvd.b.ncms.org/>. Pour les mélanges, le potentiel le plus important a été retenu.

** Aucun VHR n'a été calculé pour le Skysol car aucune VLE n'a pu être identifiée pour le MMB qu'il contient.

*** Les fractions molaires nécessaires au calcul du VHR du mélange ont été déterminées en utilisant les concentrations médianes dans le solvant (TCE : 25%, PERC : 30% et CP : 45%). Le VHR du mélange a été calculé d'après la méthode de Goldschmidt (Cf. équation 2) (19).

Abréviations :

VHR : Vapour Hazard Ratio

VLE : Valeur limite d'exposition

CIRC : Centre international de recherche sur le cancer

TCE : Trichloroéthylène

PERC : Perchloroéthylène

CP : Coupe pétrolière

MMB : 3-méthoxy-3-méthyl-1-butanol

dans la sélection des substituts. Ce choix atteste de leurs préoccupations pour leur confort à leur poste de travail. Néanmoins, les conclusions sur l'évaluation des odeurs effectuées lors de ces tests doivent être nuancées. L'odeur désagréable du lactate d'éthyle pourrait venir de la présence d'impuretés identifiées comme les lactides qui seraient issues de la fabrication de l'acide lactique par fermentation (34). Pour le Voltz Red, l'odeur jugée désagréable par le travailleur est due à la présence du d-limonène qui possède une odeur caractéristique d'agrumes. Des plaintes concernant l'odeur de ce produit ont déjà été rapportées dans la littérature et ont contribué dans certains milieux à son élimination au profit du terpinéol, un terpène moins odoriférant (36). Les perceptions de l'odeur méritent d'être considérées dans un projet de substitution. Elles permettront d'ailleurs de faciliter l'acceptabilité de la solution de substitution par les travailleurs. L'odeur du Varsol® 3139, jugée tout juste tolérable par les travailleurs, a d'ailleurs probablement joué en sa défaveur lors du choix final réalisé par l'entreprise en faveur du Skysol.

Une des difficultés rencontrées dans ce projet concerne l'utilisation des VLE. Ainsi, il n'existe pas de VLE dans le RSST pour le lactate d'éthyle, le MMB, l'octaméthyltrisiloxane, l'octaméthylcyclotétrasiloxane, le d-limonène et pour les différentes coupes pétrolières utilisées. Des VLE de la réglementation suédoise ont alors été utilisées pour le lactate d'éthyle et le d-limonène. Les recommandations de Dow Corning pour l'octaméthylcyclotétrasiloxane et l'octaméthyltrisiloxane ont été retenues. En revanche, aucune VLE n'a pu être identifiée pour le MMB. On remarquera que l'absence de VLE revêt une grande importance lorsqu'il est question de se prononcer sur le potentiel de surexposition (VHR) (tableau 4). L'incertitude toxicologique doit alors être explicitement reconnue dans les processus de maîtrise des facteurs de risque et doit être considérée au moment de sélectionner le solvant substitutif. En conséquence, nous avons émis des réserves quant à l'utilisation du MMB tant qu'une VLE ne sera pas élaborée. Pour les coupes pétrolières, des recherches au niveau des fiches signalétiques des différents fournisseurs et fabricants ont été effectuées afin d'obtenir des recommandations de VLE. Néanmoins, il n'existe pas de consensus pour une même coupe pétrolière selon les différentes sources. Ainsi, pour le solvant Teksol, le fournisseur Magnus donne une VLE de

300 ppm, soit approximativement 2000 mg/m³ pour la coupe pétrolière de numéro C.A.S. 64742-48-9, alors qu'en utilisant la fiche de l'Isopar K du fabricant Esso comportant le même numéro C.A.S., on obtient une VLE de 1200 mg/m³. Finalement, d'après la méthodologie standardisée de calculs de VLE pour les mélanges d'hydrocarbures appelée « Reciprocal calculation procedure » (RCP), la VLE serait entre 1200 et 1500 mg/m³, donc plus proche de la VLE recommandée par Esso (46).

D'autres difficultés de la méthodologie d'analyse de substitution sont détectables au moment de sélectionner le substitut. Il n'existe pas de méthode unique à la fois rapide et complète pour sélectionner un solvant de substitution. La sélection d'un solvant est d'ailleurs toujours une question de compromis (15). Le choix final peut alors varier en fonction des dimensions privilégiées. La recommandation du comité de substitution (OS-20) n'a pas été retenue par l'entreprise pour des raisons économiques mais une autre option, le Skysol, a été préférée. L'expertise s'étant limitée aux sept premières étapes de la démarche, aucune intervention n'a pu être faite sur la suite du processus de substitution. Néanmoins, plusieurs possibilités auraient pu être envisagées pour diminuer le prix du solvant OS-20. Tout d'abord, le prix élevé aurait pu être compensé par la formulation d'un mélange d'OS-20 et d'une coupe pétrolière hydrotraînée. Ensuite, l'excellente capacité de nettoyage de l'OS-20 constatée lors des essais à petite échelle aurait pu permettre d'envisager l'élimination du deuxième nettoyage des pièces à l'isopropanol. Cela aurait réduit les coûts totaux d'acquisition des solvants et aurait diminué le temps de nettoyage des pièces de disjoncteur. Pour vérifier l'efficacité d'un nettoyage unique à l'OS-20, des tests de propreté seraient néanmoins requis (47).

Finalement, la méthodologie utilisée présente l'avantage d'être systématique, de couvrir l'ensemble des dimensions de la substitution et d'intégrer les travailleurs au processus de substitution. Le VHR des substances devrait être considéré lors de l'étape de comparaison des options, car il permet d'améliorer la comparaison en offrant, en plus de la comparaison des dangers potentiels sur la santé, une comparaison basée sur la notion de risque défini en termes de toxicité et d'exposition par la voie respiratoire. L'utilisation du VHR est alors le meilleur outil de comparaison entre les substances au niveau de la dimension santé,

bien qu'il se heurte à l'absence de VLE pour certaines substances. En outre, il faut se rappeler que cet outil, tout comme le Rm, ne prend pas en compte la question de l'irritation cutanée. Une méthodologie basée sur la démarche en neuf étapes et sur l'utilisation du VHR devrait être retenue par les intervenants en santé et sécurité du travail qui réalisent ou qui participent à des projets de substitution de solvants afin d'éviter des erreurs ou des négligences qui pourraient avoir des conséquences fâcheuses sur les travailleurs et sur l'environnement (48).

Bibliographie

1. Environnement Canada (1996) Le trichloréthylène et le tétrachloréthylène employés dans le dégraissage au solvant. Rapport sur la Loi canadienne sur la protection de l'environnement. Options stratégiques pour la gestion des substances toxiques. 45 p, Environnement Canada-Loi canadienne sur la protection de l'environnement. Ottawa, ON.
2. Mathieu, J. C. et Boust, C. (2001) Dégraissage des métaux : Choix des techniques et des produits. Fiche pratique de sécurité : ED48. 4 p, Institut national de recherche et de sécurité, Paris.
3. Wery, M. (1998) Dégraissage. Techniques de l'ingénieur (Fascicule M1450). 26 p. Paris
4. Drotning, W. (1994). Automated cleaning of electronic components, Proceedings. 1994 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment, 2-4 May. San Francisco, CA-Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York.
5. Meier, G. J. (1993) Non-Aqueous Cleaning Solvent Substitution. 223-231 p, National Technology Transfer Conference and Exposition (4th). Volume 1. Anaheim CA. United States Department of Energy. Washington, DC.
6. Nunno, T., Palmer, S., Arienti, M. et Breton, M. (1988) Waste Minimization in the Printed Circuit Board Industry-Case Studies. Hazardous Waste Engineering Research Laboratory. 7 p, US Environmental Protection Agency Project Summary-EPA/600/S2-88/008. Cincinnati, OH.
7. Oborny, M. C., Lopez, E. P., Peebles, D. E. et Sorensen, N. R. (1993). Solvent Substitution For Electronic Assembly Cleaning, First Annual International Workshop on Solvent Substitution, Phoenix, AR, 4-7 December 1990 - Noyes Data Corporation, 1993, Park Ridge, NJ.
8. KARA (2004) Produits industriels KARA inc. Fiche signalétique : Securo, K-521. 4 p. Ville St-Laurent, Qc.
9. REPTOX. Trichloréthylène (dernière mise à jour 2005/02/24). Commission de la santé et de la sécurité du travail. Page Web consultée le 25 avril 2007, [http://www.reptox.csst.qc.ca].
10. REPTOX. Perchloroéthylène (dernière mise à jour 2005/06/20). Commission de la Santé et de la Sécurité

- du Travail. Page Web consultée le 25 avril 2007, [http : //www.reptox.csst.qc.ca].
11. IARC (1995) Dry Cleaning, Some Chlorinated Solvents and Other Industrial Chemicals, Volume 63, Summary of Data Reported and Evaluation. 39 p, Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, International Agency for Research on Cancer/World Health Organization. Lyon.
 12. Gouvernement du Canada, Environnement Canada et Santé Canada (1993) Loi canadienne sur la protection de l'environnement-Liste des substances d'intérêt prioritaire, Rapport d'évaluation-Trichloroéthylène. 60 p, Groupe Communication Canada. Ottawa, ON.
 13. Gouvernement du Canada, Environnement Canada et Santé Canada (1993) Loi canadienne sur la protection de l'environnement-Liste des substances d'intérêt prioritaire, Rapport d'évaluation-Perchloroéthylène. 55 p, Groupe Communication Canada. Ottawa, ON.
 14. Chevalier, P., Cordier, S., Dab, W., Gérin, M., Gosselin, P. et Quénel, P. (2003) Santé environnementale, In Environnement et santé publique, pp 59-86 (Gérin, M., et coll. Rédacteurs). Edisem, Tec & Doc, Sainte-Hyacinthe et Paris.
 15. Gérin, M. et Bégin, D. (2004) Substitution, In Manuel d'hygiène du travail, pp 553-569 (Roberge, B., et coll. Rédacteurs). Modulo-Griffon, Mont-Royal, Qc.
 16. Ménard, L. (2004) Principes généraux de maîtrise, In Manuel d'hygiène du travail, pp 541-551 (Roberge, B., et coll. Rédacteurs). Modulo-Griffon, Mont-Royal, Qc.
 17. Callahan, M. S. et Green, B. (1995) Hazardous solvent source reduction. 355 p, McGraw-Hill. New York.
 18. Gérin, M. et Bégin, D. (2002) Substitution : démarches et outils, In Solvants industriels : santé, sécurité, substitution, pp 39-56 (Gérin, M. Rédacteur). Masson, Paris.
 19. Goldschmidt, G. (1993) An Analytical Approach for Reducing Workplace Health Hazards through Substitution. *Am Ind Hyg Assoc J* 54:36-43.
 20. Shapiro, K., Little, R. et White, A. (1994) To switch or not to switch : a decision framework for chemical substitution. *Pollution Prevention Review* 4:3-13.
 21. TURI (1994) The role of risk in chemical substitution decisions. Methods and policy report No.8. 19 p, The Massachusetts Toxics Use Reduction Institute, University of Massachusetts Lowell, MA.
 22. Sørensen, F. et Sthyr Petersen, H. J. (1988) Substitution of dangerous chemicals by a process-based method. *Staub-Reinhalung der Luft* 48:469-472.
 23. Mirza, T., Gérin, M., Bégin, D. et Drolet, D. (2000) A study on the substitution of trichloroethylene as a spot remover in the textile industry. *American Industrial Hygiene Association Journal* 61:431-438.
 24. IRSST (2005) Guide d'échantillonnage des contaminants de l'air en milieu de travail. 8e édition. Études et recherches/Guide technique T-06. 200 p, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail. Montréal, Qc.
 25. Popendorf, W. (1984) Vapor Pressure and Solvent Vapor Hazards. *American Industrial Hygiene Association Journal* 45:719-726.
 26. Garzon, R. D. (2002) High Voltage Circuit Breakers, Design and Applications-Second Edition, Revised and Expanded. 432 p, Marcel Dekker Inc. Basel.
 27. Pasteau, J. (2002) Introduction à l'appareillage très haute tension. Cahier technique n°127. 24 p, Schneider Electric. Grenoble, France.
 28. Nozaki, H. et Toyoshima, Y. (1974) Electric phenomena motivated by external works between two metal electrodes separated by organic fluidal material, regarding to the contact resistance of metals. *Comptes rendus du 7e congrès international sur les phénomènes de contact électrique*. 66-72 p, Société des électriciens, des électroniciens et des radioélectriciens de France. Malakoff.
 29. Timsit, R. S., Bock, E. M. et Corman, N. E. (1998) Effect of Surface Reactivity of Lubricants on the Properties of Aluminium Electrical Contacts. *IEEE Transactions on components, packaging, and manufacturing technology-Part A* 21:500-505.
 30. Esso (2003) Material Safety Data Sheet : Isopar K Solvent, 27 February 2003, n : 14244. Imperial Oil, Chemicals Division. 6 p. Toronto, ON.
 31. Vyskocil, A., Drolet, D., Tardif, R., Viau, C., Lemay, F., Truchon, G., Lapointe, G., Gagnon, F., Gagnon, N., Baril, M., Bégin, D. et Gérin, M. Les mélanges de substances en milieu de travail : utilitaire pour l'évaluation du risque chimique (Calcul du RM). Page Web consultée le 7 août 2007, [http : //www.irsst.qc.ca/files/outils/intertox/jsndx_fr.htm].
 32. ACGIH (2007) TLVs® and BEIs® Based on the Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices. 238 p, American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Cincinnati, OH.
 33. Bégin, D., Lavoué, J. et Gérin, M. (2002) Les nouveaux solvants et les procédés de substitution, In *Solvants industriels-Santé, sécurité, substitution*, pp 61-109 (Gérin, M. Rédacteur). Masson, Paris.
 34. Bégin, D., Heng, S. et Gérin, M. (2005) La substitution des solvants par le lactate d'éthyle. 45 p, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, Bilans de connaissances, Rapport B-069. Montréal, Qc.
 35. Mélançon, J. (2004) Rolls-Royce Canada-Substituer l'irremplaçable. *Prévention au travail* 17:40-42.
 36. Bégin, D. et Gérin, M. (1999) La substitution des solvants par le d-limonène. 38 p, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail, Bilans de connaissances, Rapport B-057. Montréal, Qc.
 37. Gouvernement du Canada (1988). Règlement sur les produits contrôlés (DORS/88-66). *Gazette du Canada* Partie II, 122(2): 551-589.
 38. Dow Corning Corporation. Material Safety Data Sheet : Dow Corning OS-20 (Date de révision : 2007/06/04). Page Web consultée le 15 juin 2007, [http : //dowcorning.com/Datafiles/090007b280e832ea.pdf].
 39. Esso (2004) Material Safety Data Sheet n09074: Var-sol® 3139 Solvent. Imperial Oil, Chemicals Division. 4 p. Toronto, ON.
 40. Esso (2003) Aliphatic Fluids Sales Specification : Var-sol® 3139 Solvent. Imperial Oil Limited. 4 p. Toronto, ON.
 41. CIRC (1989) Some Petroleum Solvents. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 47: Some Organic Solvents, Resin monomers and Related Compounds, Pigments and Occupational Exposures in Paint Manufacture and Painting. 43-77 p, Centre international de recherche sur le cancer. Lyon, France.
 42. Gouvernement du Québec (18 juillet 2001) Règlement sur la santé et la sécurité du travail. *Gazette officielle du Québec, Partie 2, Lois et règlements* 133:5020-5133.
 43. Olivier, M. J. (1998) Chimie de l'environnement. 326 p, Les Productions Jacques Bernier Enr. Longueuil, Qc.
 44. Communications personnelles avec M. Alain Houle responsable santé-sécurité et environnement chez Rolls-Royce (Canada) Ltée. 2004/11/23.
 45. Government of Japan (2004) SIDS Initial Assessment Report : 3-Methoxy-3-methyl-1-butanol-CAS N°: 56539-66-3. 70 p, Organization for Economic Co-operation and Development Screening Information DataSets (OECD SIDS); United Nations Environment Programme. Geneva.
 46. McKee, R. H., Medeiros, A. M. et Daughtrey, W. C. (2005) A proposed methodology for setting occupational exposure limits for hydrocarbon solvents. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 2:524-542.
 47. Costes, B., Henry, Y., Doppler, F., Archambault, C., Blanchard, Y., Perrot, L., Jullien, J., Boehm, J. C., Ganier, M., Jay, J., Malosse, R., Albert, F., Dueso, N. et Briand, Y. (1998) Guide de choix et d'utilisation des solvants et dégraissants industriels. 333 p. Senlis, France.
 48. Testud, F., Martin, J. C., Descotes, J. et Conso, F. (2000) Intoxications liées à la substitution des hydrocarbures halogénés-*Revue de la littérature. Archives des maladies professionnelles* 61:278-281.
 49. Hornung, R. W. et Reed, L. D. (1990) Estimation of Average Concentration in the Presence of Nondetectable Values. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 5:46-51.
 50. SWEA. Occupational Exposure Limit Values and Measures Against Air Contaminants-AFS 2005:17. Page Web consultée le 10 avril 2008, [http : //www.av.se/dokument/inenglish/legislations/eng0517.pdf].