



Recommandations canadiennes pour la qualité des sols – Environnement et santé humaine

n-HEXANE
2011

Le présent document fait état des recommandations canadiennes pour la qualité des sols qui s'appliquent au n-hexane et qui ont pour but de protéger l'environnement et la santé humaine (voir le tableau 1). Il existe également un document scientifique justificatif de ces recommandations (CCME, 2011).

Information générale

Le n-hexane (numéro de registre CAS 110-54-3) est un hydrocarbure aliphatique saturé (ou alcane) à chaîne droite, de formule C_6H_{14} . Le n-hexane est également appelé hexane, hexane normal, dipropyle et hydrure hexylique. Il fait partie de la fraction « F1 » des hydrocarbures telle que définie par le CCME (2008). À température et pression normales, le n-hexane est un liquide clair et incolore, doté d'une légère odeur rappelant celle du pétrole, détectable lorsque la concentration du produit se situe entre 65 et 248 ppm (OMS, 2000; NLM, 2005; National Pollutant Inventory Substance Profile, 2005; ATSDR, 1999). Le n-hexane n'est pas très hautement soluble dans l'eau (solubilité de 9,5 mg/L), le logarithme de son coefficient de partage octanol-eau ($\log K_{ow}$) est de 4,11 (MacKay *et al.*, 2006; Gustafsen *et al.*, 1997), et son coefficient de partage du carbone

organique (K_{oc}) estimé est de 3 410 (Gustafsen *et al.*, 1997), valeurs indiquant un faible potentiel de bioconcentration (CCME, 1999). Sous forme liquide, le n-hexane est moins dense que l'eau; en phase vapeur, le produit est plus lourd que l'air. Le n-hexane est hautement inflammable et, en mélange avec l'air, les vapeurs du produit sont explosives (OMS, 2000). La constante de la loi d'Henry du n-hexane est de 1,69 à 1,83 atm \cdot m 3 /mol; on s'attend donc à ce qu'il se volatilise rapidement à partir de la surface de l'eau (AENV, 2004a).

Le n-hexane est présent naturellement dans le pétrole brut et le gaz naturel. On signale que la teneur en n-hexane est, approximativement, de 1,1 % dans l'essence (en poids) et de 2,4 % dans le mazout JP-4 (Potter et Simmons, 1998); cependant, les essences à indice d'octane élevé produites actuellement peuvent renfermer 3 % de n-hexane en poids (ATSDR, 1999). Le n-hexane entre également dans la composition des colles, des colles à base de caoutchouc, des peintures, des revêtements et des adhésifs (ATSDR, 1999; NLM, 2005), et il est employé dans les thermomètres à basse température (NLM, 2005). L'hexane pur est utilisé comme réactif de laboratoire (ATSDR, 1999).

Le n-hexane est abondamment utilisé pour extraire les huiles

Tableau 1. Recommandations pour la qualité des sols applicables au n-hexane (mg \cdot kg $^{-1}$).

	Utilisation du terrain et texture du sol							
	Agricole		Résidentielle/ parc		Commerciale		Industrielle	
	Sol grossier	Sol fin	Sol grossier	Sol fin	Sol grossier	Sol fin	Sol grossier	Sol fin
Recommandation^a	0,49	6,5	0,49	6,5	6,5	21	6,5	21
RQS _{SH}	0,49	6,5	0,49	6,5	6,5	21	6,5	21
RQS _E	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.

Notes : RQS_E = recommandation pour la qualité des sols – protection de l'environnement; RQS_{SH} = recommandation pour la qualité des sols – protection de la santé humaine; N.C. = non calculée.

^aLes données dont on dispose sont adéquates et suffisantes pour calculer une RQS_{SH} seulement, et non une RQS_E. Par conséquent, la recommandation pour la qualité des sols est fixée à la valeur de la RQS_{SH} et constitue une nouvelle recommandation pour cette utilisation du sol, obtenue en conformité avec le protocole pour les sols (CCME, 2006).

Les recommandations qui figurent dans la présente fiche d'information sont fournies à titre d'indication générale. Les conditions propres aux sites doivent être prises en considération au moment de l'application des valeurs. Les recommandations peuvent être appliquées différemment selon les administrations. L'utilisation de certaines valeurs listées au tableau 1 peut ne pas être permise au niveau générique dans certaines administrations. Les lecteurs sont priés de consulter l'autorité compétente avant d'appliquer ces valeurs.

végétales contenues dans les cultures comme le soja, le canola, le lin, les arachides, le carthame, le germe de maïs et le coton, et pour obtenir des produits déshuilés comme la farine de soja déshuilée (ATSDR, 1999; OMS, 1991). Les concentrations d'hexane dans cinq marques d'huile d'olive extra vierge s'établissaient entre 19,1 ng/mL et 95,3 ng/mL (Overton et Manura, 1995); les résidus moyens d'hexane étaient < 0,9 mg/kg dans l'huile d'arachide, et < 1,5 mg/kg dans l'huile de tournesol (Hautfenne *et al.*, 1987).

Les solvants à base de n-hexane sont également utilisés comme agents nettoyeurs ou dégraissants dans les industries suivantes : imprimerie, textile, meuble, chaussure et cuir (ATSDR, 1999). Les solvants à base de n-hexane sont employés pour la polymérisation du caoutchouc et la fabrication des polyoléines, des élastomères, des cosmétiques et des produits pharmaceutiques (NLM, 2005; OMS, 1991).

Le phytoplancton marin (McKay *et al.*, 1996), les plantes terrestres (Rinnan *et al.*, 2005) et les champignons (Ahearn *et al.*, 1996) peuvent également produire de petites quantités de n-hexane.

On peut trouver du n-hexane dans les sols et les eaux souterraines des endroits contaminés par des hydrocarbures pétroliers (en particulier de l'essence) ou à l'emplacement où se sont produits des déversements d'hexane. Aucune donnée n'a été recensée sur les concentrations de n-hexane dans les sols, les sédiments, les eaux souterraines, les eaux de surface ou l'eau potable non contaminés.

Les concentrations de n-hexane dans l'air ambiant varient considérablement en fonction de la source et de la saison d'échantillonnage. Dans l'ensemble du Canada, les concentrations ambiantes moyennes de n-hexane seraient, selon les rapports, de $(2,03 \pm 2,87) \mu\text{g}/\text{m}^3$, la gamme des valeurs allant de concentrations inférieures à la limite de détection, soit $0,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, à $242 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (OMOE, 2005). Des résultats semblables ont été signalés en Ontario, où les concentrations de n-hexane se situaient entre la limite de détection ($0,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$) et $110 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (OMOE, 2005). Au Québec, les concentrations annuelles moyennes atteignaient 0,53 à $3,41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (gouvernement du Québec, 2002), tandis qu'en Alberta les concentrations moyennes sur 24 h étaient de 0,223 à $25,55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (AENV, 2004b). De manière générale, les concentrations ambiantes de n-hexane étaient plus faibles en milieu rural que dans les villes : les concentrations moyennes annuelles étaient de $0,23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (gouvernement du Québec, 2002), des valeurs mensuelles moyennes de 0,07 à $0,28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ayant été signalées au lac la Flamme (Bottenheim et Shepherd, 1995); les concentrations mensuelles moyennes se situaient entre 0,07 et $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dans le parc national Kejimikujik (Nouvelle-Écosse), entre 0,1 et $0,35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à Egbert (Ontario), et entre 0,035 et $0,32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à l'île Saturna (Colombie-Britannique) (Bottenheim et Shepherd, 1995).

Des concentrations de n-hexane plus élevées que la moyenne dans l'air ambiant ont été signalées à proximité des installations

de production de produits chimiques, de produits alimentaires, de pétrole, de ruban adhésif et de film plastique ainsi que des aciéries et des installations d'exploitation des sables bitumineux (Environnement Canada, 2007).

Une étude pancanadienne menée en 1991-1992 indiquait que la concentration moyenne de n-hexane dans l'air intérieur était de $1,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, le maximum étant de $124 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Davis et Otson, 1996). La concentration moyenne de n-hexane dans les échantillons d'air intérieur prélevés à Toronto entre février et avril 1996 était de $5,24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Otson et Zhu, 1997). En Californie, une étude dans les immeubles de bureaux a révélé une moyenne géométrique de $1,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pour la concentration de n-hexane, le rapport des concentrations à l'intérieur sur les concentrations à l'extérieur s'établissant entre 0,26 et 18 (Daisey *et al.*, 1994). Les concentrations peuvent être beaucoup plus élevées dans les lieux de travail mal ventilés. On a signalé des concentrations supérieures à $1\,750 \mu\text{g}/\text{m}^3$ à certains endroits où du n-hexane est employé (ATSDR, 1999).

Devenir et comportement dans l'environnement – Sols

La pression de vapeur et la constante de la loi d'Henry élevées du n-hexane indiquent que le produit est susceptible de se volatiliser rapidement à partir des sols superficiels et de la surface de l'eau. L'adsorption aux particules de sol est considérée comme modérée, étant donné la constante K_{oc} relativement faible (AENV, 2004b; ATSDR, 1999); cependant, le n-hexane peut être considérablement plus persistant dans les couches plus profondes du sol, surtout si la teneur en oxygène y est faible ou si la quantité de substances nutritives y est limitée (ATSDR 1999). La faible solubilité du n-hexane dans l'eau indique qu'une fraction relativement petite du produit est susceptible de se dissoudre dans les eaux de surface ou les eaux souterraines. Le n-hexane est moins dense que l'eau, et, en fortes concentrations (supérieures à la limite de solubilité), il sera présent sous forme de phase liquide non aqueuse légère (Feenstra *et al.*, 1991; Hunt *et al.*, 1988; ATSDR, 1999). Comme contaminant, le n-hexane a donc le potentiel d'être mobile et de se répandre au-dessus de la zone saturée.

La volatilisation est réputée être beaucoup plus rapide que la dégradation chimique ou biochimique; cependant, le n-hexane peut être transformé en alcools primaires, en aldéhydes et, pour finir, en acides gras (ATSDR, 1999). D'après les métabolites isolés dans une culture pure de *Pseudomonas*, les produits de la biodégradation par oxydation du n-hexane sont le 2-hexanol et le 1-hexanol. Le 1-hexanol peut ensuite être transformé en acétate et en acide adipique (Heringa *et al.*, 1961). On suppose souvent que la dégradation aérobie est plus importante dans le cas des composés aliphatiques de faible masse moléculaire que dans celui des hydrocarbures plus lourds; cependant, le taux de dégradation aérobie des vapeurs de n-hexane dans le sol (constante du taux de décomposition de premier ordre : environ $0,24 \text{ j}^{-1}$) est plus faible que celui du n-octane ou du n-décane (Höhener *et al.*, 2003).

Les taux de dégradation du n-hexane varient en fonction de nombreux facteurs, dont la teneur en oxygène, les propriétés du sol et les communautés microbiennes présentes. Dans un inoculum de boues activées, le n-hexane et 12 autres composants de l'essence ont été complètement dégradés en moins de 30 jours (Solano-Serena *et al.*, 2000). Dans une autre expérience, on a placé de l'essence à indice d'octane élevé (100 µL/L ou 7 550 µg/L octane à 15 °C), renfermant du n-hexane (1,36 µL/L ou 0,89 mg/L) en incubation avec une flore naturelle dans des eaux souterraines à 13 °C. Après 192 heures, les concentrations de n-hexane avaient été réduites de 46 % par biodégradation (Verschueren, 1983; HSDB, 2005).

On a démontré la biodégradation du n-hexane dans les eaux de surface ou les eaux souterraines dans le cadre d'études en laboratoire et d'études de terrain, surtout en conditions aérobies (McClay *et al.*, 1995; Rosenberg *et al.*, 1992; ATSDR, 1999). On s'attend donc à ce que le n-hexane ne soit pas persistant dans la plupart des eaux de surface; par contre, on prévoit qu'il puisse être persistant dans les eaux souterraines, en particulier dans des conditions anérobies ou quand la teneur en substances nutritives est faible (ATSDR, 1999).

Bioconcentration

On estime peu probable que le n-hexane se bioconcentre ou se bioaccumule dans les aliments d'origine aquatique ou terrestre (AENV, 2004a; ATSDR, 1999). Le CCME considère que les substances dont le facteur de bioconcentration ou de bioaccumulation est inférieur à 5 000 (ou dont le log K_{oc} est < 5) sont peu susceptibles de se concentrer ou de s'accumuler dans le biote aquatique (CCME, 1999). D'après son log K_{oc} (3,5) et son log K_{oc} (4,11), le n-hexane ne devrait pas se bioconcentrer.

Comportement et effets sur le biote

Processus microbiens

On a observé la métabolisation du n-hexane par plusieurs types de bactéries. Le catabolisme aérobie serait le principal mécanisme de dégradation du n-hexane dans les sols dont la teneur en oxygène est suffisante (Leahy et Colwell, 1990). Cependant, dans certains sols, la teneur en oxygène et en substances nutritives ne permet pas la dégradation aérobie.

Rabus *et al.* (2001) ont constaté que certaines bactéries dénitrifiantes étaient capables d'oxyder le n-hexane suivant un mécanisme anaérobie, pour former du succinate de 1-méthylpentyle, lequel est à son tour transformé en acides gras à chaînes méthyle (Wilkes *et al.*, 2002) et finalement en CO₂ (Wilkes *et al.*, 2006). Seules certaines espèces peuvent métaboliser le n-hexane (Ehrenreich *et al.*, 2000), ce qui indique que la composition de la communauté microbienne peut avoir une incidence sur les taux de dégradation. Il a aussi été établi que les bactéries réductrices des sulfates ou du fer(III) ont la capacité de métaboliser les alcanes, dont le n-hexane, en conditions anaérobies (Harayama *et al.*, 2004).

L'exposition pendant 24 h à une concentration de 500 mg/L de

n-hexane dans une suspension de 50 mg de boues d'eaux usées municipales a eu des effets toxiques chez plus de 20 organismes méthylotrophes (Gerhold et Malaney, 1966). On a également observé une oxydation du n-hexane en 2-pentanone et en 2-pentanol (Gerhold et Malaney, 1966).

Végétaux terrestres

La phytorestauration a été utilisée à des fins de réhabilitation de terrains contaminés par des hydrocarbures pétroliers; cependant, la métabolisation du n-hexane par les végétaux n'a pas été étudiée. Le maïs cultivé de façon normale dans un sol contenant des hydrocarbures pétroliers n'a pas accumulé d'alcanes saturés (Chaîneau *et al.*, 1997). La présence de végétaux réduisait les concentrations de carburant diesel dans les sols arctiques, en particulier celles des alcanes légers; cependant, la bioaccumulation de ces composés dans les végétaux ne semblait pas significative (Palmroth *et al.*, 2002).

Il a été démontré que l'exposition aux vapeurs de n-hexane endommage certains tissus végétaux. Des sujets des espèces *Hordeum vulgare* (orge) et *Daucus carota sativus* (carotte) ont été soumis à une fumigation au n-hexane en concentrations de 4,5 à 6,3 mmol/L (388 à 543 mg/L) et de 4,5 à 7,8 mmol/L (388 à 675 mg/L); des effets néfastes ont été observés aux jours 1 et 28, respectivement (Currier et Peoples, 1954). L'exposition aux vapeurs de n-hexane a entraîné une augmentation de la perméabilité des feuilles. L'application d'une légère pression sur les feuilles a causé un noircissement, la sève cellulaire remplissant les espaces intercellulaires. Des taches sombres sont également apparues sur certaines feuilles en l'absence de pression, et ce phénomène a été suivi d'une perte de turgescence, d'un flétrissement complet et de la mort de la plante (Currier et Peoples, 1954). Des dommages membranaires ont également été observés chez des cultures ornementales exposées au n-hexane (Vincoli, 1997).

On a enregistré une perte de la viabilité racinaire – le méristème apical se montrant le plus résistant – chez des sujets de *Hordeum vulgare* (orge) dont les racines avaient été mises à tremper dans le n-hexane à raison de 0,69 mmol/L (59,46 mg/L) pendant 0,25 jour (Currier et Peoples, 1954). Comme les racines des plantes absorbent plus aisément les substances polaires et que les feuilles absorbent plus facilement les substances non polaires, il se pourrait que les racines résistent mieux que les feuilles à l'exposition aux hydrocarbures (Crafts, 1948).

Invertébrés terrestres

Aucun renseignement spécifique n'a été recensé dans les publications sur la métabolisme ou les effets du n-hexane chez les invertébrés terrestres. Deux études inédites menées au Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ) sur le lombric *Eisenia Andrei* ont révélé que les vers évitaient dans une proportion de 80 et de 95 % 2 types de sols différents dont la teneur en n-hexane était de 1,42 ppm; aucune mortalité n'a été enregistré parmi les sujets expérimentaux à une concentration de n-hexane de 210 ppm (Gaëlle Triffault-Bouchet, CEAEQ, comm. pers.).

Animaux d'élevage et espèces sauvages

On ne dispose à l'heure actuelle d'aucune étude sur les effets toxicologiques du n-hexane chez les animaux d'élevage ou les espèces sauvages. La section qui suit concerne les études sur les animaux de laboratoire.

Effets sur la santé humaine et sur la santé des animaux de laboratoire

Chez l'humain, l'absorption de n-hexane peut se faire par suite de l'ingestion ou de l'inhalation du produit, ou de l'exposition cutanée à celui-ci. Une proportion significative du n-hexane n'est pas absorbée; le n-hexane est plutôt exhalé intact (Bus *et al.*, 1982). En fait, l'absorption systémique par les poumons chez l'humain est d'approximativement 17 % (Mutti *et al.*, 1984) à 25 % (Veulemans *et al.*, 1982). Le n-hexane inhalé est rapidement absorbé et distribué dans le corps entier. Chez le rat, le n-hexane se distribue dans la plupart des tissus, y compris les reins, le foie, les poumons, l'encéphale, les testicules et les nerfs périphériques (Baker et Rickert, 1981). La toxicité du n-hexane est attribuée à ses métabolites, surtout la 2,5-hexanedione, plutôt qu'au composé d'origine (ATSDR, 1999). Les trois principales voies d'excrétion du n-hexane sont l'exhalation sous forme de n-hexane intact par les poumons (Baelum *et al.*, 1998), l'excrétion sous forme de CO₂ d'origine métabolique par les poumons, et l'excrétion sous forme de métabolites par l'urine (Bus *et al.*, 1982).

On sait que l'exposition par inhalation et par voie orale au n-hexane provoque des effets de toxicité au niveau du système neurologique, du système reproducteur et du système visuel. Une nouvelle neuropathie périphérique sensorimotrice touchant les travailleurs exposés à des solvants à base de pétrole contenant du n-hexane a été décrite pour la première fois dans des études épidémiologiques dans les années 1960. Le syndrome neurotoxique a été observé chez des travailleurs fabriquant des sandales au Japon (Yamamura, 1969; Yamada, 1964), chez des fabricants de chaussures en Italie (Abbritti *et al.*, 1976; Mutti *et al.*, 1982), chez des correcteurs d'épreuves dans le domaine de l'imprimerie à Taïwan (Wang *et al.*, 1986) ainsi que chez des travailleurs américains broyant le carbure de tungstène (Sanagi *et al.*, 1980) après une exposition de moins de 1 an à 25 ans ou plus. Dans les années 1990, des effets neurotoxiques semblables ont été relevés chez des travailleurs œuvrant dans une installation de production de manteaux et de chaussures en cuir (Oge *et al.*, 1994), une fabrique de sacs de voyage (Yuasa *et al.*, 1996) et des ateliers de réparation automobile (Harrison *et al.*, 2001). L'identification du n-hexane comme agent causal a été rendue difficile par la présence de nombreux autres composés, dont certains étaient également des neurotoxines.

Des signes cliniques et physiologiques de neurotoxicité similaires à ceux observés dans les cas de neurotoxicité en milieu professionnel sont apparus chez les rats exposés en laboratoire au n-hexane par inhalation. Des changements histopathologiques comparables ont été notés au niveau des nerfs périphériques chez l'humain et les animaux de laboratoire

(Chang *et al.*, 1993). Des études approfondies de toxicocinétique et de biochimie ont permis d'établir une corrélation entre la neurotoxicité du n-hexane et la formation du métabolite γ -dicétonique (2,5-hexanedione) chez les rats comme chez l'humain (Pyle *et al.*, 1992; DeCaprio *et al.*, 1987; DeCaprio *et al.*, 1983).

L'exposition au n-hexane peut avoir des effets néfastes sur la bandelette optique chez l'humain, ces effets se caractérisant par une vision trouble, une maculopathie et des troubles du sens chromatique (Chang, 1987). On a enregistré des changements histopathologiques caractéristiques au niveau de la bandelette optique (gonflement axonal) chez les animaux exposés en laboratoire (Spencer *et al.*, 1980). On a signalé des anomalies des potentiels neuronaux évoqués chez les humains exposés à des solvants contenant du n-hexane et chez les animaux de laboratoire exposés à du n-hexane pur (Chang, 1987). Une possible corrélation entre l'exposition au n-hexane et une potentialisation de la défaillance visuelle chez les personnes atteintes de la neuropathie optique héréditaire de Leber (perte de vue héréditaire, associée à des mutations de l'ADN mitochondrial maternel) a été évoquée (Carelli *et al.*, 2007); cependant, d'autres travaux demeurent nécessaires pour pouvoir affirmer l'existence d'une relation de cause à effet.

Les données limitées dont on dispose ne révélaient aucun effet toxique significatif sur le plan de la reproduction chez les mâles ni chez les femelles à des doses non toxiques pour les mères. Une DSENO de 200 ppm de n-hexane a été établie pour ce qui est de la toxicité sur le plan du développement, ceci d'après les résultats d'une étude de la toxicité subchronique sur le plan de la reproduction chez le rat (Mast *et al.*, 1988). On ne dispose d'aucune étude multigénérationnelle de la toxicité sur le plan de la reproduction et du développement.

L'ATSDR et l'EPA ont évalué la cancérogénicité du n-hexane. L'EPA (EPA, 2005) a conclu que les renseignements existants sont insuffisants pour évaluer le potentiel cancérigène du n-hexane car on ne dispose d'aucune étude sur la cancérogénicité chez les animaux, et que d'une seule étude chez l'humain (Beall *et al.*, 2001), dans le cadre de laquelle des travailleurs ont été exposés sur une base chronique à des mélanges contenant du n-hexane et d'autres substances chimiques.

On a retenu la toxicité neurologique comme étant le paramètre traduisant la plus grande sensibilité d'ordre toxicologique. On dispose d'une base de données exhaustive sur la neurotoxicité du n-hexane. Des corrélations significatives ont été observées chez les animaux comme chez l'humain entre, d'une part, la dose et la durée d'exposition au n-hexane et, d'autre part, le délai avant l'apparition des effets neurotoxiques ainsi que la gravité de ceux-ci. L'exposition au n-hexane entraîne d'abord une paresthésie ainsi que des troubles du toucher et de la sensibilité à la douleur, puis une diminution des réflexes au niveau des bras et une paralysie au niveau des jambes. On a également mesuré une diminution de la vitesse de conduction des nerfs moteurs et des nerfs mixtes à des doses inférieures à celles associées à une toxicité apparente (Takeuchi *et al.*, 1980;

Takeuchi *et al.*, 1981; Huang *et al.*, 1989; Iwata *et al.*, 1984; Takeuchi *et al.*, 1983; Ono *et al.*, 1982).

Parmi les effets associés à l'exposition au n-hexane figurent une atrophie des tubes séminifères des testicules chez le rat ainsi que des effets sur le développement, chez le rat et la souris, après exposition des mères. Les données épidémiologiques existantes ne permettent pas d'évaluer les doses associées à ces effets chez l'humain. Chez les animaux de laboratoire, les données sur les effets chez les mâles n'étaient pas adéquates pour fixer des valeurs de référence toxicologiques. Chez les femelles, les données dont on dispose laissent supposer des effets sur le plan de la reproduction et du développement aux doses supérieures à celles induisant des effets neurotoxiques significatifs.

Un certain nombre de facteurs ont été pris en compte dans l'établissement de valeurs de référence toxicologiques (VRT) pour le n-hexane, dont les suivants : accroissement des effets du n-hexane dans le cas d'une exposition autre que professionnelle davantage continue que l'exposition professionnelle (en raison de la toxicocinétique du n-hexane et de la 2,5-hexanedione, et des taux de clairance relativement élevés pendant les périodes de non-exposition); inhibition et/ou induction du métabolisme du n-hexane en 2,5-hexanedione en fonction de la dose et de la durée (peut-être par un métabolite du n-hexane); augmentation de la toxicité du n-hexane avec l'augmentation de la dose et de la durée; sous-populations potentiellement sensibles, par exemple personnes atteintes de la maladie de Parkinson; différences interspécifiques (c'est-à-dire que, chez le rat, le taux d'excrétion de la 2,5-hexanedione est plus élevé que chez l'humain); interactions toxicocinétiques avec d'autres composés (par exemple, exposition simultanée à des hydrocarbures aliphatiques linéaires, ramifiés ou cycliques, à des composés aromatiques [xylènes, toluène], à des cétones [méthyléthylcétone, acétone] ou à des alcools [alcool isopropylique]).

Aux fins de l'établissement de la RQS relative à l'inhalation de vapeurs, une concentration de référence (CRf) de 0,7 mg/m³ provenant de l'EPA (2005) a été utilisée comme concentration admissible (CA) d'inhalation pour le n-hexane. La CA de n-hexane inhalé sur l'ensemble de la durée de vie est tirée de Huang *et al.* (1989), étude dans laquelle des rats ont été exposés à du n-hexane (pur à plus de 99 %) 12 heures par jour, 7 jours par semaine, pendant 12 semaines. L'effet critique sur la santé étudié par Huang *et al.* (1989) était un paramètre neurologique.

La base de données sur l'exposition orale au n-hexane était considérablement plus limitée que la base de données sur l'inhalation. Une dose journalière admissible (DJA) provisoire de 0,1 mg/kg p.c./j (Equilibrium, 2008) a été utilisée pour établir la RQS relative au contact direct. La valeur du point de départ (PD) a été calculée d'après des mesures répétées tirées d'une méta-analyse d'études (Ono *et al.*, 1979; Ono *et al.*, 1981). Une valeur de 8 mg/kg-j a été établie pour le PD, ceci d'après la réduction de 5 % de la vitesse de conduction des nerfs mixtes, aux fins du calcul d'une DJA par voie orale sur l'ensemble de la durée de vie, après ajustement pour une exposition équivalente

sur l'ensemble de la durée de vie. Un facteur d'incertitude de 90 a été appliqué (facteur de 10 pour tenir compte des personnes particulièrement sensibles; facteur de 3 pour tenir compte des différences interspécifiques sur le plan toxicocinétique; facteur de 3 pour tenir compte du caractère limité de l'ensemble de données sur l'exposition par voie orale, y compris le petit nombre de points de données et l'utilisation de données relatives à des mesures répétées).

Élaboration des recommandations

Les recommandations canadiennes pour la qualité des sols sont élaborées pour diverses utilisations du terrain selon la méthode établie par le CCME (2006), en utilisant différents récepteurs et scénarios d'exposition pour chacune des utilisations du terrain (voir le tableau 1). Les modifications au protocole de 2006 utilisé pour l'élaboration des standards pancanadiens relatifs aux hydrocarbures pétroliers dans le sol (CCME, 2008) ont également été prises en compte dans l'élaboration de ces recommandations, y compris le calcul de recommandations applicables à différentes textures de sols (grossiers et fins). Comme on le définit dans les standards pancanadiens relatifs aux hydrocarbures pétroliers, les sols à grains fins sont composés à plus de 50 % (en masse) de particules de diamètre moyen inférieur à 75 µm (D₅₀ < 75 µm). Les sols à grains grossiers sont composés à plus de 50 % (en masse) de particules de diamètre moyen supérieur à 75 µm (D₅₀ > 75 µm). Le détail des calculs fondant les recommandations pour la qualité des sols en ce qui concerne le n-hexane est présenté dans le document justificatif (CCME, 2011).

Recommandations pour la qualité des sols – Protection de l'environnement

Les recommandations pour la qualité des sols visant la protection de l'environnement (RQS_E) sont fondées sur des études de toxicité chez les plantes et les invertébrés. En ce qui concerne les terrains à vocation agricole, des données sur la toxicité associée à l'ingestion de sol et d'aliments par les espèces de mammifères et d'oiseaux sont prises en compte. Afin d'assurer un spectre plus large de protection, on calcule également des valeurs de vérification en ce qui concerne le cycle des substances nutritives et de l'énergie, si les données le permettent. En ce qui concerne les sols à vocation industrielle, on calcule aussi des valeurs de vérification pour la migration hors site.

Dans le cas du n-hexane, les données sont insuffisantes pour calculer une recommandation relative au contact avec le sol pour les végétaux et les invertébrés. L'ensemble de données dont on dispose ne permet pas non plus de répondre aux exigences fixées par le protocole du CCME (2006) pour le calcul de la valeur de vérification concernant le cycle des substances nutritives et de l'énergie. Une recommandation provisoire pour l'ingestion de sol et d'aliments a été élaborée pour les consommateurs primaires. Aucune recommandation n'a été élaborée pour les consommateurs secondaires puisque les données disponibles laissent supposer que le n-hexane ne se bioaccumule pas dans la chaîne alimentaire.

Une valeur de vérification relative aux eaux souterraines a été

calculée afin de déterminer les concentrations de n-hexane dans le sol qui seront protectrices pour l'abreuvement du bétail et la résurgence dans les eaux de surface. On n'a pu trouver de recommandation pour la protection de la vie aquatique s'appliquant au n-hexane d'aucune administration. Une telle recommandation est nécessaire pour établir la recommandation pour la qualité des sols qui protège la vie aquatique. Afin de fournir une certaine orientation à l'égard de cette voie d'exposition, on a dérogé au protocole pour les sols (CCME, 2006) en établissant une valeur de référence toxicologique à partir du peu de données de toxicité dont on disposait pour les organismes aquatiques (CCME, 2011). La recommandation pour la qualité des sols ainsi obtenue est considérée comme provisoire. Elle n'a pas été utilisée pour déterminer la RQS_E , et devrait être employée avec discernement. La valeur de vérification provisoire pour le bétail n'a pas été utilisée pour établir la RQS_E , mais elle devrait être appliquée en fonction des caractéristiques de chaque site (voir le tableau 2). Aucune valeur de vérification n'a été calculée pour la migration hors site du n-hexane : en effet, on a posé l'hypothèse que, étant donné la volatilité et la biodégradabilité du n-hexane, il est peu probable que des quantités significatives de ce produit demeurent au terme du transport du sol par le vent ou l'eau.

Recommandations pour la qualité des sols – Protection de la santé humaine

En ce qui concerne le contact direct (ingestion et contact cutané) avec les contaminants à seuil d'effet, les recommandations pour la qualité des sols visant la protection de la santé humaine exigent l'établissement d'une DJA pour le récepteur le plus sensible associé à l'utilisation du terrain en question. Comme Santé Canada n'a pas fixé de DJA pour le n-hexane, une DJA provisoire a été déterminée aux fins du calcul des recommandations pour la qualité des sols. Des recommandations ont été établies pour l'ingestion et le contact cutané associés à chacune des quatre utilisations du terrain définies par le CCME (2006). Étant donné que le n-hexane est considéré comme un contaminant volatil, des recommandations ont également été établies pour l'inhalation en milieu intérieur associée à chacune des quatre utilisations du terrain. Comme Santé Canada n'a pas fixé de CA pour le n-hexane, les calculs ont été fondés sur la CRf de $0,7 \text{ mg/m}^3$ provenant de l'EPA (2005). On suppose par défaut des facteurs d'absorption relative de 100 % pour l'inhalation, l'ingestion et le contact cutané.

Le CCME (2006) recommande d'adopter une démarche tenant compte des divers milieux pour l'élaboration des recommandations; suivant cette démarche, une valeur par défaut de 20 % de la DJA résiduelle est attribuée au sol. Par conséquent, un facteur de 0,2 a été appliqué dans le calcul de la recommandation visant les sols.

Le CCME recommande d'appliquer divers mécanismes de vérification, quand la situation s'y prête, afin d'élargir la protection qu'assurent les recommandations (voir le tableau 2). Dans le cas du n-hexane, on a calculé des valeurs de vérification

relatives à l'inhalation en milieu intérieur pour les sols à grains grossiers et pour les sols à grains fins. Comme Santé Canada n'a pas fixé de concentration admissible (CA) pour le n-hexane, les calculs ont été fondés sur la CRf provenant de l'EPA (2005). On suppose par défaut un facteur d'absorption relative de 100 % (inhalation:voie orale).

Une valeur de vérification pour les eaux souterraines a été calculée afin de déterminer les concentrations de n-hexane dans le sol qui seraient protectrice pour l'eau potable. En l'absence d'une recommandation pour la qualité de l'eau potable au Canada à l'égard du n-hexane, des valeurs de vérification ont été élaborées à partir d'une valeur guide pour les sources d'eau souterraine (VGSES) de $0,23 \text{ mg/L}$ (CCME, 2011). Cette VGSES, établie uniquement à des fins de vérification pour l'eau souterraine, prend en compte les diverses voies d'exposition. Un taux d'ingestion par l'eau potable équivalent de $6,25 \text{ L-}\dot{\text{e}}\text{q/j}$ a été obtenu en additionnant le taux d'ingestion présumé par voie orale ($1,5 \text{ L/j}$) et les estimations prudentes du taux d'ingestion de n-hexane équivalant à l'absorption cutanée ($2,96 \text{ L-}\dot{\text{e}}\text{q/j}$) et à l'inhalation ($1,79 \text{ L-}\dot{\text{e}}\text{q/j}$) pouvant se produire pendant le bain ou la douche.

Aucune valeur de vérification relative à la migration hors site n'a été calculée puisqu'il est peu probable que des concentrations significatives de n-hexane demeurent après le transport par le vent ou l'eau, ceci en raison de la forte volatilité et de la forte biodégradabilité du produit. On n'a pas établi non plus de valeur de vérification pour les produits, la viande et le lait puisque le n-hexane est très peu susceptible de se transmettre au sein des réseaux trophiques.

La valeur la plus basse parmi les diverses recommandations et valeurs de vérification pour la protection de la santé humaine constitue la RQS_{SH} recommandée. La RQS_{SH} pour le n-hexane est donc fondée sur la valeur de vérification relative à l'inhalation de vapeurs en milieu intérieur (voir le tableau 2).

Recommandations pour la qualité des sols – n-hexane

Les recommandations pour la qualité des sols visent la protection de l'environnement et de la santé humaine; c'est pourquoi elles correspondent aux valeurs les plus basses entre les RQS_{SH} et les RQS_E . Dans les cas où les données sur ces deux aspects sont suffisantes et adéquates, les critères provisoires pour la qualité du sol du CCME (1991) peuvent être remplacés.

Les données dont on dispose sont adéquates et suffisantes pour calculer une RQS_{SH} seulement, et non une RQS_E . Par conséquent, chaque recommandation pour la qualité des sols est fixée à la valeur de la RQS_{SH} et constitue une nouvelle recommandation obtenue en conformité avec le protocole pour les sols (CCME 2006). Aucune recommandation pour la qualité des sols n'existait auparavant en ce qui concerne le n-hexane. Le CCME (1996) fournit des conseils sur les modifications qui pourraient être apportées aux recommandations au moment où des objectifs propres à un site sont fixés.

Pour la plupart des lieux contaminés, les voies d'exposition déjà décrites sont jugées suffisantes à l'élaboration de recommandations pour la qualité des sols. Toutefois, d'autres aspects du n-hexane pourraient être préoccupants, notamment :

la formation de liquide en phase libre, le risque d'explosion ou d'incendie et l'exposition des travailleurs dans les tranchées aux vapeurs. Voir CCME (2011) pour plus de renseignements.

Tableau 2. Recommandations pour la qualité des sols et valeurs de vérification applicables au n-hexane (mg·kg⁻¹).

	Utilisation du terrain							
	Agricole		Résidentielle/ parc		Commerciale		Industrielle	
	Sol grossier	Sol fin	Sol grossier	Sol fin	Sol grossier	Sol fin	Sol grossier	Sol fin
Recommandation^a	0,49	6,5	0,49	6,5	6,5	21	6,5	21
Recommandations pour la protection de la santé humaine et valeurs de vérification								
RQS _{SH} ^b	0,49	6,5	0,49	6,5	6,5	21	6,5	21
Contact direct	2 140 ^c	2 140 ^c	2 140 ^c	2 140 ^c	3 250 ^c	3 250 ^c	15 600 ^c	15 600 ^c
Vérification pour l'inhalation d'air intérieur								
sous-sol	0,75	6,8	0,75	6,8	—	—	—	—
dalle sur terre-plein	0,49	6,5	0,49	6,5	6,5	41	6,5	41
Vérification pour la migration hors site ^d	—	—	—	—	S.O.	S.O.	S.O.	S.O.
Vérification pour les eaux souterraines (eau potable)	21	21	21	21	21	21	21	21
Vérification pour les produits, la viande et le lait ^e	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	—	—	—	—
Recommandations pour la protection de l'environnement et valeurs de vérification								
RQS _E ^f	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
Recommandation pour le contact avec le sol	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
Recommandation pour l'ingestion de sol et d'aliments	75 ^g	75 ^g	—	—	—	—	—	—
Vérification pour le cycle des substances nutritives et de l'énergie ^h	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.	N.C.
Vérification pour la migration hors site	—	—	—	—	S.O. ^c	S.O. ^c	S.O. ^c	S.O. ^c
Vérification pour les eaux souterraines (bétail)	10 750 ^{gc}	9 400 ^{gc}	—	—	—	—	—	—
Vérification pour les eaux souterraines (vie aquatique)	12.3 ⁱ	11.6 ⁱ	12.3 ⁱ	11.6 ⁱ	12.3 ⁱ	11.6 ⁱ	12.3 ⁱ	11.6 ⁱ
Critère provisoire pour la qualité des sols (CCME, 1991)	Aucune valeur		Aucune valeur		Aucune valeur		Aucune valeur	

Notes : S.O. = sans objet; N.C. = non calculée; RQS_E = recommandation pour la qualité des sols – protection de l'environnement; RQS_{SH} = recommandation pour la qualité des sols – protection de la santé humaine. Le tiret correspond à une recommandation ou à une valeur de vérification qui ne fait pas partie du scénario d'exposition pour l'utilisation du terrain dont il est question et qui n'est donc pas calculée.

^a Les données dont on dispose sont adéquates et suffisantes pour calculer une RQS_{SH} seulement, et non une RQS_E. Par conséquent, la recommandation pour la qualité des sols est fixée à la valeur de la RQS_{SH} et constitue une nouvelle recommandation pour cette utilisation du sol, obtenue en conformité avec le protocole pour les sols (CCME, 2006).

^b La RQS_{SH} correspond à la valeur la plus faible parmi les recommandations visant la protection de la santé humaine et les valeurs de

vérification.

- ^c La formation en phase libre, jugée inacceptable par de nombreuses administrations, se produit quand une substance dépasse sa limite de solubilité dans l'eau. La concentration à laquelle se produit le phénomène dépend de divers facteurs, dont la texture du sol, sa porosité et sa macroporosité. Selon les hypothèses posées pour cette recommandation, la formation en phase libre devrait se produire lorsque les concentrations dépassent $315 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ dans un sol fin, et $261 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ dans un sol grossier. Il convient de communiquer avec les autorités compétentes pour obtenir des conseils.
- ^d Étant donné la volatilité et la biodégradabilité du n-hexane, il est peu probable que des quantités significatives du produit demeurent au terme du transport du sol par le vent ou l'eau; par conséquent, cette voie d'exposition n'a pas fait l'objet d'une évaluation.
- ^e Cette vérification vise la protection contre les substances chimiques qui peuvent se bioconcentrer dans les aliments destinés à la consommation humaine. Comme on ne prévoit pas que ce soit le cas pour le n-hexane, cette voie d'exposition n'a pas fait l'objet d'une évaluation.
- ^f La RQS_E n'a pas pu être établie car les données étaient insuffisantes ou inadéquates pour calculer la recommandation requise pour le contact avec le sol.
- ^g Recommandation provisoire.
- ^h Les données sont insuffisantes ou inadéquates pour calculer la vérification relative au cycle des substances nutritives et de l'énergie pour cette utilisation du terrain.
- ⁱ Cette recommandation est provisoire, parce qu'il n'y avait pas de recommandation canadienne pour la qualité des eaux aux fins de la protection de la vie aquatique pour l'établir, comme le veut le CCME (2006). En remplacement, on a estimé une valeur de référence toxicologique à partir du peu de données sur la toxicité du n-hexane dont on disposait. Voir CCME (2011) pour plus de renseignements. Ceux qui envisagent d'employer la valeur présentée doivent le faire avec discernement.

Références

- Abbritti G., A. Siracusa, C. Cianchetti, C.A. Coli, F. Curradi, G.F. Peticoni et F. DeRosa. 1976. Shoe-makers' polyneuropathy in Italy: the aetiological problem. *British Journal of Industrial Medicine*, **33**: 92-99
- AENV (Alberta Environment). 2004a. Assessment Report on Hexane for Developing Ambient Air Quality Objectives. Préparé par Cantox Environmental Inc. et RWDI West Inc.
- AENV (----). 2004b. Air Quality Monitoring: Near three residences in the Fort Saskatchewan area, August 2001-August 2002. Publ. n° T/725.
- Ahearn, D.G., S.A. Crow, R.B. Simmons *et al.* 1996. Fungal colonization of fibreglass insulation in the air distribution system of a multi-story office building: VOC production and possible relationship to a sick building syndrome. *Journal of Industrial Microbiology*, **16**: 280-285. Cité dans ATSDR, 1999.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). 1999. Toxicological profile for n-hexane. <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/index.asp>
- Baelum, J., L. Molhave, S. Hansen et M. Vaeth. 1998. Metabolic interaction between toluene, trichloroethylene, and n-hexane in humans. *Scand J Work Environ Health*, **24**: 30-37.
- Baker, T.S. et D.E. Rickert. 1981. Dose-dependent uptake, distribution, and elimination of inhaled n-hexane in the Fischer-344 rat. *Toxicol Appl Pharmacol*, **61**(3): 414-422.
- Beall, C., E. Delzell, B. Rodu, N. Sathikumar, P.S.J. Lees, P.N. Breyse et S. Myers. 2001. Case-control study of intracranial tumors among employees at a petrochemical research facility. *Occup. Environ. Med.* **43**(12):1103-13.
- Bottenheim, J.W. et M.F. Shepherd. 1995. C₂-C₆ hydrocarbon measurements at four rural locations across Canada. *Atmospheric Environment*, **29**(6): 647-664.
- Bus, J., D. Deyo et M. Cox. 1982. Dose-dependent disposition of n-hexane in F-344 rats after inhalation exposure. *Fundam Appl Toxicol*, **2**: 226-229.
- Carelli, V., F. Franceschini, S. Venturi, P. Barboni, G. Savini, G. Barbieri, E. Pirro, C. La Morgia, M. Valentino, F. Zanardi, F. Violante et S. Mattioli. 2007. Grand Rounds: Could Occupational Exposure to n-Hexane and Other Solvents Precipitate Visual Failure in Leber Hereditary Optic Neuropathy? *Environ Health Perspect*, **115**(1): 113-115.
- CCME (Conseil canadien des ministres de l'environnement). 1991. Critères provisoires canadiens de qualité environnementale pour les lieux contaminés. CCME. Winnipeg.
- CCME (----). 1996. Recommandations canadiennes pour la qualité des sols – Document d'orientation sur l'établissement d'objectifs particuliers à un terrain en vue d'améliorer la qualité du sol des lieux contaminés au Canada. (Réimprimé dans les Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement, chapitre 7, CCME, 1999, Winnipeg).
- CCME (----). 1999. Protocole d'élaboration de recommandations pour les résidus dans les tissus en vue de protéger les espèces faunique consommant le biote aquatique au Canada.
- CCME (----). 2006. Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des sols en fonction de l'environnement et de la santé humaine. Groupe de travail sur les recommandations pour la qualité du sol du CCME. Révision de 2006.
- CCME (----). 2008. Standard pancanadien relatif aux hydrocarbures pétroliers (HCP) dans le sol : Supplément technique.
- CCME. (----) 2011. Canadian Soil Quality Guidelines for n-hexane: Environmental and Human Health. Scientific Supporting Document. Winnipeg (Manitoba).
- Chaîneau, C.H., J.L. Morel et J. Oudot. 1997. Phytotoxicity and plant uptake of fuel oil hydrocarbons. *Journal of Environmental Quality*, **26**(6): 1478-1483.
- Chang, C.M., C.W.Yu, K.Y. Fong, S.Y. Keung, T.W. Tsin, Y.L. Yu, T.F. Cheung et S. Chan. 1993. N-Hexane neuropathy in offset printers. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, **56**: 538-542.
- Chang, Y.C. 1987. Neurotoxic effects of n-hexane on the human central nervous system: evoked potential abnormalities in n-hexane polyneuropathy. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*, **50**: 269-274.
- Crafts, A.S. 1948. A theory of herbicidal action. *Science*, **108**: 85-85.
- Currier, H.B. et S.A. Peoples. 1954. Phytotoxicity of hydrocarbons. *Hilgardia*, **23**(6): 155-173.
- Daisey, J.M., A.T. Hodgson, W.J. Fisk *et al.* 1994. Volatile Organic Compounds in Twelve California Office Buildings: Classes, Concentrations and Sources. *Atmospheric Environment* **28**(22):3557-3562.
- Davis, C.S. et R. Otson. 1996. Estimation of emissions of volatile organic compounds (VOCs) from Canadian residences. Pages 55-65 dans Wang, W., J. Schnoor et J. Doi. (éd.). *Volatile Organic Compounds in the Environment*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken (PA). ASTM STP1261. Cité dans Hers *et al.*, 2001.
- DeCaprio, A.P., S.J. Jackowski et K.A. Regan. 1987. Mechanism of formation and quantitation of imines, pyrroles, and stable nonpyrrole adducts in 2,5-hexanedione-treated protein. *Mol Pharmacol*, **32**: 542-548.
- DeCaprio, A.P., N.L. Strominger et P. Weber. 1983. Neurotoxicity and protein binding of 2,5-hexanedione in the hen. *Toxicol Appl Pharmacol*, **68**: 297-307.
- Ehrenreich, P., A. Behrends, J. Harder et F. Widdel. 2000. Anaerobic oxidation of alkanes by newly isolated denitrifying bacteria. *Archives of Microbiology*, **173**: 58-64.
- Environnement Canada. 2007. Inventaire national des rejets de polluants. En ligne. http://www.ec.gc.ca/pdb/npri/npri_home_f.cfm. Consulté en février 2007.
- EPA. 2005 (révision de 2008). Toxicological Review of n-Hexane (numéro CAS 110-54-3). À l'appui des renseignements sommaires sur l'Integrated Risk Information System (IRIS). Environmental Protection Agency des États-Unis. EPA. Washington (DC).
- Equilibrium Environmental. 2008. Inhalation Tolerable Daily Concentration Oral Tolerable Daily Intake Section; Supporting Document for the Development of a Human Health-Based Soil Quality Guideline for n-Hexane. Janvier 2008.
- Feenstra, S., D.M. Mackay et J.A. Cherry. 1991. A method for assessing residual NAPL based on organic chemical concentrations in soil samples. *Ground Water Monitoring Review*, **11**(2): 128-136.
- Gerhold, R.M. et G. Malaney. 1966. Structural determinants in the oxidation of aliphatic compounds by activated sludge. *Water Pollut. Contr.*, **38**: 562-579.
- Gouvernement du Québec. 2002. Critères de qualité de l'air : Fiches synthèses. Ministère de l'Environnement, Direction du suivi de l'état de l'environnement, Service des avis et des expertises.
- Gustafson, J.B., J.G. Tell et D. Orem. 1997. Volume 3: Selection of Representative TPH Fractions Based on Fate and Transport Considerations. ISBN 1-884-940-12-9.
- Harayama, S., Y. Kasai et A. Hara. 2004. Microbial communities in oil-contaminated seawater. *Current Opinion in Biotechnolog*, **15**: 205-214.
- Harrison, R., L. Israel, P. Larabee, J. Cone, C. Baker, M. Brewer, M. Das et S. Brumis. 2001. N-hexane causes peripheral neuropathy among automotive technicians. *Morbidity and*

- Mortality Weekly Reporter*, **50**(45): 1011-1013.
- Hautfenne, A., W.D. Pocklington et J.P. Wolff. 1987. Determination of 'hexane' residues in oils: Results of a collaborative study and the standardised method. *Pure & Applied Chemistry*, **59**(11): 1561-1570.
- Heringa, J.W., R. Huybregtse et A.C. Van Der Linden. 1961. n-Alkane oxidation by a *Pseudomonas* formation and B-oxidation of intermediate fatty acids. *Antonie Van Leeuwenhoek*, **27**: 2751-2758.
- Höhener, P., N. Dakhel, M. Christophersen, M. Broholm et P. Kjeldsen. 2003. Biodegradation of hydrocarbon vapors: Comparison of laboratory studies and field investigations in the vadose zone at the emplaced fuel source experiment, Airbase Værloose, Denmark. *Journal of Contaminant Hydrology*, **88**: 337-358.
- HSDB (Hazardous Substances Data Bank). 2005. Information from the Hazardous Substances Data Bank. n-Hexane. Toxicology Data Network System. National Library of Medicine. Bethesda (MD).
- Hunt, J.R., N. Sitar et K.S. Udell. 1988. Nonaqueous phase liquid transport and cleanup: 1. Analysis of mechanisms. *Water Resources Research*, **24**(8): 1247-1258.
- Huang, J., K. Kato, E. Shibate, K. Sugimura, N. Hisanaga, Y. Ono et Y. Takeuchi. 1989. Effects of chronic n-hexane exposure on nervous system-specific and muscle-specific proteins. *Archives of Toxicology*, **63**: 381-385.
- Iwata, M., Y. Takeuchi, N. Hisanaga et Y. Ono. 1984. Changes of n-hexane neurotoxicity and its urinary metabolites by long-term co-exposure with MEK or toluene. *Int Arch Occup Environ Health*, **54**: 273-281.
- Leahy, J.G. et R.R. Colwell. 1990. Microbial degradation of hydrocarbons in the environment. *Microbiological Reviews*, **54**(3): 305-315.
- MacKay, D., W.Y. Shiu, K.-C. Ma et S.C. Lee. 2006. Handbook of Physical-Chemical Properties and Environmental Fate for Organic Chemicals, 2^e éd. CRC Press, Boca Raton (FL).
- Mast T., J. Decker, K. Stoney *et al.* 1988. Inhalation developmental toxicology studies: Teratology study of n-hexane in mice [rapport final]. Public Health Service, U.S. Department of Health and Human Services; NTP TER90083. Préparé par le Pacific Northwest Laboratory, Richland (WA), pour le National Toxicology Program, National Institute for Environmental Health Services, Research Triangle Park (NC); PNL-6590.
- McKay, W.A., M.F. Turner, B.M.R. Jones *et al.* 1996. Emission of hydrocarbons from marine phytoplankton – Some results from controlled laboratory experiments. *Atmospheric Environment* **30**: 2583-2593. Cited in ATSDR 1999.
- McClay, K., S.H. Streger et R.J. Steffan. 1995. Induction of toluene oxidation activity in *Pseudomonas mendocina* KR1 and *Pseudomonas* sp. Strain ENVPC5 by chlorinated solvents and alkanes. *Applied and Environmental Microbiology*, **61**(9): 3479-3481.
- Mutti, A., F. Ferri, G. Lommi, S. Lotta, S. Lucertini et I. Franchini. 1982. n-Hexane induced changes in nerve conduction velocities and somatosensory evoked potentials. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, **51**: 45-54.
- Mutti, A., M. Falzoi, S. Lucertini, G. Arfini, M. Zignani, S. Lombardi et I. Franchini. 1984. n-Hexane metabolism in occupationally exposed workers. *British Journal of Industrial Medicine*, **41**: 533-538.
- NLM (National Library of Medicine) 2005. Hazardous Substances Data Bank (HSDB): N-Hexane. En ligne : <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search/r?dbs+hsdb:@term+@DOCNO+91>. Dernière révision : 4 octobre 2005. Consultée en février 2007.
- National Pollutant Inventory Substance Profile, 2005. Substance fact sheet: n-Hexane. Adresse Internet : <http://www.npi.gov.au/substances/hexane/index.html>
- Oge, A., J. Yazici, A. Boyaciyani, D. Eryildiz, I. Ornek, R. Konyalioglu, S. Cengiz, O. Oksak, S. Asar et A. Basalo. 1994. Peripheral and central conduction in n-hexane polyneuropathy. *Muscle & Nerve*, **17**: 1416-1430.
- Ono, Y., Y. Takeuchi et N. Hisanaga. 1979. Studies on the method of measuring nerve conduction velocity in the rat's tail and on the comparative toxicity of n-hexane, methyl n-butyl ketone and 2,5-hexanedione. *Jap J Ind Health*, **21**: 528-538.
- Ono, Y., Y. Takeuchi et N. Hisanaga. 1981. A Comparative Study on the Toxicity of n-Hexane and its Isomers on the Peripheral Nerve. *Int Arch Occup Environ Health*, **48**: 289-294.
- Ono, Y., Y. Takeuchi, N. Hisanaga et M. Iwata. 1982. Neurotoxicity of petroleum benzine compared with n-hexane. *Int Arch Occup Environ Health*, **50**: 219-229.
- OMOE (Ministère de l'environnement de l'Ontario). 2005. Ontario Air Standards for n-Hexane. Direction de l'élaboration des normes.
- OMS (Organisation mondiale de la Santé). 1991. Hexane. Environmental Health Criteria 122. Programme des Nations unies pour l'environnement, Organisation internationale du Travail, Organisation mondiale de la Santé.
- OMS (---). 2000. Programme international sur la sécurité des substances chimiques : n-Hexane. PISCC 0279. Avril 2000.
- Otson, R. et J. Zhu. 1997. I/O values for determination of the origin of some indoor organic pollutants. Dans Proceedings of the Air & Waste Management Association's 90th Annual Meeting and Exhibition, Toronto (Ontario), juin 1997. Document n° 97-TP54.02. Cité dans Hers *et al.*, 2001.
- Overton, S.V. et J.J. Manura. 1995. Analysis of volatile organics in cooking oils by thermal desorption-gas chromatography-mass spectrometry. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **43**: 1314-1320.
- Palmroth, M.R.T., J. Pichtel et J.A. Puhakka. 2002. Phytoremediation of subarctic soil contaminated with diesel fuel. *Bioresource Technology* **84**: 221-228.
- Potter, T.L. et K.E. Simmons. 1998. Total Petroleum Hydrocarbon Working Group Series Volume 2: Composition of Petroleum Mixtures. Amherst Scientific Publishers, Amherst (Massachusetts).
- Pyle, S., V. Amarnath, D. Graham et D. Anthony. 1992. The role of pyrrole formation in the alteration of neurofilament transport induced during exposure to 2,5-hexanedione. *Journal of Neuropathology and Experimental Neurology*, **51**: 451-458.
- Rabus, R., H. Wilkes, A. Behrends, A. Armstroff, T. Fischer, A.J. Pierik et F. Widdel. 2001. Anaerobic initial reaction of n-alkanes in a denitrifying bacterium: evidence for (1-methylpentyl)succinate as initial product and for involvement of an organic radical in n-hexane metabolism. *Journal of Bacteriology*, **183**(5): 1707-1715.
- Rinnan, R., Å. Rinnan, T. Holopainen, J. Holopainen et P. Pasanen. 2005. Emission of non-methane volatile organic compounds (VOCs) from boreal peatland microcosms – effects of ozone exposure. *Atmospheric Environment*, **39**: 921-930.
- Rosenberg, E., R. Legmann, A. Kushmaro, R. Taube, E. Adler et E. Ron. 1992. Petroleum bioremediation – a multiphase

- problem. *Biodegradation*, 3(2-3): 337-350.
- Sanagi, S., Y. Seki, K. Sugimoto. 1980. Peripheral nervous system functions of workers exposed to n-hexane at low level. *Int Arch Occup Environ Health*, 47: 69-79.
- Solano-Serena, F., R. Marchal, T. Huet, J.M. Lebeault et J.P. Vandecasteele. 2000. Biodegradability of volatile hydrocarbons of gasoline. *Appl. Microbiol Biotechnol*, 54: 121-125.
- Spencer, P.S., H.H. Schaumburg, M.I. Sabri et B. Verones. 1980. The enlarging view of hexacarbon neurotoxicity. *CRC Crit Rev Toxicol*, 17(4): 279-356.
- Takeuchi, Y., Y. Ono, N. Hisanaga, M. Iwata, M. Aoyama, J. Kitoh et Y. Sugiura. 1983. An experimental study of the combined effects of n-hexane and methyl ethyl ketone. *British Journal of Industrial Medicine*, 40: 199-203.
- Vincoli, J. 1997. Risk Management for Hazardous Chemicals. CRC Press, Florida.
- Wang, J.D., Y.C. Chang, K.P. Kao, C.C. Huang, C.C. Lin et W. Yeh. 1986. An outbreak of n-hexane induced polyneuropathy among press proofing workers in Taipei. *American Journal of Industrial Medicine*, 10: 111-118.
- Wilkes, H., R. Rabus, T. Fischer, A. Armstroff, A. Behrends et F. Widdel. 2002. Anaerobic degradation of n-hexane in a denitrifying bacterium: further degradation of the initial intermediate (1-methylpentyl)succinate via C-skeleton rearrangement. *Archives of Microbiology*, 177(3): 235-243.
- Takeuchi, Y., Y. Ono et N. Hisanaga. 1981. A comparative study of the toxicity of n-pentane, n-hexane, and n-heptane to the peripheral nerve of the rat. *Clinical Toxicology*, 18(12): 1395-1402.
- Takeuchi, Y., Y. Ono, N. Hisanaga, J. Kitoh et Y. Sugiura. 1980. A comparative study on the neurotoxicity of n-pentane, n-hexane, and n-heptane in the rat. *British Journal of Industrial Medicine*, 37(3): 241-247.
- Verschueren, K., 1983. Handbook of Environmental Data of Organic Chemicals. 2nd ed. Van Nostrand Reinhold Co., New York, NY:
- Veulemans, H., E. Van Vlem, H. Janssens, R. Masschelein et A. Leplat. 1982. Experimental human exposure to n-hexane. *Int Arch Occup Environ Health*, 49: 251-263.
- Wilkes, H., S. Kühner, O. Kniemeyer, F. Widdel et R. Rabus. 2006. Molecular mechanisms of anaerobic biodegradation of hydrocarbons. *Geophysical Research Abstracts* 8: 06554.
- Yamada, S. 1964. An occurrence of polyneuritis by n-hexane in the polyethylene laminating plants. *Jpn J Ind Health*, 6: 192. Cité dans Spencer *et al.*, 1980.
- Yamamura, Y. 1969. N-hexane polyneuropathy. *Folia Psychiatr Neurol Jpn*, 23: 45-57.
- Yuasa, J., R. Kishi, T. Eguchi, I. Harabuchi, T. Kawai, M. Ikeda, R. Sugimoto, H. Matsumoto et H. Miyake. 1996. Investigation on neurotoxicity of occupational exposure to cyclohexane: a neurophysiological study. *Occupational & Environmental Medicine*, 53(3): 174-179.

Comment citer ce document :

Conseil canadien des ministres de l'environnement. 2011. Recommandations canadiennes pour la qualité des sols : Environnement et santé humaine – n-hexane. Dans : Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement, 1999, Conseil canadien des ministres de l'environnement, Winnipeg.

Pour des questions de nature scientifique, veuillez communiquer avec :

Environnement Canada
Bureau national des recommandations et des normes
200, boul. Sacré-Coeur
Gatineau (QC) K1A 0H3
Téléphone: 819-953-1550
Courriel : ceqg-rcqe@ec.gc.ca

Pour des copies supplémentaires, communiquez avec :

www.ccme.ca

Also available in English