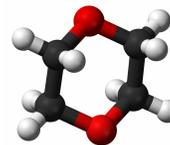


FICHE TECHNIQUE

1,4-Dioxane

Octobre 2016



FICHE TECHNIQUE - 1,4-Dioxane

INTRODUCTION

Le 1,4-dioxane est un composé chimique soluble dans l'eau qui est présent historiquement dans de nombreux produits tels que les solvants, plastiques, adhésifs, peintures et produits dégivrants. Son usage principal est la stabilisation chimique de certains solvants chlorés, en particulier le 1,1,1-trichloroéthane (TCA) et le trichloroéthylène (TCE). Il est également inclus en petite dose à l'intérieur de produits domestiques tels que les détergents ou les produits cosmétiques.

En plus du Canada, l'apparition du 1,4-dioxane dans les eaux de surface et souterraines a été rapportée aux États-Unis, au Japon, en Allemagne, aux Pays-Bas et au Royaume-Uni. Les sources principales de 1,4-dioxane dans les sources d'approvisionnement en eau potable sont les effluents d'eaux usées, les déversements accidentels, les fuites et les pratiques historiques de gestion des solvants chlorés usés qui contiennent ce composé. Le 1,4-dioxane a notamment été détecté dans l'eau souterraine de sites contaminés par des solvants chlorés ou de dépotoirs/sites d'enfouissement. Contrairement aux solvants chlorés, le 1,4-dioxane est soluble dans l'eau. De plus, ce composé ne s'adsorbe pas aux particules de sol, n'a pas tendance à être transféré dans la phase gazeuse lorsque dissous dans l'eau et est récalcitrant à la biodégradation.

Peu de juridictions présentent des lignes directrices en lien avec ce composé. Aux États-Unis, le 1,4-dioxane a été classé par l'Environmental Protection Agency (EPA) comme cancérigène probable vis-à-vis les humains. Ce potentiel cancérigène est associé à des tumeurs potentielles au nez et au foie. Des effets non cancérigènes au système nerveux, au foie et aux reins sont également associés au 1,4-dioxane. La principale voie d'exposition vis-à-vis le 1,4-dioxane chez l'humain en termes de dose et de risque est l'ingestion d'eau contaminée.

PROPRIÉTÉS PHYSICO-CIMIQUES DU 1,4-DIOXANE

Les propriétés qui influencent le plus le comportement du 1,4-dioxane dans les sols et l'eau souterraine sont les suivantes :

- **Solubilité** : le 1,4-dioxane est miscible dans l'eau et peut donc voyager à l'intérieur d'un panache d'eau souterraine contaminée, et il a plus d'affinité pour l'eau par rapport aux composés organiques, tel que l'indique son coefficient de partage octanol-eau K_{ow} ;
- **Adsorption** : le composé en phase dissoute s'adsorbe peu à la matière organique des sols et sa progression n'est donc pas retardée par rapport à celle de l'eau souterraine;
- **Partition air/eau** : la constante de Henry faible du 1,4-dioxane témoigne d'une partition préférentielle dans l'eau par rapport à l'air. Lorsqu'en phase dissoute, il n'aura donc pas tendance à transférer de la phase aqueuse vers l'air. Par contre, il est volatil lorsqu'exposé directement à l'air, tel que défini par sa pression de vapeur élevée;
- **Biodégradation** : le composé est récalcitrant aux mécanismes naturels de biodégradation qui existent dans un environnement contaminé.

Tableau 1 : Propriétés physico-chimiques du 1,4-dioxane

Propriété	Valeur	Temp. (°C)	Référence
Numéro CAS	123-91-1		PubChem, 2016
Formule chimique	C ₄ H ₈ O ₂		Environnement Canada et Santé Canada, 2010
Composition (massique)	C 54,53%; H 9,15%; O 36,32%		Mohr et al., 2010
Classe chimique	Composé organique hétérocyclique		Environnement Canada et Santé Canada, 2010
Couleur	Claire		PubChem, 2016
Odeur	Faible odeur étherée		PubChem, 2016
Masse moléculaire	88,10512 g/mol	n/d	PubChem, 2016
	85,8 cm ³ /mol	25	Mohr et al., 2010
Masse volumique	1,028 g/cm ³	20	Mohr et al., 2010
Solubilité dans l'eau	>800 g/L (Miscible)	25	PubChem, 2016
Point d'ébullition	varie selon l'auteur entre : 101,1 - 101,5 °C		Mohr et al., 2010 Environnement Canada et Santé Canada, 2010
Point de fusion	11,80 °C		EPA, 2014
Pression de vapeur	29,0 mm Hg (3,9 kPa)	20	PubChem, 2016
	38,1 mm Hg (5,08 kPa)	25	EPA, 2014
Constante de la loi de Henry	0,49 Pa*m ³ /mol	25	EPA, 2014
	4,80 x 10 ⁻⁶ atm*m ³ /mol		Environnement Canada et Santé Canada, 2010
Coefficient d'adsorption sur le carbone organique (K _{co})	17		Mohr et al., 2010
	1,23		EPA, 2014
Coefficient de partage octanol-eau (K _{ow})	-0,27		EPA, 2014
	-0,27		PubChem, 2016
Tension de surface (liquide pur)	32,75 mN/m	25	PubChem, 2016
	29,28 mN/m	50	
Viscosité	0,012 cp (Eau = 0.9 cp)	25	PubChem, 2016
Biodégradation	Réclacitrant en raison de sa structure moléculaire		Li et al., 2010

Activités anthropiques et source d'une contamination potentielle

Par le passé, la libération de 1,4-dioxane dans l'environnement était surtout associée à son usage comme stabilisateur pour les solvants chlorés, notamment le TCA. Les formulations de TCA utilisées pour cette fonction contenaient entre 1 et 10% de 1,4-dioxane, sur une base volumique. Conséquemment, les sources les plus importantes de 1,4-dioxane dans les eaux souterraines sont associées à l'utilisation du TCA, le déversement d'eaux usées, les déversements accidentels dans l'environnement et le mode de gestion des solvants (entreposage, élimination).

En 1996, la production de TCA a été bannie afin de préserver la couche d'ozone. Cependant, le 1,4-dioxane est encore produit aujourd'hui pour d'autres usages aux États-Unis et utilisé dans plusieurs produits industriels tels que les plastiques, les adhésifs, les résines, etc. L'utilisation annuelle de ce composé au Canada se situerait entre 10 000 et 100 000 kg. Il a également été utilisé comme dégivrant, agent mouillant et dispersant. On le trouve également sous la forme d'impureté dans des produits de soins personnels : savons, shampoings, détergents, etc. Des résidus de 1,4-dioxane peuvent également se retrouver dans des agents de conservation alimentaires, des produits d'emballage alimentaire, et aussi à l'intérieur de pesticides.

Les principales activités anthropiques générant une contamination potentielle de l'environnement par du 1,4-dioxane sont résumées au tableau 2.

Tableau 2 : Activités anthropiques et sources de contamination potentielle

<i>Utilisation</i>	<i>Exemple de produit*</i>		<i>Source</i>
Solvant dans la fabrication et le traitement chimique de nombreux produits, dont les suivants :	<i>plastiques</i>	<i>fumigènes</i>	<i>CCME, 2008; Environnement Canada et Santé Canada, 2010</i>
	<i>caoutchoucs</i>	<i>acétates de cellulose</i>	
	<i>adhésifs</i>	<i>produits pharmaceutiques</i>	
	<i>pâtes de bois</i>	<i>médicaments vétérinaires</i>	
	<i>pâtes à polir</i>	<i>produits de santé naturels</i>	
	<i>résines</i>	<i>laques</i>	
	<i>graisses</i>	<i>verniss</i>	
	<i>huiles</i>	<i>peintures</i>	
Produits domestiques (ingrédients ou impureté)	<i>colorants</i>	<i>cires</i>	<i>CCME, 2008; Environnement Canada et Santé Canada, 2010; Yanagida et al., 2006; Zenker et al., 2003; Abe, 1999; NICNAS, 1998</i>
	<i>agents de nettoyage et détergents</i>		
	<i>cosmétiques</i>		
	<i>désodorisants</i>		
	<i>shampoings</i>		
	<i>savons liquides (ex. : gels douche, bains moussants, etc)</i>		
	<i>crèmes hydratantes</i>		
Agent mouillant et dispersant	<i>industrie textile (catalyseur de polymérisation)</i>		<i>CCME, 2008</i>
Dégivrant (utilisé jusqu'en 2000)	<i>liquides de déglçage pour les avions</i>	<i>liquides antigel</i>	<i>Mohr et al., 2010</i>
Domaine médical et recherche	<i>liquide pour le comptage à scintillations</i>		<i>CCME, 2008</i>
	<i>spectroscopie</i>		
	<i>photochimie</i>		
	<i>réactif ou élément en chromatographie</i>		
	<i>agent déshydratant dans la préparation de coupes histologiques</i>		

* Liste non exhaustive et ne tenant pas compte de la proportion de dioxane dans le mélange

Les principales sources de 1,4-dioxane dans l'environnement sont:

- Les lieux où les solvants chlorés ou le 1,4-dioxane sont utilisés;
- Les eaux usées municipales ou industrielles;
- Les lixiviats des sites d'enfouissement;
- La mauvaise gestion des solvants chlorés usés
- Déversements et fuites accidentels.

COMPORTEMENT DU 1,4-DIOXANE DANS L'ENVIRONNEMENT

Le comportement du 1,4-dioxane dans l'environnement sera affecté par la composition et les propriétés du mélange ou du produit qui le contenait à l'origine, et le type d'utilisation de ce mélange ou de ce produit. Un modèle conceptuel qui présente le comportement général du 1,4-dioxane associé à un déversement de solvants chlorés (mélange de TCA et 1,4-dioxane) est présenté à la figure 1.

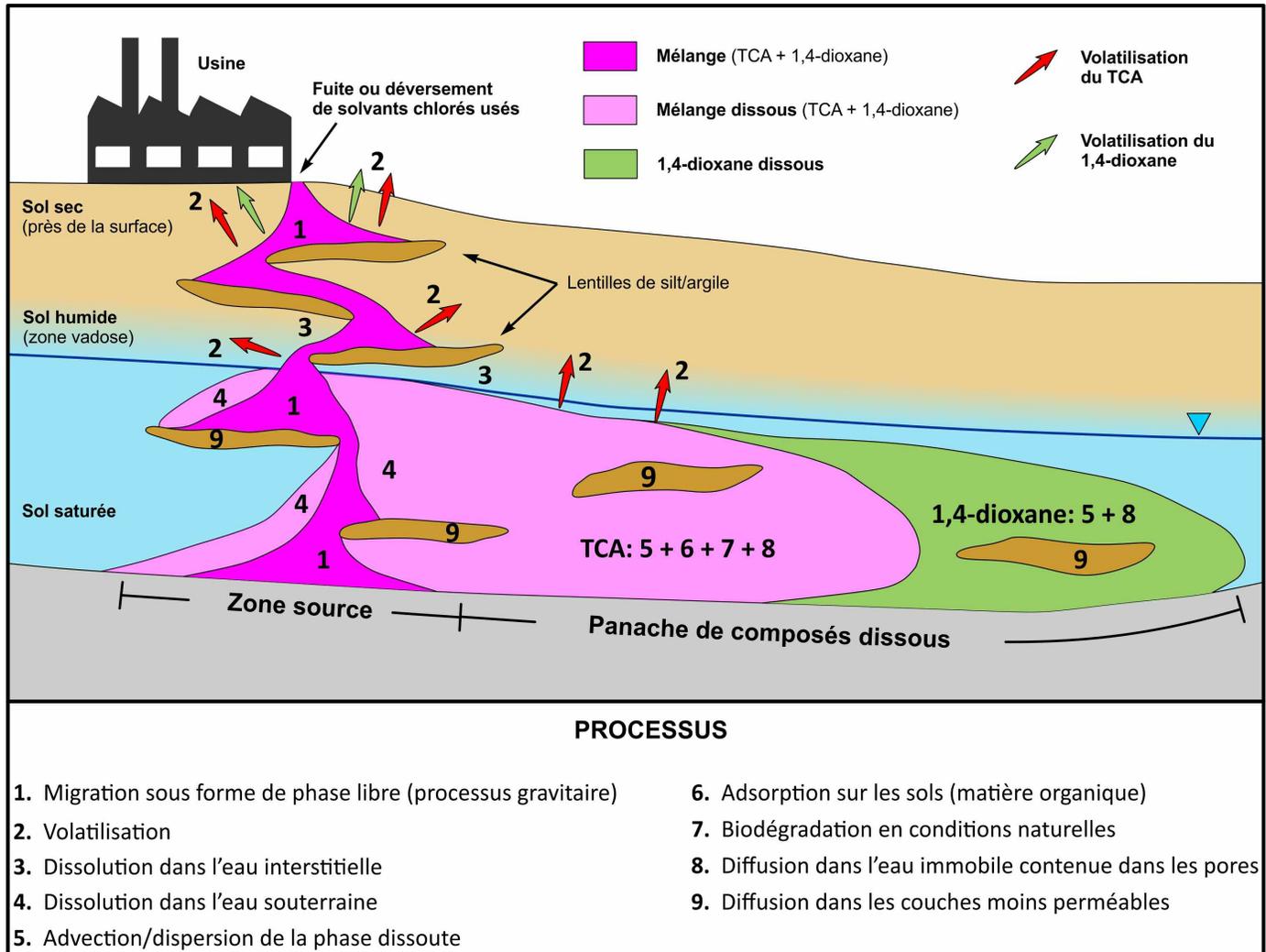


Figure 1 : Modèle conceptuel général de distribution du 1,4-dioxane dans l'eau souterraine (et comparaison avec le TCA)

Ce modèle conceptuel basé sur les propriétés physico-chimiques du 1,4-dioxane ne tient pas compte de l'historique de la contamination. Un historique différent pourrait par exemple entraîner un panache en solvants chlorés (ex. TCA) qui excède en longueur celui du 1,4-dioxane.

CRITÈRES, SEUILS ET NORMES POUR LE 1,4-DIOXANE UTILISÉS PAR DIFFÉRENTES JURIDICTIONS

Eau souterraine

Au Canada, Santé Canada ne propose pas de recommandation pour la qualité de l'eau potable au sujet du 1,4-dioxane, mais des travaux, en vue de l'élaboration d'une telle recommandation, ont été initiés.

Au Québec, il n'y a pas de norme pour le 1,4-dioxane prévue au Règlement sur la qualité de l'eau potable (RQEP) et la Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés (la Politique) ne prévoit pas de critère à son sujet pour la qualité des eaux souterraines.

En l'absence de recommandation canadienne et de norme québécoise pour la qualité de l'eau potable, l'Institut national de santé publique du Québec (INSPQ) considère que l'approche de l'EPA est la plus sécuritaire: 0,35 µg/L pour un risque de 1 cas de cancer additionnel pour 1 000 000 (communication personnelle, D. Gauvin, 2016-10-07).

De plus, la Politique ne présente pas de critère pour le 1,4-dioxane en ce qui a trait à la résurgence dans les eaux de surface ou infiltration dans les égouts (RESIE). Selon les « Critères de qualité de l'eau de surface au Québec », le critère RESIE serait de 28 000 µg/L en 1,4-dioxane dans l'eau.

Sols

Le Canada et le Québec ne possèdent pas de critère de qualité pour les sols impactés par le 1,4-dioxane.

LA STRATÉGIE À PRIVILÉGIER POUR LA CARACTÉRISATION D'UN SITE CONTAMINÉ EN 1,4-DIOXANE

Sites contaminés qui devraient faire l'objet d'analyses pour le 1,4-dioxane :

- Les sites qui sont connus pour avoir été contaminés au TCA;
- Les sites sur lesquels des panaches d'eau contaminée par les produits de dégradation du TCA, soit le dichloroacétate, le dichloroéthylène (DCE), le chloroéthane et le chlorure de vinyle;
- Les panaches contenant du dichlorométhane (DCM);
- Les panaches contenant du tétrachlorure de carbone, du TCE et du tetrachloroéthylène (PCE).

Localisation des puits d'observation permettant le suivi environnemental du 1,4-dioxane

Pour les panaches en solvants chlorés, le 1,4-dioxane devrait être d'abord analysé dans des échantillons prélevés à partir des puits d'observation existants. Ensuite, des puits d'observation additionnels pourraient être aménagés en aval hydraulique des limites du panache, en accord avec un modèle conceptuel et une carte piézométrique détaillée du secteur.

Si aucun puits d'observation n'existe sur le site potentiellement contaminé et le panache qui y serait potentiellement associé, alors une campagne de caractérisation ciblant les solvants chlorés et le 1,4-dioxane devrait être entreprise. Les recommandations du guide de caractérisation des terrains quant à l'aménagement de puits en amont et en aval des sites contaminés doivent être suivies (Gouvernement du Québec, 2003).

Échantillonnage des sols lors des forages

En raison des propriétés du 1,4-dioxane, qui favorise sa dissolution et son transport dans l'eau souterraine, la masse de 1,4-dioxane associée au sol peut être difficile à quantifier, et les analyses de sol peuvent donc être d'une utilité limitée.

Dans les cas où les concentrations sont susceptibles d'être les plus importantes (par exemple à l'intérieur

d'une zone source), alors les sols devraient être échantillonnés en continu sur toute l'épaisseur de l'aquifère contaminé et analysé pour les solvants chlorés et le 1,4-dioxane. Dans les secteurs où la présence de liquide immiscible dense est suspectée, des précautions devraient être prises afin d'éviter d'entraîner la contamination à de plus grandes profondeurs.

Méthode d'aménagement des puits d'observation

L'aménagement des puits d'observation pour le suivi environnemental du 1,4-dioxane devrait être réalisé conformément aux pratiques standards utilisées pour le suivi des solvants chlorés. Si le panache d'eau contaminée recoupe plusieurs unités hydrostratigraphiques (ex. roc, till, sable), alors l'aménagement des puits devrait permettre d'échantillonner individuellement ces différentes unités.

Fréquence d'échantillonnage

Un suivi semestriel des concentrations en phase dissoute est recommandé. Les périodes de l'année où les niveaux d'eau sont les plus bas (ex. mars) et les plus hauts (ex. octobre) devraient être privilégiées.

PRÉCAUTIONS À PRENDRE LORS DE L'ÉCHANTILLONNAGE

Échantillonnage de sols

L'échantillonnage des sols doit être fait conformément au Cahier 5 du Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales du Centre d'expertise en analyses environnementales du Québec (CEAEQ) (MDDEP, 2008 (révisé en 2010)). De plus, conformément aux recommandations dans la méthode d'analyse MA-400 du CEAEQ, il est recommandé de placer l'échantillon dans un pot en verre ambré ou recouvert d'un papier d'aluminium étant donné que le 1,4-dioxane est photodégradable. Le laboratoire d'analyse devrait être contacté pour l'obtention des contenants requis à l'échantillonnage. Puisqu'il est non volatil en présence d'eau, un espace d'air dans le pot ne changera en rien le résultat d'analyse d'un sol humide. Par contre, si le sol est sec il est préférable de remplir complètement le pot. Puisque le 1,4-dioxane peut se retrouver dans le détergent, il est recommandé de vérifier sa présence a priori avant la campagne d'échantillonnage et de prendre des blancs de lavage d'équipement plus souvent sur le terrain pendant la prise d'échantillons afin de s'assurer qu'il n'y a pas de résidus de 1,4-dioxane sur les équipements d'échantillonnage. Une bonne pratique serait de faire l'analyse à l'intérieur d'une période de 24 heures comme pour les solvants si le sol est sec et de 1 mois si le sol est humide. Les échantillons devraient être conservés au frigo ou au congélateur.

Échantillonnage de l'eau du robinet

Le laboratoire d'analyse devrait être contacté pour l'obtention des contenants et réactifs requis à l'échantillonnage. Il est recommandé d'ouvrir le robinet et de laisser couler l'eau jusqu'à ce que la température soit stable (5 minutes approximativement) avant de prélever l'échantillon, tout en prenant soin de ne pas remplir complètement la bouteille afin de ne pas perdre le réactif de déchloration qu'elle contient. Une fois le bouchon vissé, bien agiter la bouteille jusqu'à ce que le sulfite de sodium soit dissous. Ajouter ensuite du bisulfate de sodium pour que la concentration finale soit de 1 g/L. Fermer la bouteille et agiter la jusqu'à la dissolution complète du bisulfate de sodium. À moins d'une vérification du pH sur le terrain, il faut conserver la bouteille fermée jusqu'à son extraction au laboratoire. Un espace d'air peut être laissé dans la bouteille suite à l'ajout du bisulfate de sodium.

La méthode EPA522 suggère (optionnel) de vérifier le pH de l'eau échantillonnée (après l'acidification et le mélange) sur le terrain afin de bien doser la quantité de bisulfate de sodium (< pH 4).

Méthode d'échantillonnage de l'eau souterraine

L'échantillonnage de l'eau souterraine doit être fait conformément au Cahier 3 du Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales du CEAEQ (2010 pour l'édition révisée). Le laboratoire d'analyse devrait être contacté pour l'obtention des contenants et réactifs requis à l'échantillonnage. En raison des propriétés physico-chimiques du 1,4-dioxane dans l'eau, la plupart des méthodes d'échantillonnage connues sont applicables pour ce composé. Cependant, conformément aux recommandations du Cahier 3, les méthodes favorisant un faible débit et un faible rabattement devraient être privilégiées. Les méthodes existantes les plus courantes sont les suivantes :

- Échantillonnage ponctuel avec une écope;
- Échantillonnage à fort débit avec pompe à inertie (Watterra);
- Pompe péristaltique avec échantillonnage à fort ou faible débit;
- Pompe à vessie avec échantillonnage à fort ou faible débit;
- Sac de diffusion passif (SDP) en polyéthylène;
- Échantillonneur discret (Snap sampler);
- Échantillonneur statique passif par diffusion (sans purge);
- Échantillonnage à fort débit à l'aide d'une pompe submersible.

Méthode d'échantillonnage pour l'eau de surface

La méthode d'échantillonnage d'eau de surface est la même que pour les contaminants organiques, et les contenants et préservatifs sont les mêmes que pour les eaux souterraines.

Méthodes analytiques en laboratoire

La méthode d'analyse utilisée au CEAEQ est la méthode MA 400 1,4-dioxane 1.0. Cette méthode analyse uniquement le 1,4-dioxane par chromatographie en phase gazeuse couplée à un spectromètre de masse suite à une extraction liquide au dichlorométhane. Le 1,4-dioxane-*d8* est utilisé comme étalon de recouvrement et le résultat obtenu est corrigé en tenant compte du recouvrement de cet étalon marqué. La limite de détection est de 0,1 µg/L.

De plus, l'EPA a développé la méthode 522 spécifiquement pour le 1,4-dioxane dans l'eau. Cette méthode est employée par des laboratoires commerciaux au Québec et par l'Institut national de la recherche scientifique (INRS) qui offrent cette analyse. Cette méthode exige d'extraire l'échantillon d'eau sur une phase solide (SPE) avant d'en faire l'analyse par chromatographie en phase gazeuse (CG) couplée à une spectrométrie de masse (SM) et comprenant le suivi d'un ion sélectionné (SIM) pour augmenter la sensibilité du détecteur SM (Lancaster 2003). Plusieurs autres méthodes standards, approuvées et/ou développées par l'EPA aux États-Unis sont aussi disponibles.

MÉTHODES DE TRAITEMENT EXISTANTES POUR LES SOLS ET LES EAUX SOUTERRAINES (MÉTHODES *IN SITU* ET *EX SITU*)

Bien que souvent associé à la présence de solvants chlorés (TCA, TCE, etc.), les technologies de traitement des sols et des eaux souterraines qui sont reconnues comme étant efficaces pour les solvants chlorés peuvent ne pas être efficaces pour le traitement du 1,4-dioxane, en raison de ses propriétés physico-chimiques différentes.

Traitement des sols

En raison des propriétés du 1,4-dioxane, celui-ci aura tendance à migrer rapidement à travers la zone non-saturée des sols et se retrouver dans l'eau souterraine. En raison de la grande affinité qui existe entre le 1,4-dioxane et l'eau interstitielle qui constitue l'humidité du sol, les sols doivent être asséchés par le système de ventilation forcée pour que l'enlèvement du 1,4-dioxane puisse être efficace.

Dans la zone saturée des sols, en raison de la grande solubilité dans l'eau du 1,4-dioxane, les technologies de lavage des sols à l'aide de solutions aqueuses (surfactant, alcool) ou d'oxydation chimique *in situ* peuvent s'appliquer dans la zone source de contamination.

Le traitement thermique *ex situ* des sols excavés est une technologie efficace pour l'enlèvement du 1,4-dioxane. Dans ce cas, la chaleur augmente la pression de vapeur du 1,4-dioxane (ce qui le rend plus volatil) et augmente aussi sa constante de Henry (donc sa tendance à transférer dans l'air). Cependant, le traitement doit parvenir à éliminer l'humidité des sols de façon à pouvoir volatiliser le 1,4-dioxane dans l'air lors du traitement des sols.

Traitement de l'eau souterraine

Il existe deux approches différentes pour le traitement de l'eau souterraine contaminée par le 1,4-dioxane :

- Le contrôle hydraulique et le traitement *ex situ* de l'eau souterraine extraite (système de « pompage et traitement »);
- Le traitement *in situ* de l'eau souterraine à l'intérieur de la portion contaminée de l'aquifère.

Dans le cas du contrôle hydraulique, des puits de pompage assurent le captage de l'eau souterraine contaminée qui est ensuite traitée en surface par un procédé *ex situ*. Les technologies permettant le traitement de l'eau extraite par des procédés *ex situ* sont principalement l'oxydation chimique (combinaison de peroxyde d'hydrogène et d'ozone, combinaison de peroxyde d'hydrogène et d'ultraviolets, persulfate de sodium ou oxydation photo-catalytique), l'adsorption sur résine et un réacteur biologique.

Le traitement de l'eau souterraine par un procédé *in situ* peut être appliqué sur l'étendue d'une zone source, ou à l'intérieur du panache d'eau contaminée (sur toute sa superficie, ou sur une partie de celle-ci, sous forme de barrière de traitement). La principale technologie *in situ* utilisée pour le traitement du 1,4-dioxane dans l'eau souterraine est l'oxydation chimique. Des procédés commerciaux utilisent une approche d'oxydation chimique avancée, qui fait intervenir plus d'un réactif. Le peroxyde d'hydrogène et l'ozone (perozone) ou le persulfate de sodium avec catalyseur sont utilisés commercialement.

Une approche *in situ* par traitement thermique (ex. chauffage par résistivité électrique ou par injection de vapeur) peut également être utilisée pour le traitement de l'eau souterraine.

D'autres approches de traitement *in situ* sont au stade expérimental et ne font pas l'objet d'application à grande échelle. Parmi celles-ci, les plus intéressantes sont la phytoremédiation et la bioaugmentation associée à un bio-barbotage à l'aide de propane, qui constitue une source de carbone pour les microorganismes.

Suivi de l'atténuation naturelle

Le suivi de l'atténuation naturelle est une option de gestion d'un panache d'eau souterraine contaminée. Une telle approche peut être intéressante dans les cas où aucune autre approche de réhabilitation active n'est applicable. Ce mode de gestion implique un suivi périodique et à long terme de l'évolution de la concentration en 1,4-dioxane sur l'ensemble du panache. Il s'agit de déterminer, à partir des données du suivi, si le panache

en composé dissous est en extension ou en récession. Certaines études ont déjà confirmé l'existence de processus de biodégradation du 1,4-dioxane à l'aide d'outils avancés de biologie moléculaire et d'isotopes. Des méthodes sont actuellement en développement pour identifier des biomarqueurs qui sont indicateurs de la biodégradation du 1,4-dioxane.

RÉFÉRENCES SÉLECTIONNÉES

Abe, A. (1999). *Distribution of 1,4-dioxane in relation to possible sources in the water environment*. The Science of the Total Environment, n° 227, p. 41-47.

Conseil canadien des ministres de l'Environnement (CCME) (2008). *Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux : protection de la vie aquatique : 1,4-dioxane*, [En ligne] <http://cegg-rcqe.ccme.ca/download/fr/225> (Page consultée le 9 février 2016).

Environnement Canada et Santé Canada (2010). *Évaluation préalable pour le Défi concernant le 1,4-Dioxane*, Numéro de registre du Chemical Abstracts Service 123-91-1. [En ligne]. http://ec.gc.ca/ese-ees/789BC96E-F970-44A7-B306-3E32419255A6/batch7_123-91-1_fr.pdf (Page consultée le 9 février 2016).

Gouvernement du Québec, 2003. *Guide de caractérisation des terrains*, Les Publications du Québec, 130 p.

Horst, J.F. (2005). *Comments on draft Treatment technologies for 1, 4-Dioxane: fundamentals and field applications*. ARCADIS.

Jacobs, J.A. (2013). *Contaminant Update and Book Review of Environmental Investigation and Remediation: 1,4-Dioxane and Other Solvent Stabilizers*, [En ligne]. <http://the14dioxanebook.com/bookreview.pdf> (Page consultée le 9 février 2016).

Li, M. (2016). *Bench-scale Assessment of Monitored Natural Attenuation and Biostimulated Treatments of 1,4-Dioxane at a Contaminated Site*, Proceedings of the 2016 Emerging Contaminants Summit, [En ligne]. <http://www.contaminantssummit.com/210> (Page consultée le 26 avril 2016).

Li, M. et al. (2010). *1,4-Dioxane biodegradation at low temperatures in Arctic groundwater samples*, Water research, 44, p.2894-2900.

Lippincott, D. et al. (2015) *Bioaugmentation and Propane Biosparging for In Situ Biodegradation of 1,4-Dioxane*, Groundwater Monitoring & Remediation 35, no. 2, p. 81–92.

Massachusetts Department of Environmental Protection (MassDEP) (2015). *Guidance on Sampling and Analysis for 1,4-Dioxane at Disposal Sites Regulated under the MCP*, [En ligne]. <http://170.63.70.137/eea/docs/dep/cleanup/laws/guidance-on-sampling-for-1-4-dioxane.pdf> (Page consultée le 26 avril 2016).

Massachusetts Department of Environmental Protection (MassDEP) (2015). *MassDEP Fact Sheet – 1,4-Dioxane in Drinking Water: Questions and Answers*, [En ligne]. <http://www.mass.gov/eea/docs/dep/water/drinking/standards/dioxane-fs.pdf> (Page consultée le 26 avril 2016).

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 2008. *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales, Cahier 3 – Échantillonnage des eaux souterraines*, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, édition courante. 90 p.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 2008 (révisé en 2010). *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales, Cahier 5 – Échantillonnage des sols*, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, édition courante. 66 p.

Mohr, T. K.G. (2010). *Environmental investigation and remediation : 1,4-dioxane and other solvent stabilizers*, CRC Press Taylor and Francis Group, (ISBN 978-1-56670-662-9), 503 p.

Oberley, D. et al. (2015). *In Situ Remediation of 1,4-Dioxane Using Electrical Resistance Heating*. *Remediation journal* 25, Issue 2, p.35-42.

PubChem (2016). *Compound Summary for 1,4-dioxane*, [En ligne]. https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/1_4-dioxane#section=Top (Page consultée le 9 février 2016)

United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2016). *The Third Unregulated Contaminant Monitoring Rule (UCMR 3) Data Summary*, [En ligne]. https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-11/documents/ucmr3_data_summary.pdf (Page consultée le 5 janvier 2016).

United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2014). *Technical Fact Sheet – 1,4-dioxane*, [En ligne]. https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-03/documents/ffrro_factsheet_contaminant_14-dioxane_january2014_final.pdf (Page consultée le 26 avril 2016).

Water Research Foundation (2014). *1,4-dioxane white paper*. [En ligne]. <http://www.waterrf.org/resources/StateOfTheScienceReports/1,4-dioxane.pdf> (Page consultée le 5 janvier 2016).

Yanagida, S., Nakajima, A., Kameshima, Y. and Okada, K. (2006). *Effect of applying voltage on photocatalytic destruction of 1,4-dioxane in aqueous system*. *Catalysis Communications*, n°7, p. 1042-1046.

Zenker, M.J., et al. (2003). *Occurrence and Treatment of 1,4-Dioxane in Aqueous Environments*, *Environmental Engineering Science*, vol.20 n° 5 p. 423-432.