



Canadian Council of Ministers
of the Environment Le Conseil canadien
des ministres
de l'environnement

**PROTOCOLE D'ÉLABORATION DE
RECOMMANDATIONS POUR LA QUALITÉ DES EAUX
SOUTERRAINES POUR UTILISATION SUR LES SITES
CONTAMINÉS**

**PN 1534
ISBN 978-1-77202-016-8 PDF**

Le CCME est le principal forum intergouvernemental qui, sous la direction des ministres de l'Environnement, mène une action concertée dans des dossiers environnementaux d'intérêt national et international.

Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME)
123, rue Main, pièce 360
Winnipeg (Manitoba) R3C 1A3
(204) 948-2090

www.ccme.ca

This document is also available in English under the title A Protocol for the Derivation of Groundwater Quality Guidelines for Use at Contaminated Sites

PN 1534
ISBN 978-1-77202-016-8 PDF

© Conseil canadien des ministres de l'environnement, 2015

INVITATION À COMMENTER

Le présent protocole a été publié sous la forme d'un document de travail afin de permettre l'application et la mise à l'essai des méthodes révisées. Le CCME reconnaît que des améliorations ou des changements pourraient devenir nécessaires ou souhaitables à mesure que s'enrichiront nos connaissances scientifiques des problèmes liés aux sites contaminés.

Les lecteurs qui souhaitent commenter le présent document sont invités à le faire en écrivant à l'adresse suivante :

Conseil canadien des ministres de l'Environnement
123, rue Main, bureau 360
Winnipeg (Manitoba) R3C 1A3
Télécopieur : 204-948-2125
Courriel : info@ccme.ca

AVIS

Le présent document expose les motifs qui justifient l'élaboration de recommandations pour la qualité des eaux souterraines en fonction de l'environnement et de la santé humaine applicables aux sites contaminés du Canada. Il se veut un document accompagnateur au Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des sols en fonction de l'environnement et de la santé humaine (CCME, 2006) sur lequel il est basé. Le présent document vise uniquement à fournir une orientation générale, et non à établir des droits ou des obligations juridiques ni à influencer sur ceux qui sont en vigueur. Il n'a pas pour objet d'établir une norme obligatoire, ni d'interdire les solutions différentes de celles qu'il propose, et ne vise pas à influencer de manière déterminante sur les questions abordées. Les décisions applicables à tout cas particulier seront prises dans le respect des lois et des règlements en vigueur, sur la base de faits précis, lorsque des règlements seront promulgués, ou des permis délivrés.

VUE D'ENSEMBLE

Depuis la fin des années 1980, le Conseil canadien des ministres de l'environnement (CCME) s'active à établir un cadre national pour l'évaluation et l'assainissement des sites contaminés au Canada ainsi que pour l'élaboration d'outils scientifiques en vue d'assurer une démarche cohérente et de fournir des orientations. Le CCME a déterminé qu'il était nécessaire d'élaborer des recommandations canadiennes pour la qualité des eaux souterraines, lesquelles seront ajoutées à l'ensemble existant de Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement. Les Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux souterraines seront utilisées dans les sites contaminés, parallèlement aux Recommandations canadiennes pour la qualité des sols et les Recommandations pour la qualité des vapeurs des sols.

Le présent protocole examine les effets de l'exposition aux eaux souterraines contaminées sur les récepteurs humains et écologiques. Les voies d'exposition et les récepteurs pris en compte lors de l'élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines ont été sélectionnés d'après les scénarios d'exposition contenus dans le Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des sols en fonction de l'environnement et de la santé humaine (CCME, 2006). Le présent protocole représente une version distincte et abrégée du document CCME (2006) duquel ont été extraits les éléments clés (stratégiques et techniques) requis en vue de l'élaboration de recommandations propres aux eaux souterraines. Contrairement aux recommandations pour la qualité des sols, les recommandations pour la qualité des eaux souterraines sont indépendantes de l'utilisation des terrains, sauf dans le cas de l'exposition indirecte des êtres humains par l'intermédiaire d'une infiltration dans l'air intérieur de contaminants volatils provenant des eaux souterraines. En effet, pour cette voie d'exposition, des recommandations sont établies pour un scénario agricole/résidentiel et un scénario commercial/industriel.

Des procédures d'élaboration de recommandations pour la qualité des eaux souterraines ont été établies soit pour maintenir des utilisations spécifiques des eaux souterraines (eau d'irrigation ou eau potable), soit pour protéger les récepteurs dans l'environnement qui entrent directement ou indirectement en contact avec des eaux souterraines contaminées sous l'effet de la migration des contaminants (p. ex. les plans d'eau de surface ou l'intrusion de vapeurs dans les sous-sols). Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines ne visent pas à protéger les organismes vivant dans les aquifères, mais plutôt à protéger les utilisations d'eau souterraine ou les récepteurs situés en aval.

Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines sont principalement élaborées à partir de valeurs de référence existantes (p. ex. les Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux) et de rétrocalculs d'une concentration d'eau souterraine au moyen de modèles sur le devenir et le transport, qui n'entraînent pas de dépassement de la valeur de référence après que le contaminant ait atteint le milieu concerné (p. ex. un plan d'eau de surface). Dans les cas où l'exposition aux eaux souterraines se fait par l'intermédiaire d'eau de puits non traitée, la valeur de référence (p. ex. les Recommandations canadiennes pour la qualité de l'eau potable) est adoptée directement en tant que recommandation pour la qualité des eaux souterraines.

Le présent protocole aborde l'exposition aux eaux souterraines selon quatre scénarios :

- transport dans la zone saturée vers les eaux de surface;

- élévation de la nappe phréatique dans les sols peu profonds;
- migration des vapeurs vers l'air intérieur;
- utilisation de l'eau d'un puits.

La recommandation générique finale pour la qualité des eaux souterraines est fondée sur la valeur la plus basse générée par les approches axées sur l'environnement et la santé humaine. À l'échelle d'un site, les recommandations peuvent être modifiées de manière à tenir compte des conditions propres au site. Pour plus de détails sur l'établissement d'objectifs spécifiques aux sites, veuillez consulter la section 1.1 de CCME (2006), les suggestions présentées dans ce document et dans le 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 (CCME, 1996a).

Table des matières

Invitation à commenter	ii
Avis	ii
Vue d'ensemble	iii
Remerciements	ix
Structure du document	ix
Liste des acronymes et des abréviations les plus fréquents	x
Glossaire	xi
PARTIE A.....	1
1. Historique et contexte	1
2. Cadre de travail pour l'établissement de recommandations pour la qualité des eaux souterraines	2
2.2 Principes directeurs	3
2.3 Utilisations de l'eau	4
2.4 Utilisation des terrains.....	4
2.5 Classification chimique	4
2.6 Type de sol	5
2.7 Sommaire du processus d'élaboration des recommandations.....	5
3. Utilisation des recommandations canadiennes pour la qualité des eaux souterraines.....	6
3.1 Renseignements généraux	6
3.2 Cadre de travail multiniveau	7
3.3 Limites liées à l'utilisation des recommandations numériques génériques	9
4. Déviations par rapport au Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des sols en fonction de l'environnement et de la santé humaine.....	11
PARTIE B.....	12
1. Élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines en fonction de l'environnement.....	12
2. Niveau de protection écologique et paramètres pertinents.....	12
2.1 Niveau de protection écologique.....	12
2.2 Choix des paramètres écologiquement pertinents	13
3. Hypothèses sur les scénarios d'exposition	13
3.1 Voies d'exposition et récepteurs	13
3.1.1 Exclusion de voies d'exposition.....	15
3.2 Vocation du terrain.....	15
4. Processus d'élaboration des recommandations	16
4.1 Revue de la documentation scientifique et exigences relatives aux données	16
4.2 Élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines fondées sur le contact avec l'eau souterraine	16
4.2.1 RQES _{CES} fondée sur les concentrations dans l'eau interstitielle.....	18

4.2.2 Exclusion de la voie de contact direct avec le sol et profondeur d'enracinement	18
4.2.3 Modèle conceptuel pour les espèces végétales non phréatophytes	20
4.2.4 Résumé du processus d'élaboration des RQES _{CES}	23
4.3 Élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines fondées sur la protection de la vie aquatique	24
4.3.1 Version du modèle variable en fonction du temps ou fondée sur l'état d'équilibre	25
4.3.2 Versions à source épuisable ou non épuisable du modèle	25
4.3.3 Guide d'établissement du taux de dégradation dans l'eau souterraine	26
4.3.4 Applicabilité de la dégradation en eau souterraine.....	28
4.4 Élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines en vue de la protection de l'eau d'abreuvement du bétail et de l'eau d'irrigation.....	28
4.5 Examen de voies d'exposition supplémentaires	29
PARTIE C.....	30
1. Élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines en fonction de la santé humaine.....	30
1.1 Introduction	30
1.2 Principes directeurs	31
1.3 Analyse de la toxicologie du contaminant.....	31
1.4 Exposition aux contaminants	32
1.5 Relations entre les recommandations pour la qualité des eaux souterraines et les recommandations relatives aux sols et à l'eau	32
2. Scénarios et voies d'exposition	32
2.1 Hypothèses sur l'exposition	33
2.1.1 Contaminants à seuil d'effet.....	33
2.1.2 Contaminants sans seuil d'effet	35
2.2 Absorption de substances chimiques par le corps	35
2.3 Récepteurs et voies d'exposition	35
3. Processus d'élaboration des recommandations en fonction de la santé humaine.....	36
3.1 Recommandations pour la protection des sources d'eau souterraine potable	36
3.2 Recommandations pour la protection de la qualité de l'air intérieur.....	36
PARTIE D.....	40
1. Élaboration de la recommandation définitive pour la qualité des eaux souterraines.....	40
1.1 Élaboration de la recommandation définitive	40
1.2 Considérations autres que la toxicité – Limites liées à la gestion	41
1.3 Produits de dégradation	42
1.4 Évaluation en fonction des concentrations de fond et des limites pratiques de quantification	42

1.5	Présentation des recommandations pour la qualité des eaux souterraines	43
1.6	Documents scientifiques justificatifs.....	44
	RÉFÉRENCES.....	44
	ANNEXE A - RÉSUMÉ DES MODÈLES ET DES ÉQUATIONS UTILISÉS AUX FINS DE L'ÉLABORATION DES RECOMMANDATIONS POUR LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES.....	47
	ANNEXE B - PARAMÈTRES PAR DÉFAUT DE L'ÉLABORATION DES RECOMMANDATIONS	53

Liste des tableaux

Tableau 1. Comparaison des voies d'exposition des recommandations pour la qualité des eaux souterraines et des sols	14
Tableau 2. Exemple de présentation des recommandations pour la qualité des eaux souterraines	43
Tableau B.1 Caractéristiques du récepteur humain	53
Tableau B.2 Paramètres pédologiques et hydrogéologiques	54
Tableau B.3 Caractéristiques du site et autres paramètres	56
Tableau B.4 Paramètres de construction	57

Liste des figures

Figure 1 : Récepteurs et voies d'exposition pris en compte pour l'élaboration des recommandations.....	6
Figure 2 : Exemple de représentation graphique de la concentration dans le sol de la zone vadose selon le modèle d'inondations multiples	22
Figure 3 : Élaboration conceptuelle de la recommandation pour la qualité des eaux souterraines relative aux substances chimiques à seuil d'effet d'après l'évaluation de l'exposition à plusieurs milieux et d'après le facteur de répartition présumé dans la dose journalière résiduelle admissible (DJRA).....	34
Figure 4. Conditions entre la source et le bâtiment permettant l'utilisation des recommandations relatives à la qualité de l'air intérieur.	38
Figure 5 : Aperçu des étapes menant à l'élaboration d'une recommandation définitive pour la qualité des eaux souterraines.....	40

REMERCIEMENTS

Le présent protocole relatif à la qualité des eaux souterraines est principalement fondé sur le Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des sols en fonction de l'environnement et de la santé humaine (2006). David Williams et Ian Mitchell, de Meridian Environmental Inc., ainsi que Miles Tindal, d'Axiom Environmental Inc. ont été les principaux responsables de l'adaptation du protocole relatif à la qualité des sols pour produire les valeurs visant les eaux souterraines, et de la conception de nouvelles méthodes d'élaboration de recommandations visant spécifiquement les eaux souterraines. Des commentaires pertinents ont été fournis par des membres du Groupe de travail sur les recommandations pour la qualité des sols du CCME, de même que dans le cadre d'examen publics du document.

STRUCTURE DU DOCUMENT

Le présent document se divise en quatre parties, conformément au Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des sols en fonction de l'environnement et de la santé humaine (CCME, 2006). Un glossaire est présenté au début du document. La partie A présente des informations générales sur l'élaboration du protocole, y compris une description des outils scientifiques qui ont été mis au point pour faciliter l'évaluation et l'assainissement des sites contaminés au Canada. Elle contient également des informations sur les principes qui sous-tendent le protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des eaux souterraines. Les parties B et C décrivent les processus d'élaboration des recommandations en fonction de l'environnement et de la santé humaine. La partie D conclut en donnant des consignes sur l'élaboration de recommandations définitives pour la qualité des eaux souterraines. Nous présentons enfin, en annexe, les équations et les paramètres d'entrée du modèle.

LISTE DES ACRONYMES ET DES ABRÉVIATIONS LES PLUS FRÉQUENTS

CA	Concentration admissible
CCME	Conseil canadien des ministres de l'Environnement
CCRS	Concentration correspondant à un risque spécifié
CMEO	Concentration minimale avec effet observé
DCRS	Dose correspondant à un risque spécifié
DJA	Dose journalière admissible
DJE	Dose journalière estimée
DJRA	Dose journalière résiduelle admissible
GTRQS	Groupe de travail sur les recommandations pour la qualité des sols
LPNA	Liquide en phase non aqueuse
RCQE	Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement
RQES	Recommandation pour la qualité des eaux souterraines
RQES _{CES}	Recommandations pour la qualité des eaux souterraines fondées sur le contact avec l'eau souterraine pour les organismes inféodés au sol
RQES _{VAD}	Recommandations pour la qualité des eaux souterraines en vue de la protection de la vie aquatique d'eau douce
RQES _{VAM}	Recommandations pour la qualité des eaux souterraines en vue de la protection de la vie aquatique marine
RQES _{EA}	Recommandations pour la qualité des eaux souterraines en vue de la protection de l'eau d'abreuvement
RQES _{IR}	Recommandations pour la qualité des eaux souterraines en vue de la protection de l'eau d'irrigation
RQES _{EP}	Recommandations pour la qualité des eaux souterraines en vue de la protection de l'eau souterraine potable
RQES _{QAI-R}	Recommandations pour la qualité des eaux souterraines relative à la protection de la qualité de l'air intérieur – bâtiments résidentiels
RQES _{QAI-C}	Recommandation pour la qualité des eaux souterraines relative à la protection de la qualité de l'air intérieur – bâtiments commerciaux
RQES _G	Recommandation pour la qualité des eaux souterraines tenant compte des aspects liés à la gestion
RQES _D	Recommandation définitive pour la qualité des eaux souterraines
RQS _{CS}	Recommandations pour la qualité des sols fondées sur le contact avec le sol pour les organismes inféodés au sol.
SP-HCP	Le standard pancanadien relatif aux hydrocarbures pétroliers dans le sol
S.O.	Sans objet
USEPA	United States Environmental Protection Agency
VTR	Valeurs toxicologiques de référence

GLOSSAIRE

Cette section présente quelques termes qui sont propres au présent protocole relatif aux eaux souterraines. Un glossaire plus complet se trouve dans le Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des sols en fonction de l'environnement et de la santé humaine (CCME, 2006) et les Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement (1999).

Alimentation : Phénomène survenant lorsque la quantité d'eau dans la zone non saturée devient suffisamment élevée pour percoler vers la nappe phréatique, habituellement après l'infiltration d'eau de fonte ou de pluie dans les sols superficiels. Exprimée sous forme de bilan, l'alimentation égale les précipitations totales moins le ruissellement de surface et l'évapotranspiration.

Approche fondée sur le risque : Une procédure utilisée pour cerner les aspects qualitatifs de l'identification du danger, et généralement une détermination quantitative du niveau de risque fondée sur des techniques déterministes ou probabilistes.

Aquifère : Formation géologique saturée d'eau, suffisamment perméable pour transporter et fournir de l'eau en quantités utilisables.

Aquifère libre : Aquifère qui n'est pas séparé du sol par une couche imperméable ou peu perméable comme l'argile. Ces formations permettent le drainage de l'eau de porosité du sol, dont les interstices vidés de l'eau en mouvement peuvent ensuite s'emplier d'air (ou d'eau).

Assainissement : Gestion d'un site contaminé pour prévenir, réduire au minimum ou atténuer les atteintes à la santé humaine ou à l'environnement. L'assainissement peut inclure des actions physiques directes (p. ex., l'élimination, la destruction ou le confinement des contaminants,) et des mesures de contrôle institutionnelles (p. ex., par zonage ou décret).

Biodégradation : Décomposition microbiologique (p. ex., résultant de l'action de bactéries, de levures et de champignons) qui altère chimiquement la structure d'une substance, le résultat étant le bris en substances chimiques plus simples.

Biote : Ensemble des organismes vivants, incluant les plantes, les micro-organismes, les invertébrés et les animaux.

Cadre de travail multiniveau : Un système de recommandations fondé sur plusieurs approches (niveaux) pour établir des objectifs d'assainissement. Le même degré de protection s'applique indépendamment du niveau choisi, mais en permettant l'établissement d'objectifs d'assainissement plus réalistes par la collecte de données additionnelles provenant de sites individuels.

Cancérogène : Substance chimique ou agent capable d'induire le cancer ou d'en accroître l'incidence. Il peut aussi agir sur une population de façon à y modifier la fréquence totale du cancer, qu'il s'agisse du nombre de tumeurs ou de la distribution du cancer en fonction de l'organe touché ou de l'âge des sujets.

Coefficient de solubilité : Concentration maximale d'une substance que l'on peut dissoudre dans l'eau lorsque cette eau est en contact et en équilibre avec la substance pure.

Concentration admissible : Une estimation (avec un *degré d'incertitude* pouvant couvrir un ordre de grandeur) de la concentration d'une substance chimique à laquelle la population humaine, incluant les sous-groupes sensibles, peut être exposée par inhalation continue sans risque appréciable d'effets nocifs au cours d'une vie. La concentration admissible ne peut être déterminée que pour les substances dont l'effet potentiel est non cancérogène.

Concentration de fond (ambiante et naturelle) :

Concentration ambiante : concentration naturelle, représentative d'un contaminant dans le sol ou dans l'eau. Les concentrations naturelles peuvent refléter les variations géologiques naturelles dans les régions relativement peu industrialisées ou l'influence générale de l'industrie ou de l'urbanisation dans une région.

Concentration naturelle : concentration naturelle, représentative d'une substance dans l'environnement. Reflète les variations géologiques naturelles.

Contaminant : Toute substance chimique présente dans un milieu environnemental (p. ex., l'eau, l'air ou le sol) à une concentration supérieure à la concentration naturelle de fond.

Contaminant à seuil d'effet : Contaminant pour lequel il existe une dose ou une concentration au-dessous de laquelle on ne s'attend à aucun effet nocif.

Contaminant sans seuil d'effet : Contaminant pour lequel on considère qu'il existe un risque, quel que soit le niveau d'exposition (c.-à-d. qu'on présume qu'il n'y a aucun seuil pour cet effet).

Dégradation : Décomposition chimique, physique et biologique de contaminants.

Distances de recul : Distance minimale entre la source de contamination et le récepteur à l'intérieur de laquelle les recommandations ne s'appliquent pas en raison des limites des modèles de transport ou de l'invalidation d'autres hypothèses relatives aux recommandations.

Dose journalière admissible (DJA) : Degré ou valeur de l'exposition d'une personne à une substance chimique, à laquelle ne correspond aucun effet nocif prévu. La dose journalière admissible ne peut être déterminée que pour les substances dont les effets présentent un seuil (c.-à-d., non cancérogènes).

Eau domestique : Eau utilisée par les êtres humains à des fins domestiques, notamment pour boire, se laver, laver leurs vêtements, préparer la nourriture et arroser la pelouse et le potager.

Eau interstitielle : Eau occupant les interstices entre les particules de sédiments ou de sol.

Eau souterraine : Eau se trouvant sous la nappe phréatique dans des formations géologiques de la « zone saturée ».

Écosystème : Communauté dynamique de plantes, d'animaux et de micro-organismes en interaction entre eux et avec l'environnement.

Exposition de fond : Exposition aux récepteurs par les concentrations naturelles en contaminants.

Facteur d'atténuation : Valeur utilisée dans le calcul des lignes directrices pour la qualité de l'air intérieur pour prendre en compte la baisse de concentration des contaminants des vapeurs du sol lors du transport vers le récepteur.

Facteur de dilution : Constante utilisée aux fins des recommandations pour la qualité des eaux souterraines pour prendre en compte la baisse de concentration des contaminants transportés dans l'eau de surface due à la dilution.

Facteur de pente : La relation entre une dose ou concentration d'exposition et le risque de cancer. S'exprime en risque par poids de produit chimique par unité de poids corporel par jour.

Frange capillaire ou zone capillaire : Couche de sol directement au-dessus de la nappe phréatique dans laquelle les eaux souterraines sont attirées par capillarité.

Modèle de Domenico : Modèle mathématique utilisé pour prédire les variations de concentration de contaminants dans les eaux souterraines dues à l'advection, la dispersion et la biodégradation durant le transport.

Nappe phréatique : Niveau sous lequel le sol est saturé d'eau.

Ralentissement du contaminant : Entrave du mouvement du contaminant sous la surface par le biais de phénomènes physiques ou chimiques.

Récepteur écologique : Organisme non humain pouvant subir les effets nocifs de l'exposition à un milieu contaminé, soit directement (contact) ou indirectement (transfert dans la chaîne alimentaire).

Récepteur : Personne ou organisme exposé à une substance chimique. Dans l'évaluation du risque pour la santé humaine, il est fréquent de définir le récepteur critique comme la personne qui devrait subir l'exposition la plus forte (en raison de son âge, de son sexe, de son régime alimentaire, de son mode de vie, etc.) ou les effets les plus graves (en raison de son état de santé, de son hérédité, de son sexe, de son âge, etc.) résultant de l'exposition.

Relation de partition : Équation utilisée pour représenter la relation entre la concentration chimique du contaminant dans le sol, l'eau interstitielle et les vapeurs du sol à l'état d'équilibre.

Risque : Dans les protocoles du CCME, le risque est une mesure de la gravité des effets sur la santé résultant de l'exposition à une substance chimique ainsi que de la probabilité qu'une telle exposition survienne. On peut l'estimer pour l'être humain par extrapolation quantitative à partir de résultats obtenus avec des animaux, ou grâce à l'extrapolation à partir de résultats obtenus avec de faibles doses sur une longue période d'exposition, ou avec de fortes doses sur une courte période d'exposition. Il peut prendre en considération les caractéristiques de la substance (propriétés physico-chimiques, réactivité biologique), la susceptibilité (activation métabolique, mécanismes de réparation, âge, sexe, facteurs hormonaux, état du système immunitaire), le degré d'exposition (sources, concentration, événements déclencheurs, voies d'exposition) ainsi que les effets nocifs (nature, gravité, apparition, réversibilité).

Risque unitaire : Voir *facteur de pente*, sauf qu'il s'exprime en risque par unité de concentration.

Sol à texture fine : Sol dont plus de 50 % en poids des particules ont un diamètre moyen inférieur ou égal à 75 µm ($D_{50} \leq 75 \mu\text{m}$).

Sol à texture grossière : Sol dont plus de 50 % en poids des particules ont un diamètre moyen supérieur à 75 µm ($D_{50} > 75 \mu\text{m}$).

Sol non saturé : Sol contenant une quantité d'eau interstitielle inférieure que la quantité maximale possible (considéré être au-dessus de la nappe phréatique).

Sol saturé : Sol contenant la quantité maximale d'eau interstitielle possible. Considéré être sous la nappe phréatique.

Sous-sol : Régolithe non consolidé situé au-dessus de la nappe phréatique et non exposé aux processus de pédogenèse.

Stygobie : Organisme vivant dans l'eau souterraine.

Vitesse de Darcy : Terme utilisé pour décrire l'écoulement des eaux souterraines à travers un milieu poreux, égal au produit de la conductivité hydraulique à saturation et du gradient hydraulique (comparativement à la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine qui est la vitesse linéaire moyenne de l'eau interstitielle). Les synonymes pour la vitesse de Darcy incluent le flux de Darcy, la densité de flux volumétrique, et le débit spécifique.

Voie d'exposition : Façon dont un organisme entre en contact avec un contaminant. Les principales catégories de voies d'exposition pour les récepteurs humains ou écologiques comprennent : (i) le transfert direct du milieu environnant des contaminants (à partir de l'air, de l'eau, du sol ou des sédiments) par voie cutanée ou par absorption à travers une solution épithéliale externe; (ii) l'ingestion d'eau contaminée; et (iii) l'inhalation de vapeurs contaminées. La voie d'exposition peut aussi faire référence au milieu à partir duquel un organisme est exposé (air, eau, sol, sédiment, ou une combinaison de ceux-ci) et à la voie de transport du contaminant de la source au récepteur.

Voie : Voir *voie d'exposition*.

Volatilisation : Transformation spontanée d'une substance chimique liquide ou solide en vapeurs et dispersion subséquente de ces vapeurs dans l'air au-dessus du sol contaminé.

Zone hypolentique : Zone de transition entre l'eau souterraine et l'eau de surface sous les lacs et les milieux humides.

Zone de transition : Zone où les eaux de surface et les eaux souterraines entrent en contact et peuvent se mélanger. Aussi appelée zone de décharge.

Zone hyporhéique : Zone de transition entre l'eau souterraine et l'eau de surface sous le lit des ruisseaux des rivières et des fleuves.

Zone vadose : Zone contenant de l'eau à une pression inférieure à la pression atmosphérique, y compris l'eau du sol, l'eau de la zone intermédiaire et l'eau capillaire. Cette zone est située entre la surface du sol, au-dessus, et la zone saturée, en dessous, soit la nappe phréatique.

PARTIE A

1. Historique et contexte

Le Conseil canadien des ministres de l'Environnement (CCME) a élaboré et publié des recommandations pour la qualité environnementale pour plusieurs milieux différents, compilées dans les Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement (CCME, 1999). Ces recommandations sont régulièrement utilisées pour l'évaluation et l'assainissement des sites fédéraux contaminés et ont aussi été adoptées par plusieurs autres juridictions canadiennes. Le Groupe de travail sur les recommandations pour la qualité des sols (GTRQS) du CCME est responsable de l'élaboration de recommandations pour la qualité du sol basées sur le Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des sols en fonction de l'environnement et de la santé humaine (CCME, 2006), ci-après nommé « protocole relatif aux sols ».

L'eau souterraine est utilisée comme principale source d'eau potable par environ 10 % des Canadiens (Statistique Canada, 2011). C'est la principale source d'eau utilisée pour l'abreuvement du bétail et l'irrigation des récoltes, et elle est aussi utilisée par les industries de la fabrication, de l'extraction minière et de l'extraction pétrolière (Environnement Canada, 1999; Gouvernement du Canada, 2003). Plus récemment, l'eau souterraine a aussi été utilisée pour chauffer et refroidir les bâtiments (Environnement Canada, 1999).

On reconnaît aussi un usage écologique important à l'eau souterraine. Celle-ci pouvant entrer en interaction avec l'eau de surface, elle devient souvent une source d'eau dont dépend la vie aquatique. Les eaux souterraines peu profondes sont aussi en étroite relation avec le sol, de sorte que les organismes présents dans le sol peuvent être exposés aux contaminants présents dans les eaux souterraines, par le biais des inondations périodiques par les eaux souterraines ou la montée capillaire.

La contamination des eaux souterraines est fréquente en de nombreux sites contaminés, particulièrement ceux touchés par des contaminants relativement solubles et une contamination du sol s'étendant jusqu'à la nappe phréatique ou proche de celle-ci. Dans bien des cas, une contamination des eaux souterraines peut être associée à une contamination des sols; toutefois, les panaches d'eau souterraine peuvent s'étendre au-delà de la zone atteinte par la contamination du sol ou, dans le cas de contaminants hautement solubles, la contamination peut être présente principalement dans la phase dissoute.

Les Recommandations canadiennes pour la qualité des sols (RCQS; CCME, 1999) tiennent compte de la protection des eaux souterraines pour les composés organiques comme une étape intermédiaire dans le calcul des recommandations pour la qualité des sols pour la protection de la vie aquatique; par contre, les recommandations pour la qualité des eaux souterraines n'ont pas été incluses dans les RCQS. En l'absence de recommandations pour la qualité des eaux souterraines, les recommandations pour la qualité de l'eau potable ou de l'eau de surface, particulièrement les Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada (Santé Canada, 2010a) ainsi que les Recommandations canadiennes pour la qualité de l'eau en vue de la protection de la vie aquatique (CCME, 1999), sont souvent appliquées aux eaux souterraines, que

ce soit directement ou avec un facteur de correction arbitraire. Même si toute recommandation en matière de qualité des eaux souterraines doit nécessairement tenir compte de la protection de l'eau potable et de la vie aquatique, dans certains cas, il n'y a aucune utilisation d'eau potable et aucun plan d'eau de surface à proximité, ou la séparation latérale entre la source de contamination des eaux souterraines et toute eau de surface à proximité est telle qu'il serait trop conservateur d'appliquer une recommandation d'eau de surface à l'eau souterraine. De plus, il existe des voies d'exposition additionnelles qui sont pertinentes pour les eaux souterraines et qui n'ont pas été explicitement considérées dans ces recommandations, y compris la volatilisation des contaminants de l'eau souterraine dans les espaces clos intérieurs des maisons et l'inhalation subséquente, et le contact direct des végétaux et des invertébrés du sol avec l'eau souterraine. Ainsi, il y a un besoin pour des recommandations complètes, cohérentes et défendables pour la qualité des eaux souterraines.

Le présent document établit un cadre de travail pour l'élaboration de Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux souterraines (RQES) assurant un niveau approprié de protection tant pour les récepteurs humains qu'environnementaux. Ce document se veut un complément au protocole relatif aux sols. Les voies d'exposition et les récepteurs qui ont servi à l'élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines sont basés sur ceux du protocole relatif aux sols et, à l'exception de la discussion de la section A.4 ci-dessous, les modèles et hypothèses utilisés sont les mêmes. Il convient de consulter le protocole relatif aux sols pour de plus amples renseignements à propos de l'historique et des principes sous-jacents; les renseignements détaillés inclus dans le protocole relatif aux sols n'ont pas été reproduits dans le présent document.

À l'heure actuelle, ce protocole ne s'applique qu'aux substances chimiques organiques en raison du haut degré d'incertitude et de variabilité à l'égard du devenir et du transport des substances inorganiques dans les eaux souterraines, incluant la partition sol-eau et la vitesse de transport des contaminants hautement variables qui dépendent fortement des caractéristiques chimiques du sol, ainsi que l'absence de biodégradation donnant lieu à une baisse négligeable des concentrations durant le transport lorsqu'on utilise les méthodes élaborées pour les substances organiques.

Pour certaines utilisations de l'eau (p. ex., l'eau potable et l'eau utilisée dans le secteur agricole), les recommandations canadiennes pour la qualité des eaux existantes sont adoptées directement dans les recommandations pour la qualité des eaux souterraines. Là où un transport du contaminant de la source est requis avant que l'exposition ne puisse survenir (p. ex., la protection de la qualité de l'air intérieur, de la vie aquatique, des plantes et des invertébrés), les modèles de devenir et de transport sont utilisés aux fins de l'élaboration des recommandations.

2. Cadre de travail pour l'établissement de recommandations pour la qualité des eaux souterraines

2.1 En quoi consiste le protocole?

Le présent protocole a été élaboré pour guider l'établissement de recommandations génériques scientifiquement défendables pour les substances chimiques organiques présentes dans les eaux souterraines aux sites contaminés à travers le Canada, en parallèle avec les recommandations

pour la qualité des sols établies à l'aide du protocole relatif aux sols (CCME, 2006). Le protocole passe en revue les différentes étapes nécessaires à la formulation de recommandations d'assainissement des eaux souterraines fondées sur les effets; il justifie le choix des récepteurs, des voies d'exposition, des modèles, des hypothèses et de la quantité minimale de données requises, avec des références à des justifications additionnelles présentées dans le protocole relatif aux sols.

Les recommandations sont élaborées et/ou révisées (au besoin) pour chaque substance chimique, conformément au protocole, suite à une analyse détaillée des caractéristiques physiques et chimiques, des concentrations de fond dans les eaux souterraines canadiennes et autres milieux, de la toxicité, du devenir et du comportement environnemental de cette substance. Ces informations de base sont présentées dans une série de documents techniques publiés à l'appui des recommandations et disponibles auprès du CCME, ou des membres du CCME.

2.2 *Principes directeurs*

L'élaboration de recommandations génériques doit tenir compte à la fois des considérations scientifiques, de gestion et politiques, en prenant en compte les risques tant pour l'environnement que pour la santé humaine. À plusieurs égards, les principes directeurs pour l'élaboration de recommandations pour la qualité des eaux souterraines sont semblables à ceux pour l'élaboration des recommandations pour les sols, décrites à la section A.2.2 du protocole relatif aux sols.

Le protocole pour les eaux souterraines n'est pas axé sur la protection des récepteurs vivant dans les eaux souterraines (p. ex., les organismes stygobies), mais plutôt sur les récepteurs dans d'autres milieux susceptibles d'être exposés à la contamination des eaux souterraines. Les récepteurs écologiques protégés comprennent la vie aquatique dans les plans d'eau environnants (eau douce ou marine), le bétail (par le biais des fosses-réservoirs et les puits destinés à l'abreuvement du bétail), les récoltes (eau d'irrigation) ainsi que les plantes et les invertébrés du sol en contact avec l'eau souterraine (c.-à-d., phréatophytes), ou périodiquement inondés par les eaux souterraines (utilisés comme substituts pour la fonction écologique globale des sols). L'exposition humaine prend en compte à la fois l'exposition directe (ingestion d'eau souterraine) et l'exposition indirecte (volatilisation et migration des contaminants dans l'air intérieur; inhalation de substances chimiques volatiles en se lavant, contact cutané en se lavant).

Le niveau de protection assuré aux récepteurs écologiques par les recommandations pour la qualité des eaux souterraines a généralement été préalablement établi en vertu des recommandations existantes (les Recommandations canadiennes pour la qualité de l'eau en vue de la protection de la vie aquatique, les Recommandations canadiennes pour la qualité de l'eau en vue de protéger les utilisations de l'eau à des fins agricoles : eau d'irrigation et abreuvement du bétail et les Recommandations pour la qualité des sols fondées sur le contact avec le sol, c.-à-d., la protection des plantes et des invertébrés du sol; CCME) qui sont utilisées pour l'élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines en fonction de l'environnement. Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines liées à la santé humaine sont des concentrations dans les eaux souterraines auxquelles, ou en dessous desquelles, aucun risque appréciable pour la santé humaine n'est prévu avec une exposition à long terme; pour l'ingestion

d'eau (ou l'exposition dans la douche ou le bain), les Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada (Santé Canada, 2010a et mises à jour) existantes sont adoptées directement.

2.3 Utilisations de l'eau

Comme on l'a indiqué à la section A.1 ci-dessus, l'eau souterraine est utilisée à différents usages au Canada; ces utilisations constituent la base de la plupart des voies d'exposition évaluées dans le cadre de l'élaboration des recommandations. Les usages spécifiques comprennent l'utilisation de l'eau souterraine par les êtres humains comme source d'eau potable ou domestique et l'utilisation de l'eau souterraine pour l'abreuvement du bétail ou l'irrigation des récoltes. Il peut aussi y avoir une interaction entre les eaux souterraines et l'eau de surface, laquelle sert d'habitat pour la vie aquatique et de source d'eau pour les récepteurs humains et écologiques.

2.4 Utilisation des terrains

Les recommandations pour la qualité des sols sont élaborées en fonction de quatre utilisations définies des terrains (vocation agricole, résidentielle/parc, commerciale et industrielle), telles que décrites dans la section A.2.3 du protocole relatif aux sols. L'utilisation des terrains est toutefois généralement moins importante aux fins des recommandations pour la qualité des eaux souterraines puisque dans la plupart des cas, les usages de l'eau souterraine sont indépendants de l'utilisation du terrain.

L'exception est l'exposition indirecte des êtres humains par le biais d'une infiltration dans l'air intérieur par des contaminants volatils provenant des eaux souterraines. Des recommandations sont établies pour cette voie d'exposition tant pour un scénario agricole/résidentiel que pour un scénario commercial/industriel. Certaines autorités pourraient permettre l'exclusion de la recommandation agricole/résidentielle aux sites commerciaux ou industriels, mais il pourrait alors y avoir des exigences sur le plan des distances de recul à partir d'une utilisation plus sensible des terrains afin de refléter la mobilité des eaux souterraines et des vapeurs du sol.

2.5 Classification chimique

La section A.2.4 du protocole relatif aux sols (CCME, 2006) classe les substances chimiques comme étant des composés organiques ou inorganiques, qui se dissocient ou non, volatils ou non volatils, et solubles ou non solubles. Ces mêmes classifications sont retenues pour le présent protocole.

Comme nous l'avons déjà noté plus tôt, ce protocole a été élaboré pour les substances organiques seulement. On prévoit que des recommandations pour la qualité des eaux souterraines seraient uniquement nécessaires pour les substances chimiques classées comme étant solubles (c.-à-d. les substances qui pourraient se retrouver dans l'eau à une concentration suffisamment élevée pour constituer un risque pour la santé humaine ou l'environnement). Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines visant les microorganismes et les considérations esthétiques (p. ex.,

le goût et la couleur) sont le mieux abordées au moyen des Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada. Seules les substances chimiques considérées comme volatiles ou semi-volatiles nécessitent des recommandations basées sur la voie par inhalation de vapeurs dans l'air intérieur (voir annexe D du Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des vapeurs des sols en vue de prévenir leur inhalation par l'humain (CCME 2014) pour plus de détails).

2.6 *Type de sol*

Selon leur type, les contaminants ont un devenir et des caractéristiques de transport différents dans l'environnement, y compris le mouvement des contaminants dissous dans l'eau souterraine et la migration des vapeurs vers les bâtiments, dépendants dans une certaine mesure des propriétés du sol, dont plusieurs sont reliées à la texture du sol. Pour minimiser l'incertitude introduite par la variabilité du sol dans l'élaboration des recommandations, le protocole considère deux types généraux de sol : les sols à texture grossière (qui contiennent principalement du sable) et ceux à texture fine (essentiellement composés de particules de silt et d'argile). Une granulométrie médiane de 75 microns a été adoptée comme critère de différenciation entre les deux catégories. Des propriétés génériques, représentatives des sols typiques de chaque catégorie, ont été affectées à l'une et à l'autre catégorie aux fins de l'élaboration des recommandations; elles sont résumées à l'annexe B.

Signalons également que toute autorité compétente peut décider de tenir compte du type de sol, mais seulement en fonction des caractéristiques propres au site.

2.7 *Sommaire du processus d'élaboration des recommandations*

Le processus d'élaboration des recommandations est décrit en détail dans les parties B à D du présent document. Un bref sommaire du processus est présenté dans les paragraphes qui suivent.

Des recommandations distinctes sont élaborées aux fins de plusieurs voies définies d'exposition humaine et environnementale. Les voies environnementales comprennent les plantes et les invertébrés du sol périodiquement exposés à l'eau souterraine, la migration vers les plans d'eau de surface une vie aquatique d'eau douce ou marine est présente, ainsi que l'utilisation d'eau souterraine pour l'abreuvement du bétail ou l'irrigation des récoltes. Les voies liées à la santé humaine comprennent l'ingestion d'eau potable, ainsi que l'exposition cutanée et par inhalation en se lavant, basé sur les Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada (Santé Canada, 2010a) lorsque possible, et la volatilisation des contaminants de l'eau souterraine et leur migration vers l'air intérieur. Les récepteurs et les voies d'exposition considérés sont résumés dans la figure 1.

La plus faible des recommandations obtenues pour chaque voie d'exposition devient la recommandation définitive pour la qualité des eaux souterraines (RQES_D). L'absence de toxicité et les concentrations de fond naturelles dans les eaux souterraines sont deux autres critères pris en considération pour l'établissement de la RQES_D.

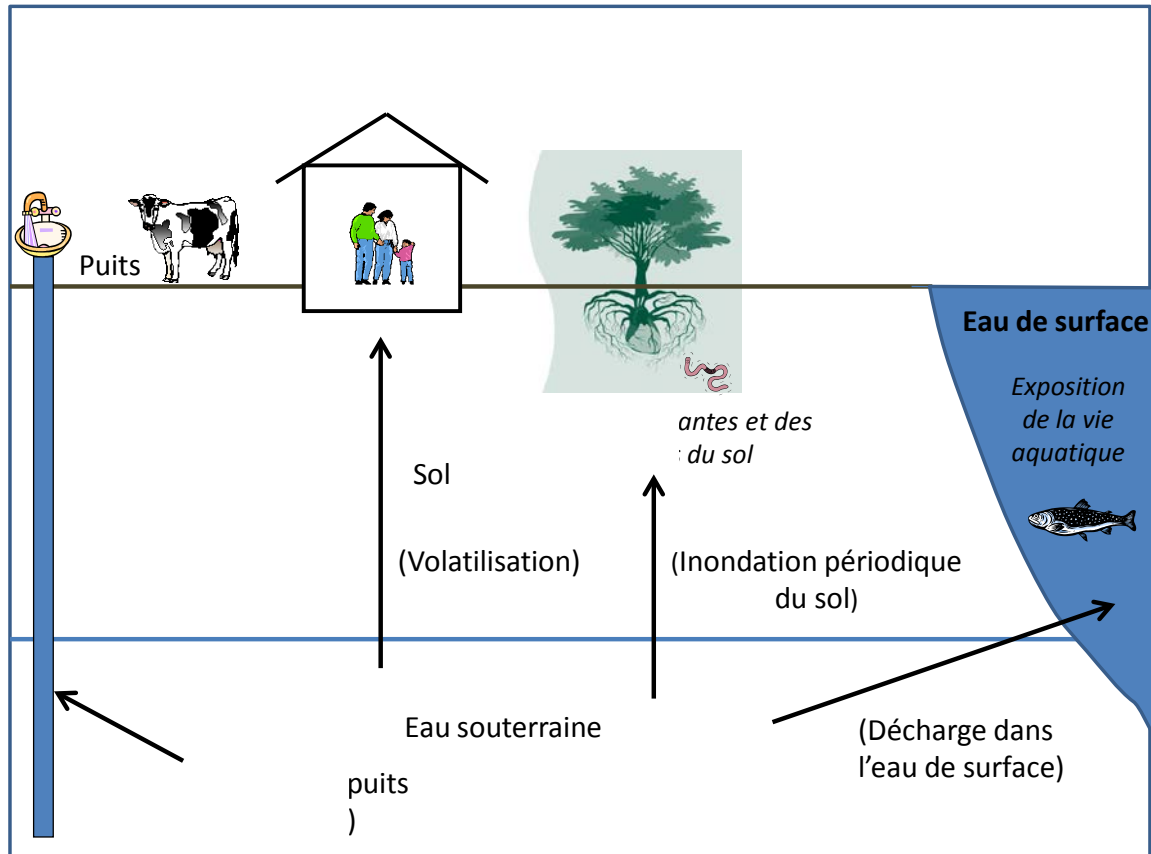


Figure 1 : Récepteurs et voies d'exposition pris en compte pour l'élaboration des recommandations

3. Utilisation des recommandations canadiennes pour la qualité des eaux souterraines

3.1 Renseignements généraux

Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines doivent être utilisées pour « assainir les lieux contaminés jusqu'aux niveaux tolérables » et non pour « polluer jusqu'aux niveaux tolérables » les sites moins contaminés. Elles ne sont pas conçues en vue de la gestion des lieux non pollués. L'assainissement des eaux souterraines en conformité aux recommandations pour la qualité des eaux souterraines ne remettra pas un lieu contaminé à son état original (c.-à-d. naturel). Les recommandations peuvent servir d'objectif intermédiaire pour ramener la qualité des eaux souterraines à son niveau d'origine, toutefois, la décision concernant le niveau d'assainissement revient à chaque juridiction.

Les recommandations canadiennes pour la qualité des eaux souterraines sont prévues à des fins d'évaluation des contaminants *in situ* dans les eaux souterraines. Elles ne sont pas destinées à être utilisées dans l'évaluation de la qualité des matières résiduelles ou autres substances chimiques déversées dans les eaux souterraines. Les recommandations ne sont aussi pas destinées pour une application au point d'exposition (p. ex., les systèmes de distribution d'eau ou l'eau de surface). Il faut faire preuve de grande prudence et bien comprendre le processus d'élaboration des recommandations et sa pertinence quand on utilise les recommandations dans un but autre que leur fin prévue. Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines ne doivent pas non plus être interprétées comme une permission de contaminer jusqu'à un certain niveau.

Les recommandations génériques sont prévues aux fins de la protection de toute eau souterraine, indépendamment de la profondeur à laquelle elle se trouve ou de la façon dont elle est utilisée. Tel que discuté dans la section 3.2 ci-dessous, les recommandations sont mises en œuvre à l'intérieur d'un cadre de travail multiniveau qui pourra permettre de considérer la probabilité d'exposition en fonction de la profondeur et de l'utilisation prévue propre à un site.

Les recommandations doivent être utilisées en combinaison avec des méthodes d'échantillonnage et d'analyse acceptables. Le CCME a publié des guides sur les méthodes d'échantillonnage et la caractérisation des sites et les méthodes d'analyse, et travaille actuellement à l'élaboration de guides pour remplacer le Guide pour l'échantillonnage, l'analyse des échantillons et la gestion des données des lieux contaminés (CCME, 1993a, b).

Plusieurs sources d'incertitude s'appliquent aux recommandations pour la qualité des eaux souterraines fondées sur les effets. Les incertitudes liées aux recommandations pour les sols abordées à la section A.3 du protocole relatif aux sols s'appliquent généralement aussi aux recommandations pour la qualité des eaux souterraines.

3.2 *Cadre de travail multiniveau*

Tout comme les recommandations pour la qualité des sols, les recommandations pour la qualité des eaux souterraines sont prévues aux fins d'une application aux sites contaminés à l'intérieur d'un cadre de travail multiniveau. Les niveaux ci-dessous sont inclus.

- Application directe des recommandations numériques génériques (niveau 1).
- Modification limitée des recommandations en fonction des conditions propres au site (niveau 2).
- Réalisation d'une évaluation du risque propre au site pour fixer des objectifs d'assainissement propres au site (niveau 3).

Bien que ce protocole s'intéresse principalement à l'élaboration de recommandations numériques génériques, il est prévu qu'il pourrait aussi servir de base pour les autres niveaux, particulièrement celui se rapportant à la modification des recommandations fondée sur les conditions propres au site (niveau 2). Les exigences particulières liées à l'application de ces niveaux sont laissées à la discrétion des différentes juridictions; quelques conseils généraux sont fournis ci-dessous.

Une méthode possible pour modifier les recommandations en fonction des conditions propres au site est l'élimination des recommandations pour les voies d'exposition qui ne s'appliquent pas au site contaminé ou dans ses environs. Les juridictions individuelles pourront préciser des exigences relatives à l'élimination de voies précises. Ces exigences pourront, dans certains cas, être fondées sur l'utilisation du terrain. Par exemple, les juridictions pourraient permettre l'élimination des voies d'exposition liées au bétail et à l'irrigation des récoltes sur les terres à vocation autre qu'agricole, ou l'élimination de la recommandation relative à l'inhalation des vapeurs aux sites agricoles/résidentiels pour les sites commerciaux ou industriels; il pourrait toutefois y avoir des exigences sur le plan des distances de recul à partir d'une utilisation plus sensible des terrains. Il pourrait aussi être permis d'éliminer la recommandation pour la protection de l'eau potable là où il n'y a aucune probabilité que l'eau souterraine contaminée soit utilisée comme source d'eau potable ou qu'elle ait une incidence sur les réserves d'eau potable, ou d'éliminer les voies d'exposition liées à l'eau de surface lorsqu'il n'y a pas de plan d'eau de surface à proximité du site. Ces voies feront l'objet de discussions plus approfondies dans les parties B et C de ce document; dans tous les cas, les exigences de la juridiction ayant autorité sur le site devront être déterminées.

Des recommandations propres au site peuvent aussi être établies en recalculant les recommandations par le biais des modèles présentés à l'annexe A en remplaçant les paramètres par défaut du modèle par les valeurs propres au site. En général, il convient de n'ajuster que les paramètres stables et facilement mesurables, et alors, seulement à l'intérieur de limites appropriées pour les modèles. D'autres directives à l'égard de ces ajustements, y compris les limites admissibles suggérées pour les paramètres des modèles, sont présentées dans les annexes C et D du Standard pancanadien relatif aux hydrocarbures pétroliers dans le sol : guide de l'utilisateur (CCME, 2008a), du 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 (CCME 1996a; il est à noter que le CCME travaille présentement à mettre à jour et à élargir le document pour y incorporer également des recommandations pour les eaux souterraines et les vapeurs des sols), ou dans des guides publiés par des juridiction spécifiques. Là encore, les exigences de la juridiction compétente devront être confirmées avant de modifier les recommandations.

L'évaluation du risque propre à un site, ou de « niveau 3 », peut se fonder sur des hypothèses et des modèles différents et exige généralement plus de données sur les caractéristiques propres au site que les recommandations génériques ou que la modification propre au site des recommandations. L'examen détaillé de ce type d'évaluation dépasse la portée du présent document; toutefois, diverses organisations comme Environnement Canada, Santé Canada, le CCME et plusieurs organismes internationaux ont déjà publié des guides à ce sujet, notamment ceux énumérés ci-dessous, qui sont particulièrement pertinents pour les sites contaminés fédéraux.

- Cadre pour l'évaluation du risque écotoxicologique : orientation générale (CCME, 1996b).
- Cadre pour l'évaluation du risque écotoxicologique : annexes techniques (CCME, 1997).

- L'évaluation des risques pour les sites contaminés fédéraux au Canada, Partie I : L'évaluation quantitative préliminaire des risques (ÉQPR) pour la santé humaine, version 2.0. (Santé Canada, 2010b)
- L'évaluation des risques pour les sites contaminés fédéraux au Canada, Partie II : les valeurs toxicologiques de référence (VTR) de Santé Canada et les propriétés physico-chimiques des substances chimiques, version 2.0. (Santé Canada, 2010c)
- L'évaluation des risques pour les sites contaminés fédéraux au Canada, Partie V : L'évaluation quantitative détaillée des risques pour la santé humaine associés aux substances chimiques (ÉQDR_{chim}) (Santé Canada, 2010d)
- Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des sols en fonction de l'environnement et de la santé humaine (CCME, 2006).
- Guide concernant l'application propre à un lieu des recommandations pour la qualité des eaux au Canada : procédures d'établissement d'objectifs numériques de qualité de l'eau (CCME, 2003).
- Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada - Tableau sommaire et documents techniques (Santé Canada, 2010a).

3.3 Limites liées à l'utilisation des recommandations numériques génériques

Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines sont fondées sur un ensemble particulier de modèles et d'hypothèses. Dans certains cas où les sites sont particulièrement sensibles, les hypothèses retenues risquent de ne pas assurer une protection adéquate. N'importe laquelle des situations suivantes peut invalider les hypothèses utilisées pour l'élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines relatives à des voies d'exposition particulières.

Eaux souterraines contaminées situées à l'intérieur de 10 m d'un plan d'eau de surface.

Pour les eaux souterraines contaminées situées à l'intérieur de 10 m (latéralement ou verticalement) d'un plan d'eau de surface, en tenant compte des fluctuations saisonnières possibles et de la zone de transition (c.-à-d., en mesurant la ligne potentielle des hautes eaux), les Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux : protection de la vie aquatique devraient être appliquées directement. Si le plan d'eau de surface est une source possible d'eau potable, les Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada pourraient aussi s'appliquer.

Écoulement d'eaux souterraines dans une masse d'eau stagnante.

Lorsque les eaux souterraines contaminées s'écoulent dans une masse d'eau stagnante (masse d'eau dépourvue d'un véritable effluent), les contaminants persistants risquent de s'y accumuler sous l'effet de l'évaporation. Il conviendra normalement, dans un tel cas, d'opter pour une évaluation du risque propre au site en vue de la protection de la vie aquatique.

Substrats de roche ou de limon/argile fracturés.

Les modèles de transport utilisés pour élaborer les recommandations génériques supposent que le transport des contaminants s'effectue dans des sols non consolidés. Si le transport des contaminants entre la source et le récepteur (p. ex., un plan d'eau de surface) s'effectue au contraire dans des sols fracturés, il conviendra d'utiliser une distance de transport de zéro (c'est-à-dire que les Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux : protection de la vie

aquatique devraient aussi s'appliquer aux eaux souterraines) ou d'opter pour une évaluation du risque propre au site. Cette limite s'applique aussi à la voie d'exposition par inhalation de vapeurs à l'intérieur lorsque la dalle d'un bâtiment est en contact direct avec le roc fracturé. On prévoit que les recommandations génériques (niveau 1) assureraient une protection adéquate dans le cas de sols consolidés non fracturés.

Sols à texture très grossière favorable au transport ou à l'écoulement rapide des eaux souterraines.

Les sols à grains très grossiers (tel que le gravier) dans un site particulier peuvent accélérer le transport des contaminants, contrairement à ce qui a été présumé dans l'établissement des recommandations génériques. Puisque le modèle de transport des eaux souterraines présume une biodégradation, une vitesse d'écoulement des eaux souterraines supérieure à celle présumée pour les recommandations génériques pourrait donner lieu à une biodégradation significativement inférieure durant le transport, rendant les recommandations non conservatrices. D'autres phénomènes susceptibles d'accélérer la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine (p. ex., les effets de marée près des masses d'eau de mer voisines) risquent également de favoriser le transport des contaminants. Si la vitesse de Darcy des eaux souterraines dépasse 3×10^{-7} m/s, les résultats de la modélisation de transport effectuée pour établir les recommandations génériques risquent de ne pas assurer une protection adéquate des eaux de surface voisines; dans ce cas, un ajustement des recommandations tenant compte des caractéristiques propres au site sera probablement nécessaire. Des sols à texture très grossière pourraient aussi avoir une incidence sur la voie d'exposition par inhalation de vapeurs si celles-ci sont présentes directement sous les fondations d'un bâtiment sur des épaisseurs supérieures à 30 cm.

Eaux souterraines contaminées à moins de 100 cm des fondations d'un bâtiment.

Les modèles utilisés pour évaluer l'intrusion de vapeurs ne sont pas considérés valides si la source de la contamination se trouve très proche du bâtiment. On juge en particulier que le contact direct d'eaux souterraines contaminées par des contaminants organiques avec les fondations d'un bâtiment crée une situation de risque élevé. Lorsque les eaux souterraines contaminées (y compris la frange capillaire) se trouvent à moins de 100 cm des fondations d'un bâtiment, il conviendra normalement d'opter pour une approche selon le niveau 2 ou le niveau 3.

Planchers en terre battue ou autres caractéristiques structurales inhabituelles.

Le modèle d'intrusion de vapeurs suppose que les bâtiments résidentiels ou commerciaux/industriels visés sont dotés d'une dalle de fondation en béton. La présence d'un bâtiment à plancher en terre battue à moins de 10 m (latéralement et verticalement) d'une source d'eau souterraine contaminée exige le recours à une évaluation du risque propre au site. D'autres bâtiments présentant des caractéristiques inhabituelles (p. ex. un faible taux d'échange d'air) pourraient également nécessiter une évaluation propre au site ou une modification conséquente des recommandations pour la voie d'exposition par inhalation de vapeurs.

4. Déviations par rapport au Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des sols en fonction de l'environnement et de la santé humaine

Bien que dans l'ensemble, ce protocole soit basé sur le protocole relatif aux sols (CCME, 2006), il en dévie à certains aspects, soit en raison de considérations uniques aux eaux souterraines ou pour refléter des changements scientifiques et d'orientations depuis la dernière mise à jour du protocole relatif aux sols. Les déviations incluent :

- Des recommandations ne sont pas élaborées séparément pour les quatre utilisations des terrains définies dans le protocole relatif aux sols. Les recommandations propres à l'inhalation de vapeurs sont toutefois calculées en fonction des scénarios d'exposition agricoles/résidentiels et commerciaux/industriels; les juridictions compétentes peuvent autoriser l'exclusion de certaines voies d'exposition en fonction de la vocation du terrain, potentiellement sous réserve des distances de recul par rapport à des terrains utilisés à des fins plus sensibles.
- Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines relatives à la protection des plantes et des organismes qui vivent dans le sol sont calculées en fonction d'un niveau unique de protection équivalent aux Recommandations pour la qualité des sols relatives au contact avec le sol pour les terrains à vocation agricole.
- Certains paramètres d'entrée pour les modèles de devenir et de transport ont été mis à jour pour refléter les récentes améliorations sur le plan de la science et de la recherche incluses dans la mise à jour de 2008 du Standard pancanadien relatif aux hydrocarbures pétroliers dans le sol (CCME, 2008b).

PARTIE B

1. Élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines en fonction de l'environnement

Le rôle général des recommandations pour la qualité des eaux souterraines en fonction de l'environnement est d'identifier les concentrations de contaminants dans les eaux souterraines en dessous desquelles aucun effet écologique nocif n'est prévu à long terme en fonction du récepteur considéré. Pour déterminer de telles concentrations, de nombreuses décisions et hypothèses sont requises, y compris, entre autres, quels effets écologiques, quelles voies d'exposition, quels récepteurs et quel niveau de protection il convient de prendre en compte. La section B du protocole relatif aux sols (CCME, 2006) explique de façon détaillée comment ces décisions ont été prises pour les recommandations pour la qualité des sols. Le protocole relatif aux eaux souterraines (le présent document) utilise le protocole relatif aux sols comme point de départ et adapte les scénarios inclus dans ce dernier pour les rendre applicables à une source de contamination dans les eaux souterraines. Dans le présent document, la section B.2 fournit une discussion de haut niveau sur les objectifs de protection appropriés pour les recommandations pour la qualité des eaux souterraines. La section B.3 examine les hypothèses explicites et implicites des scénarios d'exposition dans les recommandations pour la qualité des eaux souterraines. La section B.4 présente le processus détaillé d'élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines en fonction de l'environnement. Les caractéristiques détaillées des modèles sont présentées dans l'annexe A et les paramètres par défaut des modèles sont fournis dans l'annexe B. Dans la mesure du possible, le matériel déjà présenté dans le protocole relatif aux sols est mentionné en référence plutôt que répété.

2. Niveau de protection écologique et paramètres pertinents

2.1 Niveau de protection écologique

Avant de pouvoir élaborer des recommandations pour la qualité des eaux souterraines, il convient d'avoir une idée précise du niveau de protection écologique nécessaire pour que les objectifs de protection de l'environnement soient atteints de façon durable. Une considération prédominante est que le niveau de protection écologique fourni par les recommandations pour la qualité des eaux souterraines doit assurer une qualité suffisante pour toute utilisation écologique des eaux souterraines qui pourrait raisonnablement être prévue.

Le niveau approprié de protection a été soigneusement considéré dans le cadre de l'élaboration des recommandations pour la qualité des sols et le lecteur est invité à consulter la section B.2.1 du protocole relatif aux sols pour de plus amples détails. Dans l'ensemble, les recommandations pour la qualité des eaux souterraines adoptent les mêmes objectifs de protection que les recommandations correspondantes pour la qualité des sols. L'exception la plus notable est basée sur les considérations relatives à l'utilisation des terrains. Les recommandations pour la qualité des sols visent un niveau de protection plus élevé dans les régions où il est anticipé qu'un plus haut niveau de fonctionnement des écosystèmes sera requis afin de soutenir les activités

normalement associées à la vocation du terrain (agricole et résidentielle) par rapport à des vocations où l'on ne prévoit pas le même niveau de fonctionnement des écosystèmes (commerciale et industrielle). Étant donné la mobilité potentielle des contaminants dans les eaux souterraines, les recommandations pour la qualité des eaux souterraines pour toutes les utilisations de terrain sont fondées sur le même niveau de protection que pour les terrains à vocations sensibles. Ce sujet est abordé de façon plus approfondie dans la section B.3.3 du présent document.

2.2 *Choix des paramètres écologiquement pertinents*

Le paramètre d'évaluation écologique qui représente l'objectif global des recommandations pour la qualité des eaux souterraines est le maintien de populations saines de tous les biotes qui constituent les écosystèmes avec lesquels l'eau souterraine pourrait entrer en contact. Tout comme dans le cas des recommandations pour la qualité des sols, ce paramètre d'évaluation est fondé sur des indicateurs de mesure qui sont, typiquement, les mesures de croissance, de reproduction et de survie pour les espèces pertinentes choisies comme indicatrices, souvent déterminées dans le cadre d'essais en laboratoire. Le choix des paramètres pour les recommandations pour la qualité des eaux souterraines suit de près ceux des recommandations pour la qualité des sols, présentés de façon plus détaillée dans les sections B.2.2 à B.2.4 du protocole relatif aux sols.

3. Hypothèses sur les scénarios d'exposition

3.1 *Voies d'exposition et récepteurs*

Dans de rares cas, des récepteurs écologiques pourraient venir en contact direct avec de l'eau souterraine contaminée. Toutefois, le plus souvent, ils seront exposés aux contaminants contenus dans les eaux souterraines après des déversements d'eau souterraine dans un plan d'eau de surface, un étang-réservoir ou un puits, ou lorsqu'elle remonte jusqu'à la zone vadose. Ainsi, une première étape importante pour déterminer comment des récepteurs écologiques pourraient être exposés est l'identification des voies d'exposition par le biais desquelles les contaminants présents dans les eaux souterraines pourraient atteindre les récepteurs. Le point de départ de ce procédé était l'ensemble de combinaisons de voies d'expositions et récepteurs écologiques présenté dans le protocole relatif aux sols (voir la section B.4.2 et le tableau 1 de ce document).

Le contact direct des racines végétales avec les eaux souterraines sous la nappe phréatique n'est une préoccupation que pour les espèces phréatophytes (p. ex., les peupliers ou les saules) qui ont la capacité de tirer de l'eau directement de la nappe phréatique. Les racines de la plupart des espèces non phréatophytes (c.-à-d., la plupart des espèces végétales) ne se rendent pas jusqu'à la nappe phréatique parce qu'elles dépendent de l'oxygène dans les vapeurs du sol pour maintenir la respiration racinaire. Différents processus peuvent entraîner un mouvement de l'eau souterraine, qui pourrait contenir des contaminants, vers la zone vadose où les contaminants peuvent alors entrer en contact avec les racines des espèces non phréatophytes.

Le présent protocole ne prend pas directement en compte la stygobie, de sorte que l'exposition possible des invertébrés vivant exclusivement dans les eaux souterraines en dessous du niveau de

la nappe phréatique n'est pas envisagée. Toutefois, la possibilité d'une remontée des eaux souterraines contaminées vers la zone vadose, exposant les invertébrés vivant dans le sol et les racines des espèces non phréatophytes est envisagée, de même que la possibilité que les racines d'espèces phréatophytes puissent être directement exposées à l'eau souterraine contaminée.

Dans l'ensemble, la voie d'exposition écologique par contact direct est considérée comme étant valide pour les eaux souterraines. De plus amples renseignements et discussions sur cette voie d'exposition sont fournis dans la section B.4.2 de ce document.

La voie d'exposition par ingestion de sol et d'aliments est prise en compte pour l'élaboration des recommandations pour la qualité des sols. Toutefois, il est anticipé que l'exposition à la contamination des eaux souterraines par ces voies serait négligeable dans la plupart des cas; il convient donc de traiter ces voies par le biais des recommandations pour la qualité des sols.

Des eaux souterraines contaminées peuvent se déverser dans l'eau de surface où la vie aquatique (p. ex., les poissons, les invertébrés aquatiques et les plantes d'eau douce ou marine) pourrait être exposée aux contaminants. Cette voie d'exposition est donc considérée comme étant valide pour les eaux souterraines. De plus amples renseignements et discussions sur cette voie d'exposition sont fournis dans la section B.4.3 de ce document.

L'accès à l'eau souterraine contaminée pourrait potentiellement se faire par le biais d'un puits d'eau, d'un étang-réservoir ou d'une résurgence dans un plan d'eau de surface utilisé à des fins agricoles (abreuvement du bétail ou irrigation). Cette voie d'exposition est donc considérée comme étant valide pour les eaux souterraines. De plus amples renseignements et discussions sur cette voie d'exposition sont fournis dans la section B.4.4 de ce document.

Les voies d'exposition considérées dans l'élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines, comparativement aux recommandations pour la qualité des sols, sont résumées ci-dessous.

Tableau 1. Comparaison des voies d'exposition des recommandations pour la qualité des eaux souterraines et des sols

<u>Recommandations pour la qualité des eaux souterraines</u>	<u>Recommandations pour la qualité des sols</u>
Contact avec l'eau souterraine dans la zone vadose (plantes, invertébrés)	Contact avec le sol (plantes, invertébrés, processus du cycle des nutriments)
Contact avec l'eau contaminée à la suite d'une résurgence dans l'eau de surface (vie aquatique)	Contact avec l'eau contaminée à la suite d'une résurgence dans l'eau de surface (vie aquatique)
Utilisation agricole d'eau contaminée (bétail, irrigation)	Utilisation agricole d'eau contaminée (bétail, irrigation)
	Ingestion de sol et d'aliments (animaux d'élevage et faune)

3.1.1 Exclusion de voies d'exposition

Les juridictions individuelles pourront choisir de permettre l'exclusion des recommandations pour la qualité des eaux souterraines relatives à certaines voies d'exposition dans des circonstances particulières. Les remarques suivantes pourraient être utiles pour aider à déterminer si l'exclusion d'une voie est appropriée dans le contexte d'un cadre de réglementation particulier. Des renseignements additionnels sont fournis dans les parties pertinentes de la section B.4 de ce document.

La voie d'exposition par contact avec les eaux souterraines considère la possibilité que les plantes et les invertébrés du sol puissent être exposés aux contaminants présents dans les eaux souterraines. La probabilité d'effets indésirables est considérée comme étant faible pour cette voie d'exposition là où les eaux souterraines se situent à une profondeur d'au moins 3 m. Des renseignements additionnels pertinents sur les profondeurs de systèmes racinaires des plantes et sur la répartition de la profondeur et de la densité des populations d'invertébrés sont inclus dans la section B.4.2.2 de ce document.

La voie d'exposition relative à la protection de la vie aquatique se préoccupe des déplacements latéraux des contaminants dans les eaux souterraines et de leur résurgence dans un plan d'eau de surface situé en aval. Plus la distance jusqu'au plan d'eau de surface le plus près en aval augmente, plus la probabilité d'effets nocifs sur la vie aquatique à cet endroit diminue. Toutefois, la probabilité d'effets nocifs sur un plan d'eau en aval dépendra aussi du devenir et des propriétés de transport du contaminant. Par exemple, la grande majorité (98,1 %) des 647 panaches d'eau souterraine d'hydrocarbures dissouts présentés dans Wiedemaier *et al.* (1999) ont moins de 274 m de longueur, tandis que des panaches de solvant chloré de plus de 3 000 m ont été signalés (Lawrence Livermore National Laboratory, 1999). La section A.2.2.1 du protocole relatif aux sols suggère qu'une distance de 10 km pourrait être appropriée pour envisager l'exclusion de cette voie d'exposition sur une base non spécifique à une substance chimique, mais les juridictions individuelles pourraient opter pour une distance différente.

Les recommandations relatives à la protection de l'eau d'abreuvement du bétail et d'irrigation sont pertinentes pour les terres agricoles. Il pourrait toutefois être possible d'exclure cette voie d'exposition lorsque le site est suffisamment éloigné de la terre agricole la plus proche et qu'une éventuelle vocation agricole est peu probable.

3.2 Vocation du terrain

Les recommandations pour la qualité des sols sont fondées sur un ensemble d'hypothèses différent pour chacune des quatre principales utilisations des terrains (agricole, résidentiel/parc, commercial et industriel; voir section B.5 du protocole relatif aux sols). Les contaminants dans les eaux souterraines ont tendance à être plus mobiles que ceux dans les sols, de sorte que le risque de voir des contaminants passer d'un terrain à vocation moins sensible à un terrain à vocation plus sensible est plus élevé dans le cas des eaux souterraines que dans le cas des sols. En conséquence, les recommandations pour la qualité des eaux souterraines ne sont pas

spécifiques à la vocation du terrain, mais reflètent plutôt un niveau de protection écologique approprié pour la vocation de terrain la plus sensible.

4. Processus d'élaboration des recommandations

Le processus d'élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines pour les biotes non humains en fonction des récepteurs clés et des voies d'exposition décrits précédemment fait l'objet de la présente section. Plusieurs des modèles sont fondés sur les modèles correspondants dans le protocole relatif aux sols et, lorsque c'est le cas, cela est indiqué pour chaque modèle.

4.1 Revue de la documentation scientifique et exigences relatives aux données

Les exigences relatives aux données pour l'élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines seront généralement un sous-groupe des données requises pour l'élaboration des recommandations pour la qualité des sols. Il est prévu que les recommandations pour la qualité des eaux souterraines seront généralement élaborées en parallèle avec les recommandations pour la qualité des sols, de sorte qu'une revue additionnelle de la documentation scientifique pourrait ne pas être requise pour les recommandations pour la qualité des eaux souterraines. De plus amples renseignements sont présentés dans la section B.7.1 du protocole relatif aux sols.

Il importe, aux fins de l'élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines, de bien comprendre le comportement environnemental du contaminant. Toutefois, dans la plupart des cas, les données requises à cet effet auront déjà été recueillies dans le cadre de la revue de la documentation scientifique pour l'élaboration des recommandations pour la qualité des sols.

Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines en fonction de la qualité de l'environnement utiliseront normalement les recommandations existantes pour d'autres milieux (p. ex., les recommandations pour la qualité des sols ou pour la qualité de l'eau de surface) comme base et ne requerront généralement pas de nouvelles données toxicologiques dans le cadre de la revue de la documentation scientifique.

4.2 Élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines fondées sur le contact avec l'eau souterraine

Le protocole relatif aux sols comprend des recommandations pour la qualité des sols fondées sur le contact avec le sol (RQS_{CS}) pour les organismes inféodés au sol (CCME, 2006, et les mises à jour). Cette voie d'exposition considère les effets potentiels des contaminants du sol sur les populations de plantes terrestres et d'invertébrés du sol. Les contaminants présents dans les eaux souterraines peuvent aussi potentiellement avoir un effet sur les plantes terrestres et les invertébrés du sol.

Comme indiqué à la section 3.1, on prévoit que le seul biote qui pourrait être directement exposé aux contaminants des eaux souterraines en dessous de la nappe phréatique est celui des plantes

phréatophytes (et la stygobie, qui n'est pas prise en compte dans le présent protocole). La plus grande majorité des espèces de plantes terrestres ne sont pas phréatophytes (c.-à-d., que les racines ne pénètrent pas la nappe phréatique). Cependant, les recommandations du niveau 1 se veulent conservatrices, de sorte que des recommandations pour la qualité des eaux souterraines fondées sur le contact avec l'eau souterraine pour les organismes inféodés au sol (RQES_{CES}) sont élaborées pour les plantes phréatophytes. Les valeurs ainsi élaborées sont présumées adéquates pour la protection de toutes les plantes terrestres et de tous les invertébrés du sol. Une approche de niveau 2 est possible pour des situations propres à un site où des organismes phréatophytes ne sont pas présents et où la principale préoccupation est liée à l'inondation périodique des invertébrés terrestres et des espèces végétales non phréatophytes par des eaux souterraines contaminées est présentée à la section B.4.2.3.

Les RQS_{CS} sont fondées sur des tests de toxicité effectués sur des plantes et des invertébrés et reliés à des concentrations totales dans le sol mesurées de façon analytique (voir le protocole relatif aux sols). Il est présumé (voir la section 4.2.1, ci-dessous) que les plantes et les invertébrés du sol sont principalement exposés et sensibles à la portion du contaminant dissoute dans l'eau interstitielle. La concentration dans l'eau interstitielle C_E (mg/L) correspondant à la RQS_{CS} (mg/kg) peut être calculée comme suit :

$$C_E = \frac{RQS_{CS}}{FD1} \quad (\text{Équation B.4.1})$$

Où FD1 est le facteur de dilution des modèles pour les eaux souterraines du protocole relatif aux sols (annexe C du protocole relatif aux sols) représentant le partage du contaminant entre le sol et l'eau interstitielle, et est calculé selon l'équation A-2 dans l'annexe A du présent document.

Si l'on retient l'hypothèse conservatrice voulant que les espèces phréatophytes prennent toute leur eau directement de la nappe d'eau souterraine ou de la zone capillaire, alors la recommandation pour la qualité des eaux souterraines correspondante, fondée sur le contact avec l'eau souterraine pour les organismes inféodés au sol, RQES_{CES}, peut être estimée en la déclarant égale à C_E, et donc :

$$RQES_{CES} = \frac{RQS_{CS}}{FD1} \quad (\text{Équation B.4.2})$$

La RQS_{CS} pour les terrains agricoles est utilisée pour l'établissement des valeurs du premier niveau de la RQES_{CES} pour toutes les vocations de terrain. Cette hypothèse conservatrice reflète le potentiel de mouvement hors site des eaux souterraines vers des régions où les terrains sont utilisés à des fins autres que celles du site examiné (section B.3.3). Ainsi, les valeurs du premier palier de la RQES_{CES} demeurent les mêmes pour toutes les classifications d'utilisation de terrain. Par contre, des valeurs différentes pourront être calculées pour les sols à texture fine ou à texture grossière selon la disponibilité des données.

Le modèle du niveau 1, élaboré ci-dessus, pour calculer la recommandation pour la qualité des eaux souterraines fondées sur le contact avec l'eau souterraine (RQES_{CES}) est résumé dans l'annexe A. Les valeurs des paramètres sont fournies dans l'annexe B.

4.2.1 RQES_{CES} fondée sur les concentrations dans l'eau interstitielle

Van Gestel *et al.* (1991) et Van Gestel et Ma (1988, 1990) ont démontré que la toxicité des chlorophénols, de la dichloroaniline, et des chlorobenzènes pour les vers de terre dans des sols dont le contenu en matière organique diffère demeure presque identique lorsqu'elle est exprimée en fonction de la concentration dans l'eau interstitielle. La conclusion de Hulzebos *et al.* (1993) a été sensiblement la même dans une étude sur la toxicité d'une grande variété de composés pour la laitue cultivée dans le sol ou dans une solution nutritive. Il semblerait donc que pour certaines substances chimiques, mais pas nécessairement toutes, la toxicité pour les plantes et les invertébrés du sol pourrait être mieux prédite en se basant sur les concentrations dans l'eau interstitielle du sol que sur les concentrations totales dans le sol.

Dans les cas où l'existence de la situation décrite dans le paragraphe précédant peut être démontrée, et où des données pertinentes et défendables sont disponibles, une option (dont les détails sont actuellement en cours d'élaboration) est offerte pour l'élaboration d'une RQES_{CES} fondée sur les concentrations dans l'eau interstitielle mesurées dans des études de toxicité appropriées plutôt qu'extrapolées à partir de la RQS_{CS}. Si cette approche est retenue, les procédures utilisées pour choisir et interpréter les données devront, autant que possible, suivre les procédures correspondantes fournies dans le protocole relatif aux sols.

En particulier, trois méthodes sont prévues pour l'élaboration de la RQES_{CES} fondée sur les concentrations dans l'eau interstitielle, notamment, par ordre de préférence :

- la méthode du poids de la preuve;
- la méthode de la concentration minimale avec effet observé (CMEO); et,
- la méthode des effets médians.

Nous vous invitons à consulter la section B.7.5 du protocole relatif aux sols pour de plus amples détails à propos de l'application de ces méthodes dans l'élaboration des RQS_{CS} pour les sols. Il conviendra d'établir les valeurs pour la RQES_{CES} fondée sur les concentrations dans l'eau interstitielle de façon parallèle à la section B.7.5 du protocole relatif aux sols autant que possible, tout en reconnaissant que certaines déviations pourront s'imposer selon les différents milieux contaminés.

4.2.2 Exclusion de la voie de contact direct avec le sol et profondeur d'enracinement

Les juridictions individuelles seront libres de permettre ou d'interdire l'exclusion de cette voie d'exposition dans les circonstances conformes à leur cadre de gestion des sites contaminés. Certaines autorités ont déjà décidé que les voies d'exposition par contact écologique avec le sol ou l'eau souterraine avaient une pertinence limitée en dessous de 3 m et peuvent donc être exclues en dessous de cette profondeur. L'information disponible sur la profondeur d'enracinement des plantes et sur les populations d'invertébrés du sol appuie cette décision, tel que discuté ci-dessous.

Bien que des profondeurs d'enracinement extrêmes aient, à l'occasion, été signalées pour certaines espèces végétales dans des conditions très arides (p. ex., Canadell *et al.*, 1996), les données disponibles appuient la conclusion que dans la plupart des conditions, les racines de la majorité des espèces végétales terrestres pertinentes au territoire canadien dépassent très rarement une profondeur de 3 m. La plupart des espèces typiques des champs cultivés et des pâturages du Canada ont des profondeurs efficaces d'enracinement de 1,5 m ou moins (Gerwitz et Page, 1974; Weaver 1926; Weaver et Bruner, 1927). La profondeur efficace des racines est définie comme étant la profondeur à laquelle une espèce végétale prend la majeure partie de son eau. Parmi les espèces à enracinement plus profond qu'on retrouve dans les champs cultivés et les pâturages au Canada, on note la luzerne, le brome, le trèfle rouge, la betterave à sucre et le carthame. Mais même chez ces espèces, seul un très faible pourcentage, le cas échéant, du système racinaire s'étendra à plus de 3 m (Borg et Grimes, 1986, Dardanelli *et al.*, 1997, Johnston *et al.*, 2002, Weaver, 1926).

Les profondeurs d'enracinement des arbres varient en fonction des conditions de sol et des espèces. Les espèces d'arbres présentes au Canada avec des systèmes racinaires relativement peu profonds comprennent le tremble, le peuplier baumier, le bouleau gris, l'épinette noire, l'épinette blanche et le mélèze laricin (Burns et Honkala, 1990a et b). Les espèces généralement enracinées plus profondément comprennent le pin tordu latifolié (pin de Murray) et le pin gris. Toutefois, comme pour les espèces des champs de culture et des pâturages, seul un très faible pourcentage du système racinaire, le cas échéant, s'étend à plus de 3 m dans des conditions typiques (Bannan, 1940; Burns et Honkala, 1990a; Horton, 1958; Strong et La Roi, 1983).

Les espèces canadiennes phréatophytes sont particulièrement pertinentes aux recommandations du premier niveau de la RQES_{CES}. Les données quantitatives sont quelque peu limitées, mais Burns et Honkala (1990b) considèrent que les espèces nord-américaines *Populus* (peupliers et trembles; n=8) et les espèces *Salix* (saules; n=1) qu'ils ont examiné présentaient un enracinement relativement peu profond. Canadell *et al.* (1996), dans une revue approfondie de la documentation scientifique mondiale sur la profondeur maximale d'enracinement, a signalé une valeur maximale de 2,2 m pour la profondeur d'enracinement des espèces *Salix* et des valeurs de 1,9 m à 2,9 m pour quatre espèces *Populus*.

Les données limitées disponibles à propos de la répartition de profondeur des invertébrés du sol appuient aussi une profondeur d'exclusion de 3 m. Startsev et Battigelli (2008) ont examiné la distribution verticale des invertébrés du sol dans deux sols non perturbés de l'Alberta et ont signalé que la majorité des invertébrés du sol (plus de 85 % des invertébrés trouvés) se situaient dans les premiers 50 cm, et que plus de 95 % se trouvaient dans le 1,5 m supérieur du profil de sol. Ainsi, seul un très faible pourcentage de la population totale des invertébrés du sol pourrait potentiellement se retrouver à plus de 3 m de profondeur.

Dans l'ensemble, il semble donc que la vaste majorité des racines végétales et la vaste majorité des invertébrés du sol se situent dans les premiers 3 m de sol, de sorte que l'exclusion de cette voie d'exposition serait scientifiquement justifiable pour les contaminants présents à une profondeur de plus de 3 m.

En raison de la mobilité des eaux souterraines, il pourrait aussi être nécessaire de considérer non seulement la profondeur jusqu'aux eaux souterraines au site d'assainissement, mais aussi la possibilité d'une profondeur moindre dans les propriétés avoisinantes.

4.2.3 Modèle conceptuel pour les espèces végétales non phréatophytes

La vaste majorité des espèces de plantes et de récoltes canadiennes ne sont pas phréatophytes. Là où la possibilité que des espèces phréatophytes soient présentes peut être exclue avec confiance en raison des conditions propres au site (les espèces phréatophytes sont typiquement associées aux habitats riverains), il pourrait être avantageux d'envisager un autre modèle pour l'exposition des plantes et invertébrés propre au site (c.-à-d. deuxième niveau). Le reste de cette sous-section décrit le « modèle d'inondations multiples », qui pourrait être utile à cet égard.

Pour que des espèces végétales non phréatophytes soient exposées aux contaminants dans les eaux souterraines, un mécanisme doit être postulé pour expliquer la migration des contaminants dans l'eau souterraine sous-jacente jusqu'à la zone vadose. Le mécanisme le plus plausible pourrait être une inondation saisonnière de la zone vadose par des eaux souterraines à des niveaux variables.

L'inondation par des eaux souterraines est présumée survenir une fois par saison et on suppose que le niveau de l'eau souterraine monte alors brièvement jusqu'au niveau de la surface du sol (peu probable, mais il s'agit néanmoins d'une hypothèse conservatrice qui diminue significativement la complexité du modèle).

Durant un unique et bref événement d'inondation (en ignorant toute dilution de l'eau souterraine associée), l'eau souterraine avec une concentration de contaminant C_e (mg/L) monte jusqu'à la zone vadose et se retire ensuite. La concentration maximale possible dans le sol résultant de cet événement peut être estimée, en présumant que toute la masse de contaminants transportée par l'eau souterraine montante demeure dans la zone vadose, par le biais de l'équation suivante :

$$C_s(0) = \frac{C_e \times n}{\rho_a} \quad (\text{Équation B.4.3})$$

Où :

- $C_s(0)$ = Concentration de contaminant dans le sol de la zone vadose immédiatement après l'inondation et le drainage (c.-à-d. au temps $t=0$; mg/kg)
- C_e = Concentration de contaminant dans l'eau souterraine, présumée être égale à la concentration dans l'eau interstitielle de la zone vadose durant l'inondation (mg/L)
- n = porosité totale du sol de la zone vadose (sans unité)
- ρ_a = densité apparente du sol de la zone vadose (sec) (g/cm^3)

Maintenant, conformément au protocole relatif aux sols, la masse de contaminants dans la zone vadose est présumée subir une dégradation de premier ordre. À la fin de la première année, la concentration dans le sol sera réduite et pourra être calculée par le biais de l'équation suivante :

$$C_s(1) = C_s(0)e^{-L_{NS} \times 1} \quad (\text{Équation B.4.4})$$

Où :

- $C_s(1)$ = concentration de contaminant dans le sol de la zone vadose un an après l'inondation et le drainage (c.-à-d. au temps $t=1$) (mg/kg)
 L_{NS} = constante de dégradation dans la zone non saturée (an^{-1})

Toutefois, à la fin de la première année, il convient de présumer une nouvelle inondation semblable, et la concentration dans la zone vadose augmentera alors comme suit :

$$C_s(1+) = C_s(0)e^{-L_{NS} \times 1} + C_s(0)$$

Ou bien :

$$C_s(1+) = C_s(0)(1 + e^{-L_{NS} \times 1}) \quad (\text{Équation B.4.5})$$

Où :

- $C_s(1+)$ = concentration de contaminant dans le sol de la zone vadose un an après l'inondation et le drainage et une deuxième inondation (mg/kg)

Après plusieurs années d'inondations annuelles successives et de dégradation continue, la concentration dans la zone vadose devient :

$$C_s(n) = C_s(0)(1 + e^{-L_{NS} \times 1} + e^{-L_{NS} \times 2} + e^{-L_{NS} \times 3} + \dots) \quad (\text{Équation B.4.6})$$

Où :

- $C_s(n)$ = concentration de contaminant dans le sol de la zone vadose après n années d'inondations annuelles (mg/kg)

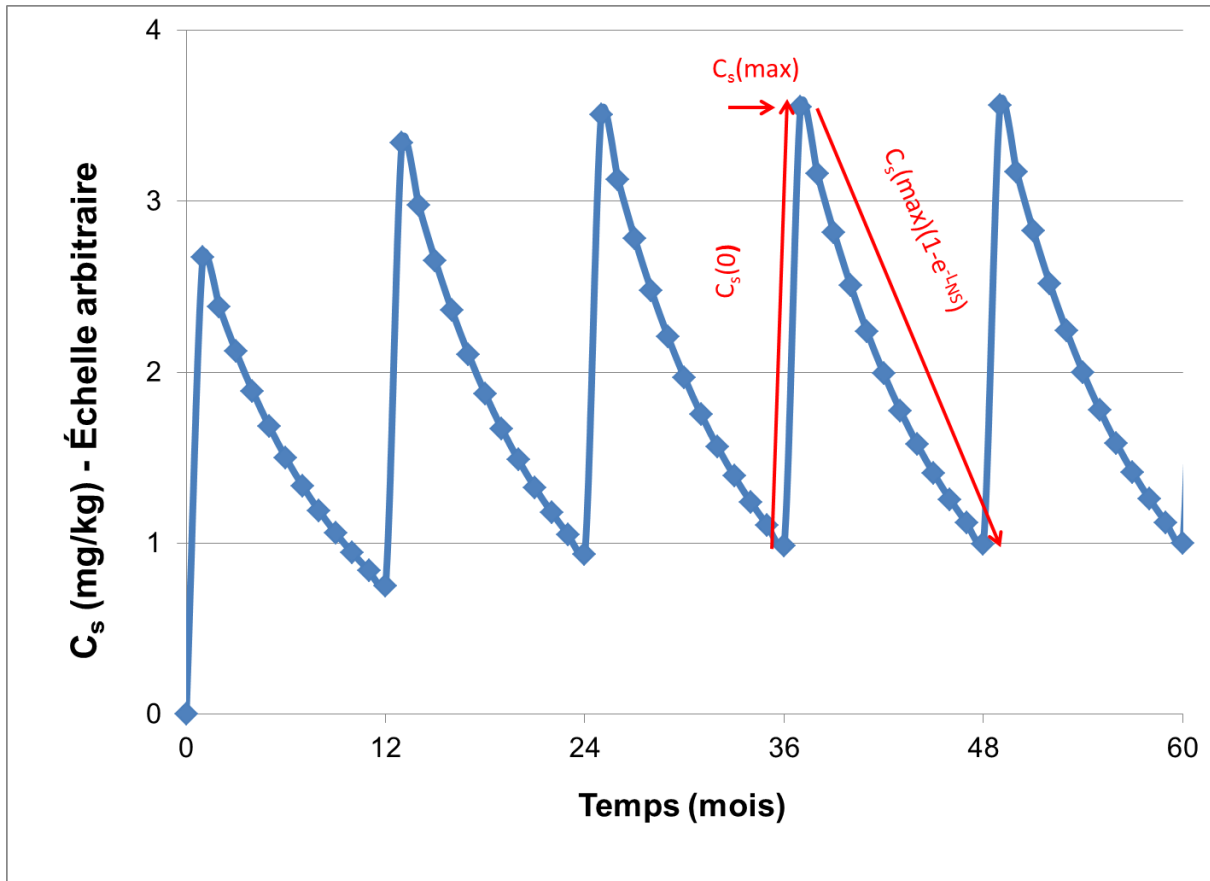


Figure 2 : Exemple de représentation graphique de la concentration dans le sol de la zone vadose selon le modèle d'inondations multiples

La figure 2 fournit un exemple de la concentration dans le sol de la zone vadose changeant au fil du temps selon le modèle d'inondations multiples. Dans cet exemple, des inondations annuelles surviennent et la demi-vie du contaminant est de 0,5 année, correspondant à $L_{NS} = 1,386 \text{ année}^{-1}$. Cet exemple illustre comment la concentration augmente immédiatement après l'inondation et atteint alors une valeur maximale, de sorte que la perte de contaminant due à la dégradation en une année est égale à la masse de contaminants ajoutée par chaque inondation. Cela se produira à une concentration $C_s(\max)$ où :

$$C_s(\max) \times (1 - e^{-L_{NS} \times 1}) = C_s(0) \quad (\text{Équation B.4.7})$$

Où :

$C_s(\max)$ = concentration maximale du sol de la zone vadose (mg/kg)

En combinant et reformulant les équations B.4.3 et B.4.7, on obtient :

$$C_s(\max) = \frac{C_e \times n}{\rho_a \times (1 - e^{-L_{NS} \times 1})}$$

(Équation B.4.8)

La recommandation pour l'eau souterraine fondée sur une protection adéquate pour la voie d'exposition par contact avec le sol peut être calculée comme suit :

$$RQES_{CES} = RQS_{CS} \times \left(\frac{\rho_a \times (1 - e^{-L_{NS} \times 1})}{n} \right) \quad (\text{Équation B.4.9})$$

De façon plus générale, avec un temps T entre chaque inondation, l'équation devient :

$$RQES_{CES} = RQS_{CS} \times \left(\frac{\rho_a \times (1 - e^{-L_{NS} \times T})}{n} \right) \quad (\text{Équation B.4.10})$$

Où :

- $RQES_{CES}$ = recommandation pour la qualité de l'eau souterraine fondée sur une protection adéquate pour la voie par contact de l'eau souterraine avec les plantes et les invertébrés du sol (mg/L)
- RQS_{CS} = recommandation pour la qualité des sols fondée sur une protection adéquate pour la voie par contact du sol avec les plantes et les invertébrés du sol (mg/kg)
- T = temps entre les inondations (années)

Cette équation est appelée le « modèle d'inondations multiples ».

4.2.4 Résumé du processus d'élaboration des $RQES_{CES}$

Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines fondées sur le contact avec l'eau souterraine pour les organismes inféodés au sol sont basées sur l'hypothèse conservatrice que les racines d'espèces phréatophytes sont immergées de façon permanente dans les eaux souterraines contaminées, et qu'elles absorbent ces eaux. On prévoit que les plantes et les invertébrés périodiquement inondés par les eaux souterraines contaminées seront aussi protégés avec le même modèle conceptuel pour les espèces phréatophytes. Les $RQES_{CES}$ sont calculées soit sur l'extrapolation à partir des RQS_{CS} pour les terres agricoles au moyen des équations décrites dans la section 4.2, soit directement d'après une évaluation et une analyse des données sur la toxicité de l'eau interstitielle décrites dans la section 4.2.1. La voie d'exposition par contact avec les eaux souterraines peut être exclue, au deuxième niveau, dans les cas où la profondeur jusqu'aux eaux souterraines permet d'exclure la possibilité d'un contact avec les racines et les invertébrés tel que décrit dans la section 4.2.2. Dans les situations où on prévoit que les eaux souterraines entrent en contact avec les racines et les invertébrés (p. ex. profondeur de la nappe phréatique de ≤ 3 m), mais qu'il n'y a pas d'espèces phréatophytes, on peut ne pas considérer le niveau 1 en calculant un objectif d'assainissement propre au lieu (p. ex. niveau 2) pour protéger les plantes et les invertébrés au moyen du modèle d'inondations multiples décrit dans la section 4.2.3.

4.3 *Élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines fondées sur la protection de la vie aquatique*

Une migration latérale de la contamination présente dans les eaux souterraines est possible. Si des plans d'eau de surface (ruisseaux, rivières, lacs, etc.) se situent à proximité, il est possible que la vie aquatique dans ces plans d'eau de surface soit atteinte par la contamination, en particulier si une zone perméable relie la zone contaminée et le plan d'eau de surface. Le but des recommandations pour la qualité des eaux souterraines fondées sur la protection de la vie aquatique est de déterminer les concentrations dans l'eau souterraine qui sont suffisamment basses que, en tenant compte de l'atténuation, la concentration dans l'eau souterraine se déversant dans un plan d'eau de surface respecte les *Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux : protection de la vie aquatique* (CCME, 1999).

Afin d'élaborer des recommandations génériques, il est présumé que le plan d'eau de surface est situé à une distance de 10 m de l'eau souterraine contaminée. Bien que nous reconnaissons que l'eau souterraine pourrait être diluée dans une zone de mélange initial en atteignant un plan d'eau de surface, aucun facteur de dilution n'est appliqué pour le mélange dans le plan d'eau de surface aux fins de l'élaboration de recommandations génériques en raison de la nature propre au site de ce processus et de la variabilité des décisions relatives aux orientations à travers les différentes juridictions canadiennes à l'égard de la dilution dans l'environnement récepteur.

Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines fondées sur cette voie d'exposition sont calculées en fonction du modèle pour les concentrations dans l'axe du panache fourni dans l'équation 6 de Domenico (1987) (le « modèle de Domenico »). L'équation a été modifiée pour refléter l'hypothèse conservatrice qu'il n'y a aucune dispersion dans la direction verticale (z). Le modèle estime la diminution de la concentration de contaminant dans l'eau souterraine sur 10 m de distance de déplacement latéral en tenant compte du transport en aval des contaminants, y compris la dispersion en direction longitudinale (x) et latérale (y) et la dégradation de premier ordre. Le modèle est conforme au modèle correspondant du CCME pour les recommandations pour la qualité des sols.

Divers auteurs, y compris West *et al.* (2007 et MEO, 2009) ont noté que le modèle de Domenico est une solution approximative et que des solutions précises existent. Toutefois, cette question a été examinée par le CCME, et il a été déterminé que les approximations en question sont mineures par rapport aux incertitudes globales reliées à l'élaboration de recommandations pour la qualité des eaux souterraines et, en conséquence, l'utilisation du modèle approximatif de Domenico est jugée appropriée.

Le modèle est décrit en détail dans l'annexe A et les paramètres du modèle sont inclus dans l'annexe B. Cette voie est évaluée pour les contaminants organiques solubles seulement. Des recommandations distinctes pour la qualité des eaux souterraines en vue de la protection de la vie aquatique sont calculées pour la vie aquatique d'eau douce et marine (RQES_{VAD} et RQES_{VAM}) si les recommandations canadiennes correspondantes pour la qualité de l'eau (de surface) sont disponibles.

Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines en vue de la protection de la vie aquatique sont indépendantes de la classification de l'utilisation du terrain; toutefois, des recommandations distinctes sont calculées pour les sols à texture fine ou à texture grossière pour refléter les différences sur le plan du transport de l'eau souterraine entre les différents types de sol.

4.3.1 Version du modèle variable en fonction du temps ou fondée sur l'état d'équilibre

Domenico (1987) a prévu une version du modèle variable en fonction du temps ainsi qu'une version fondée sur l'état d'équilibre. Échelonnées sur des périodes suffisamment longues, les deux versions produisent des résultats identiques. Le protocole relatif aux sols (CCME, 2006) a utilisé la version variable en fonction du temps et produit donc des concentrations dans les eaux souterraines en fonction du temps. Le choix entre le modèle variable dans le temps et le modèle fondé sur l'état d'équilibre a été dûment considéré pour le calcul des recommandations pour les eaux souterraines. Les avantages d'utiliser le modèle fondé sur l'état d'équilibre comprennent le fait de pouvoir travailler avec une équation plus simple et l'élimination du risque d'utiliser une période d'évaluation d'une durée inappropriée (trop courte). Les avantages du modèle variable en fonction du temps comprennent l'option qu'ont les juridictions de restreindre la limite de temps supérieure considérée dans le cas de contaminants fortement retardés (c.-à-d. qui se déplacent très lentement) lorsque les taux de dégradation sont présumés être de zéro. Cette question a été longuement examinée par le CCME, et il fut décidé d'utiliser la version variable en fonction du temps du modèle dans ce document (annexe A). Il convient de veiller à entrer une période de temps suffisamment longue pour s'assurer d'obtenir un résultat fondé sur l'état d'équilibre, à moins qu'une juridiction ne décide de restreindre explicitement la durée maximale considérée.

4.3.2 Versions à source épuisable ou non épuisable du modèle

Le transport des contaminants de l'eau souterraine, par définition, retire une certaine masse de contaminants de la source. Ainsi, à moins qu'il n'y ait un point d'alimentation externe en contaminants vers la source, les concentrations de contaminants à la source, dans le sol ou l'eau souterraine, auront tendance à diminuer au fil du temps. Le processus de dégradation pourrait aussi contribuer à la baisse des concentrations à la source au fil du temps. Toutefois, le modèle utilisé dans le présent document pour calculer les recommandations génériques pour la qualité des eaux souterraines ne tient pas compte de l'épuisement de la source (c.-à-d. qu'il présume un scénario où la source est inépuisable) pour les raisons stipulées ci-dessous.

La source de contamination des eaux souterraines provient souvent de la contamination du sol. Les calculs de bilan massique permettent d'estimer le taux (de premier ordre) de diminution de la contamination d'un sol source dû au lessivage par l'infiltration des précipitations. Dans la plupart des cas, le temps requis pour une réduction significative de la contamination du sol source est supérieur au temps requis pour atteindre un état d'équilibre dans la concentration de l'eau souterraine à 10 m en aval de la source, et aussi généralement supérieur à la durée des essais ponctuels ou chroniques sur lesquels les recommandations pour la qualité de l'eau en vue de la

protection de la vie aquatique sont fondées. Le but des recommandations génériques pour la qualité des eaux souterraines est la protection de la qualité de l'eau en tout temps dans le futur, de sorte qu'il ne conviendrait pas d'inclure la notion d'épuisement de la source, qui donnerait lieu à des valeurs moins rigoureuses pour les recommandations, dans le calcul d'une recommandation générique de la qualité des eaux souterraines.

De plus, un modèle fondé sur une source épuisable pourrait ne pas être suffisamment conservateur dans le cas où des liquides en phase non aqueuse seraient présents.

Dans le cas où un panache d'eau souterraine est présent, mais où il n'y a aucune contamination dans le sol (possiblement en raison de l'excavation complète du sol source et de son remplacement par du sol propre), un modèle fondé sur une source épuisable pourrait être approprié. Toutefois, un tel modèle serait appliqué dans le cadre d'une évaluation du risque propre au site et ne fait donc pas partie des calculs en vue de recommandations génériques.

4.3.3 Guide d'établissement du taux de dégradation dans l'eau souterraine

Le modèle pour les eaux souterraines en vue de la protection de la vie aquatique d'eau douce décrit dans la présente section et présenté dans l'annexe A présume que les contaminants organiques dans l'eau souterraine sont sujets à une dégradation de premier ordre. Le taux de dégradation est inclus dans le modèle en tant que demi-vie de dégradation.

Le taux de dégradation des substances chimiques organiques dans les eaux souterraines n'est pas une constante, mais varie plutôt selon des ordres de grandeur en fonction d'une vaste gamme de facteurs propres au site, y compris le type et la densité des populations de bactéries présentes, la disponibilité de nutriments et la disponibilité d'accepteurs d'électrons terminaux (oxygène, nitrate, sulfate, etc.).

Étant donné la nature variable et propre au site des taux de dégradation dans les eaux souterraines, toute valeur retenue pour ce taux dans l'élaboration de recommandations génériques (premier niveau) doit être suffisamment conservatrice pour s'appliquer à la plus grande majorité des sites. En pratique, cela se traduira souvent par le fait de considérer soigneusement les plus faibles taux de décomposition signalés dans la documentation scientifique, en tenant compte des études en milieu aérobie et anaérobie.

Un bon point de départ dans ce processus consiste à déterminer si des taux de dégradation pour les eaux souterraines sont disponibles auprès des différents organismes de réglementation. Ceux-ci ne devront pas nécessairement être acceptés sans discussion; il conviendra plutôt d'examiner, dans la mesure du possible, les données sous-jacentes.

Si aucune valeur ne peut être fournie par des organismes de réglementation, il sera nécessaire d'entreprendre une recherche dans la documentation scientifique et d'identifier les études susceptibles de fournir des données potentiellement pertinentes. Il sera important de procéder à un examen critique de toutes les données afin de vérifier la pertinence de la méthode expérimentale. Il existe de nombreuses techniques en laboratoire et sur le terrain qui peuvent être

utilisées pour établir les valeurs des taux de dégradation en eau souterraine. Quelques-unes sont résumées et discutées dans SABCS (2006). Des renseignements généraux sur les types de données en matière de dégradation sont présentés ci-dessous, avec quelques commentaires, par ordre de préférence.

1. Données recueillies sur le terrain. Généralement, les données sur les taux de dégradation découlant de véritables études sur le terrain sont préférées aux autres types de données, surtout s'il s'agit de données pertinentes pour les conditions des eaux souterraines en territoire canadien. De telles études sont les plus pertinentes puisqu'elles portent sur les conditions véritables qu'on retrouve dans les eaux souterraines. Idéalement, ces études ne comporteraient aucun ajout d'amendement à l'eau souterraine et incluraient la mesure de facteurs pertinents aux taux de dégradation, y compris la détermination des conditions (aérobie ou anaérobie) sous la surface. Cependant, le temps et les frais qu'il faut investir pour mener de telles études signifient qu'elles ne sont disponibles que pour une gamme limitée de composés.
2. Données de laboratoire obtenues à partir d'échantillons d'eau souterraine ou de boue de sédiments recueillis sur le terrain. De telles études visent à reproduire les conditions souterraines en laboratoire. Idéalement, aucun amendement ne serait ajouté aux échantillons et l'incubation se ferait à des températures fraîches représentatives des conditions de l'eau souterraine, et possiblement à la noirceur. Idéalement, les conditions en milieu aérobie et anaérobie seraient examinées.
3. Autres données de laboratoire pertinentes. Si aucune donnée des catégories 1 et 2 n'est disponible, d'autres données de dégradation provenant d'essais en laboratoire pourraient être pertinentes. À tout le moins, de telles études ne devraient pas utiliser de nutriments ou de bactéries comme amendements. Idéalement, les études seraient menées dans des conditions de noirceur et de froid et examineraient les conditions en milieu aérobie et anaérobie.

Pour certaines substances chimiques organiques, la majorité des données de dégradation proviennent d'essais à court terme (de quelques heures à quelques jours), menées avec des bactéries acclimatées et un excès de nutriments et d'oxygène. Ces études sont généralement conçues dans le but de vérifier si la substance chimique en question peut se décomposer dans des conditions optimales. Les taux de décomposition provenant de telles études n'ont guère de pertinence pour les conditions en eau souterraine et ne devraient normalement pas être utilisés dans l'établissement des taux de dégradation en eau souterraine.

Si des données conformes aux catégories 1, 2 et 3 ci-dessus sont disponibles, il pourrait être possible d'établir une valeur pour le taux de dégradation en eau souterraine. En général, il conviendra d'utiliser le plus faible taux de dégradation disponible. Toutefois, un jugement professionnel sera quand même requis pour déterminer si le taux est approprié et raisonnablement conservateur pour la gamme de conditions propres aux sites canadiens (y compris les sites avec des conditions de milieu anaérobie). Les facteurs additionnels dont il conviendra de tenir compte pourraient inclure tout renseignement qualitatif ou semi-quantitatif provenant d'études sur le terrain susceptible de confirmer ou réfuter que la dégradation est active en eau souterraine. Un autre facteur à considérer serait si le contaminant risque d'inhiber

l'activité bactérienne à la valeur calculée pour les recommandations de la qualité des eaux souterraines, soit directement pas le biais d'un essai de toxicité, ou indirectement en générant un panache d'eau souterraine en milieu anaérobie.

4.3.4 Applicabilité de la dégradation en eau souterraine

Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines calculées par le biais du modèle décrit dans la présente section et présenté dans l'annexe A sont fondées sur l'hypothèse que les contaminants organiques dans l'eau souterraine sont sujets à une dégradation de premier ordre. Des conseils pour l'évaluation des données disponibles en vue d'établir un taux de dégradation conservateur approprié ont été fournis dans la section B.4.3.3 ci-dessus. Si des données adéquates ne sont pas disponibles, ou si les données disponibles indiquent qu'aucune dégradation ne se fait, alors il conviendra d'entrer un taux de dégradation de zéro (ou une demi-vie infiniment longue) dans le modèle et de ne pas tenir compte de la dégradation.

Bien que cela ne soit pas pertinent pour l'élaboration de recommandations génériques pour la qualité des eaux souterraines, certaines considérations propres au site pourraient être pertinentes pour déterminer si la décomposition s'applique, notamment :

- la présence d'autres contaminants dans l'eau souterraine (p. ex., des sels) qui pourraient inhiber l'activité bactérienne;
- la présence d'un co-contaminant qui pourrait être dégradé préférentiellement;
- la présence d'un panache d'eau souterraine en anaérobie qui pourrait restreindre la dégradation biologique;
- des taux inhabituellement faibles de nutriments clés (p. ex., le phosphate) dans l'eau souterraine dans des cas où l'on sait que les bactéries en auront besoin pour la dégradation de la substance chimique en question.

Les juridictions individuelles décideront elles-mêmes de la pertinence de considérer ou de ne pas considérer la dégradation en eau souterraine dans les calculs aux fins de l'élaboration de recommandations génériques pour la qualité des eaux souterraines en fonction de leur propre cadre de gestion des sites contaminés. La dégradation en eau souterraine pourra être exclue des recommandations génériques pour la qualité des eaux souterraines simplement en adoptant la recommandation pour la qualité de l'eau de surface en vue de la protection de la vie aquatique comme recommandation pour la qualité des eaux souterraines.

4.4 Élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines en vue de la protection de l'eau d'abreuvement du bétail et de l'eau d'irrigation

Les puits et les étangs-réservoirs sont des sources potentielles d'eaux souterraines utilisées pour l'abreuvement du bétail ou l'irrigation des cultures. Un puits ou un étang-réservoir peut potentiellement être installé ou construit à n'importe quel emplacement. En général, il ne sera donc pas possible de déterminer avec confiance la distance latérale minimale séparant l'eau souterraine contaminée et un puits ou un étang-réservoir. Il n'est donc pas possible de présumer d'une atténuation minimale de l'eau souterraine avant l'exposition du récepteur à l'eau

souterraine contaminée. En conséquence, les recommandations pour la qualité des eaux souterraines en vue de la protection de l'eau d'abreuvement (RQES_{EA}) et de l'eau d'irrigation (RQES_{IR}) sont numériquement égales aux *Recommandations canadiennes pour la qualité de l'eau en vue de protéger les utilisations de l'eau à des fins agricoles (irrigation et abreuvement du bétail)* (CCME, 1999).

4.5 Examen de voies d'exposition supplémentaires

Dans la plupart des situations, les voies d'exposition décrites ci-dessus devraient suffire à l'élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines visant à préserver la qualité de l'environnement. Il existe néanmoins d'autres voies d'exposition, telles que le contact cutané des espèces fauniques avec l'eau contaminée. S'il ressort de la documentation scientifique qu'une autre voie d'exposition peut comporter des risques pour un contaminant donné, il convient de l'évaluer. À ce stade, on ne fournit pas ici d'indications précises pour l'évaluation des autres voies d'exposition; dans la mesure du possible, les méthodes publiées par des organismes de réglementation comme Environnement Canada ou l'Environmental Protection Agency des États-Unis (USEPA) devraient être appliquées.

PARTIE C

1. Élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines en fonction de la santé humaine

1.1 Introduction

Comme détaillé dans la section C.1.1 du protocole relatif aux sols, l'élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines en fonction de la santé humaine comprend :

- l'évaluation du danger ou du risque toxicologique posé par une substance chimique;
- la détermination de la dose journalière estimée (DJE) de cette substance chimique, sans égard à un site contaminé donné (c.-à-d., l'exposition « de fond »);
- la définition de scénarios génériques d'exposition pour les utilisations résidentielles/agricoles et commerciales/industrielles des terrains;
- l'intégration des données d'exposition et de toxicité pour préparer des recommandations pour la qualité des eaux souterraines. Ces recommandations doivent veiller à ce que l'exposition totale à un contaminant (DJE et exposition au site) ne présente aucun risque appréciable pour la santé humaine.

Les étapes suivies pour élaborer les recommandations pour la qualité des eaux souterraines sont semblables à celles utilisées pour les évaluations du risque propre au site et sont soumises à plusieurs sources d'incertitude détaillées dans la section C.1.3 du protocole relatif aux sols. Les voies d'exposition sont évaluées à l'aide de modèles mathématiques. Les paramètres d'entrée des modèles dépendent du choix d'un récepteur humain sensible ainsi que de la durée, de la fréquence et de l'intensité de l'exposition. L'évaluation des voies indirectes d'exposition doit par ailleurs tenir compte des paramètres d'entrée représentant les caractéristiques physiques du site, qui dépendent du type de sol. Des modèles simplifiés ont été délibérément choisis pour représenter ces voies indirectes afin de limiter le nombre de paramètres d'entrée présumés; au niveau d'un site particulier, des modèles plus complexes accompagnés de données détaillées propres au site concerné peuvent fournir des résultats de modélisation plus précis.

Les voies potentielles d'exposition examinées dans le cadre de l'élaboration de recommandations pour la qualité des eaux souterraines en fonction de la santé humaine sont :

- l'ingestion d'eau souterraine utilisée comme eau potable (de même que l'exposition par contact cutané et par inhalation résultant de l'utilisation domestique de l'eau souterraine);
- la volatilisation et migration des contaminants de l'eau souterraine vers l'air intérieur (s'applique aux contaminants volatils seulement).

L'élaboration d'objectifs propres à un site par modification restreinte de recommandations génériques ou par le biais d'une évaluation du risque donne la souplesse nécessaire pour éliminer ou ajouter des voies d'exposition ou pour utiliser des modèles propres à un site dans le but d'obtenir des valeurs plus précises.

1.2 *Principes directeurs*

Les principes directeurs (énumérés ci-dessous) régissant l'élaboration de recommandations génériques pour la qualité des eaux souterraines visant à protéger la santé humaine correspondent aux principes adoptés par le CCME pour les lieux contaminés (adapté de CCME, 2006).

1. Un site contaminé ne devrait poser aucun risque appréciable pour les humains. Il ne devrait y avoir aucune restriction quant à l'ampleur ou à la nature de l'interaction avec le site dans les limites de chaque vocation permise sur le terrain. Les activités normalement associées à la vocation du terrain ne devraient poser aucun risque sanitaire appréciable.
2. Les recommandations reposent sur des situations représentatives clairement définies. L'élaboration de recommandations numériques nécessite la définition de scénarios précis à l'intérieur desquels l'exposition probable à un site peut être prédite avec un certain degré de certitude.
3. L'élaboration des recommandations tient compte de toutes les voies d'exposition pertinentes. Elle prend également en considération l'exposition totale aux contaminants présents dans le sol, l'air, l'eau et les produits de consommation.
4. Pour garantir que les recommandations ne limitent pas les activités d'un lieu à l'intérieur de la catégorie prévue d'utilisation des terrains, les scénarios d'exposition sont habituellement fondés sur le récepteur le plus sensible à la substance chimique considérée et sur l'effet le plus critique pour la santé.
5. Les recommandations devraient être raisonnables, pratiques et utilisables. Elles sont élaborées en fonction des informations obtenues scientifiquement, soutenues par le jugement d'un professionnel lorsqu'il y a des lacunes dans les données. Parfois, les procédures établies fondées sur l'exposition peuvent produire des recommandations numériques, soit nettement inférieures aux concentrations naturelles de fond des contaminants dans l'eau souterraine, soit en deçà des limites pratiques de quantification. Dans ce cas, comme les recommandations ne peuvent être inférieures aux concentrations de fond, il conviendrait d'élaborer des recommandations provisoires en fonction des concentrations de fond dans l'eau souterraine.

1.3 *Analyse de la toxicologie du contaminant*

La toxicologie des contaminants est abordé en détail dans la section C.2 du protocole relatif aux sols. La toxicité des contaminants est représentée par des valeurs toxicologiques de référence (VTR) établies ou reconnues par Santé Canada. En particulier, pour les substances chimiques à

seuil d'effet, une dose journalière admissible (DJA) ou une concentration admissible (CA) est utilisée pour évaluer la toxicité chimique pour les êtres humains; pour les substances chimiques sans seuil d'effet, on utilisera une dose correspondant à un risque spécifié (DCRS) ou une concentration correspondant à un risque spécifié (CCRS), élaborée à partir du facteur de pente (FP) ou du risque unitaire d'inhalation (RUI).

1.4 Exposition aux contaminants

La section C.3 du protocole relatif aux sols fournit de l'information sur ce qu'il convient de faire à propos des mélanges de substances chimiques et sur l'établissement de la dose journalière estimée (DJE) pour représenter l'exposition de fond à un contaminant; cette information n'est pas répétée dans le présent document.

1.5 Relations entre les recommandations pour la qualité des eaux souterraines et les recommandations relatives aux sols et à l'eau

Les recommandations fondées sur l'ingestion d'eau souterraine utilisée comme eau potable sont généralement basées sur les *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada* (RQEPC) (voir section C.3 ci-dessous). Bien que les RQEPC aient été élaborées pour les systèmes d'eau au point d'exposition, elles s'appliquent pour les eaux souterraines et les eaux de surface utilisées comme sources d'eau domestique. Là où les eaux souterraines sont ou pourraient potentiellement être utilisées comme sources d'eau potable et où les concentrations chimiques excèdent les RQEPC en raison de la contamination d'un site, la gestion des eaux souterraines s'imposera. Les options pourraient inclure, mais sans y être limitées : l'assainissement de l'aquifère, le traitement de l'eau potable, une autre source d'approvisionnement en eau, la surveillance à long terme du site ou des contrôles administratifs (c.-à-d., le suivi des conditions du site sur le titre foncier ou un document équivalent).

Les recommandations fondées sur la volatilisation des contaminants vers l'air intérieur ne sont pas explicitement basées sur d'autres recommandations, mais sont étroitement liées aux recommandations canadiennes pour la qualité des sols calculées pour la même voie d'exposition. Les recommandations pour la qualité des sols et des eaux souterraines en vue de la protection de l'air intérieur sont toutes deux calculées en fonction du même modèle de transport des vapeurs et des mêmes paramètres d'entrée pour le modèle (voir les annexes A et B).

2. Scénarios et voies d'exposition

Les scénarios et voies d'exposition utilisés pour l'élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines sont basés sur ceux appliqués aux Recommandations canadiennes pour la qualité des sols. Veuillez consulter la section C.4 du protocole relatif aux sols (CCME, 2006) pour un examen plus approfondi des scénarios et des voies d'exposition; un aperçu est fourni ci-dessous.

2.1 Hypothèses sur l'exposition

Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines en vue de la protection pour la santé humaine sont élaborées dans le but de s'assurer que l'exposition aux contaminants à la concentration prescrite par la recommandation n'aura pas d'effets nocifs sur la santé humaine. À cette fin, le CCME suppose un scénario d'exposition chronique (c.-à-d.. une exposition durant toute une vie à un terrain assaini). Cette hypothèse conservatrice vise à ce qu'aucune limite n'existe quant aux activités liées à l'utilisation désignée du terrain ou de l'eau souterraine.

Les recommandations sont élaborées de façon à tenir compte des voies potentielles d'exposition humaine dans différents milieux. Il convient de présumer que les êtres humains sont potentiellement exposés à cinq milieux différents par le biais d'un site contaminé : le sol, l'eau, l'air, la nourriture et les produits de consommation. Il est anticipé que l'exposition directe à l'eau souterraine contaminée découlera principalement de l'ingestion de l'eau souterraine contaminée.

Le transfert d'une substance chimique d'une eau souterraine contaminée vers un autre milieu peut entraîner une exposition indirecte aux contaminants de l'eau souterraine. Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines prennent en compte la volatilisation et la migration des contaminants de l'eau souterraine vers l'air intérieur.

Si l'on juge que le scénario d'exposition utilisé pour élaborer les recommandations génériques n'est pas adapté au lieu particulier à assainir, on pourra modifier à l'intérieur de certaines limites les recommandations génériques au moyen d'objectifs propres au lieu. Pour ce faire, on peut par exemple éliminer des voies d'exposition, en ajouter ou les adapter de façon à représenter plus précisément le scénario d'exposition propre à un lieu.

2.1.1 Contaminants à seuil d'effet

Pour les contaminants à seuil d'effet, les recommandations considèrent qu'au site contaminé, l'exposition provient de multiples milieux. Il en va de même avec l'exposition de fond telle que représentée par la DJE. Les recommandations sont élaborées en calculant la dose journalière résiduelle admissible (DJRA) comme étant la différence entre la DJA et la DJE ($DJRA = DJA - DJE$), et en répartissant ensuite la DJRA entre les différents milieux d'exposition primaires. Comme on peut le voir à la figure 3, une valeur par défaut de 20 % de la DJRA est impartie à chacun des cinq milieux primaires (l'air, l'eau, le sol, les aliments et les produits de consommation). Cette répartition se fait en multipliant la DJRA par un « facteur de répartition » (FR) qui, par défaut, a une valeur de 0,2 (20 %).

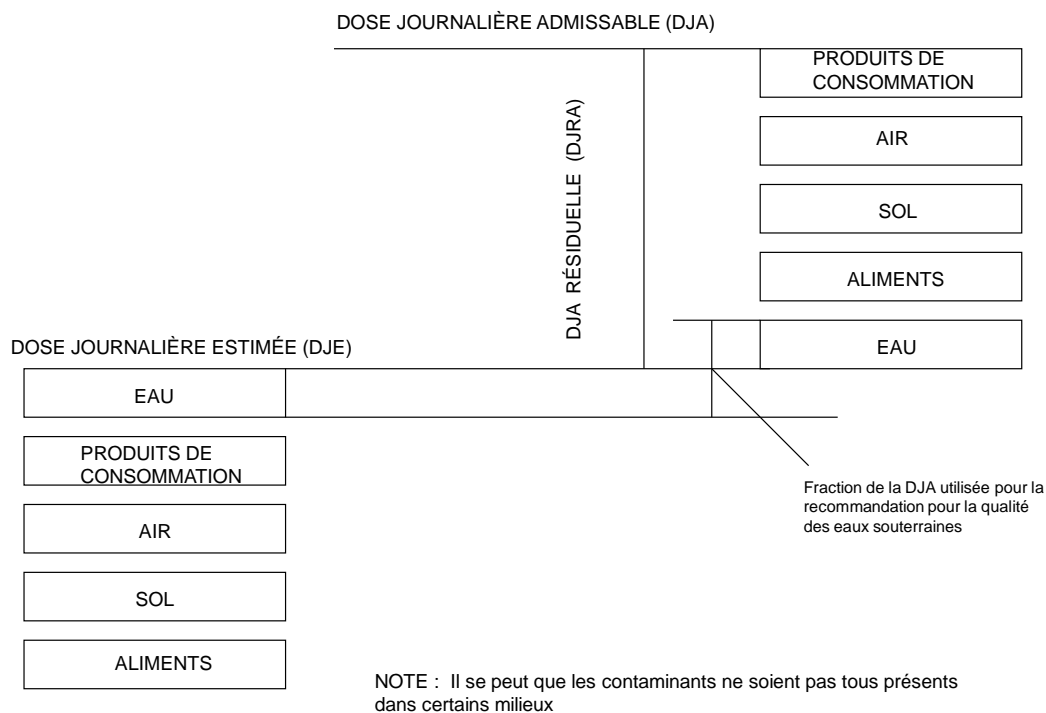


Figure 3 : Élaboration conceptuelle de la recommandation pour la qualité des eaux souterraines relative aux substances chimiques à seuil d'effet d'après l'évaluation de l'exposition à plusieurs milieux et d'après le facteur de répartition présumé dans la dose journalière résiduelle admissible

Les expositions par inhalation peuvent être évaluées en utilisant la CA au lieu de la DJA. Dans ce cas, une approche semblable est appliquée : la concentration de fond dans l'air est soustraite de la CA et la « CA résiduelle » est multipliée par le FR.

Selon leurs propriétés physiques et chimiques, il est possible que certains contaminants des eaux souterraines ne soient pas normalement présents dans les quatre autres milieux (air, sol, aliments et produits de consommation). Par exemple, les hydrocarbures à fort poids moléculaire ont une volatilité très faible et la contribution de l'air à l'exposition humaine totale peut donc être négligeable. S'il peut être prouvé qu'un contaminant n'est pas présent dans un milieu donné, la DJRA peut être répartie sur un nombre réduit de milieux et le facteur de répartition peut être supérieur à 20 % ; sa valeur sera alors calculée en utilisant la formule suivante :

$$FR = 1 / (\text{nombre de milieux d'exposition applicables}) \quad (\text{Équation C.2.1})$$

Dans le cas de certaines substances chimiques, la DJE peut être supérieure à la DJA, produisant une DJRA de 0 ou moins. Dans de telles circonstances, il convient de consulter Santé Canada pour déterminer une approche appropriée aux fins de l'élaboration de la recommandation pour la qualité des eaux souterraines.

2.1.2 Contaminants sans seuil d'effet

Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines pour les substances chimiques sans seuil d'effet, comme dans le cas des recommandations pour les sols, sont fondées sur un risque additionnel spécifié au-dessus du niveau d'exposition de fond provenant des eaux souterraines assainies à la concentration prescrite par la recommandation. Les recommandations sont élaborées pour un risque additionnel de 1×10^{-5} et de 1×10^{-6} ; les différentes juridictions peuvent appliquer la recommandation en utilisant l'un ou l'autre de ces niveaux de risque additionnel.

2.2 Absorption de substances chimiques par le corps

Comme il est indiqué à la section C.4.2 du protocole relatif aux sols (CCME, 2006), le risque sanitaire posé par une exposition particulière dépend de la dose absorbée; lorsque l'étude toxicologique critique a été réalisée pour un milieu d'exposition différent de celui étudié, un facteur d'absorption relative (FA) peut être appliqué pour représenter la différence d'absorption du contaminant par le corps dans les deux milieux différents, si ce facteur est appuyé par des données adéquates.

Cependant, dans le cas d'une exposition directe aux eaux souterraines, il conviendra de se baser sur les Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada ou les valeurs guides provisoires pour les sources d'eaux souterraines (voir la section C.5.3.2 du protocole relatif aux sols), et les VTR utilisées pour la voie d'exposition par inhalation sont généralement basées sur l'air; on anticipe donc que les recommandations pour la qualité des eaux souterraines seront presque toujours fondées sur un FA de 1.

2.3 Récepteurs et voies d'exposition

L'élaboration des recommandations pour la qualité des eaux souterraines en fonction de la santé humaine tient compte de la protection de l'eau souterraine potable et de l'exposition indirecte par inhalation de vapeurs migrant vers l'air intérieur.

Les recommandations pour la protection de l'eau souterraine potable sont fondées sur les Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada ou les valeurs guides provisoires pour les sources d'eaux souterraines élaborées par Santé Canada (voir la section C.3.1 de ce document). Bien que ces recommandations portent principalement sur l'ingestion de l'eau, de récentes recommandations publiées par Santé Canada ont aussi inclus l'exposition par contact cutané et par inhalation lors du bain ou dans la douche. Puisque ces valeurs élaborées par Santé Canada sont appliquées directement, des caractéristiques additionnelles sur le récepteur ne sont pas requises. L'utilisation des aquifères comme source d'eau domestique n'est pas considérée être dépendante de la vocation du terrain; toutefois, la recommandation calculée pour cette voie peut être exclue si l'organisme chargé de la mise en application le juge approprié.

La volatilisation des contaminants dans les eaux souterraines et leur migration subséquente à travers les sols et vers l'air intérieur sont évaluées pour les substances chimiques volatiles. Des recommandations distinctes sont calculées pour deux scénarios: une recommandation agricole/résidentielle reflétant le cas d'un individu résidant au site en permanence et un scénario

commercial/industriel reflétant une exposition professionnelle typique. Les différentes instances devront être consultées pour déterminer si la recommandation agricole/résidentielle peut être exclue aux sites commerciaux/industriels et, le cas échéant, si des exigences par rapport à des distances de recul sont prévues pour prendre en compte la migration potentielle vers des sites avoisinants plus sensibles.

Si la toxicité est évaluée à l'aide d'une CA ou d'une CCRS, les caractéristiques du récepteur ne sont pas requises; si une DJA ou une DCRS est utilisée, alors un jeune enfant (tout-petit) est utilisé comme récepteur pour calculer les recommandations génériques en utilisant les caractéristiques du protocole relatif aux sols (un adulte pourra être utilisé pour le calcul de recommandations propres à un site pour les sites industriels ou tout autre site où la présence d'enfants n'est pas prévue).

3. Processus d'élaboration des recommandations en fonction de la santé humaine

Comme il est mentionné à la section C.2, les recommandations pour la qualité des eaux souterraines en fonction de la santé humaine sont élaborées pour la protection de l'eau souterraine potable et l'exposition indirecte par inhalation de vapeurs dans l'air intérieur. Ces deux voies d'exposition sont détaillées dans les sections C.3.1 et C.3.2 ci-dessous; les équations et les paramètres d'entrée des modèles sont résumés dans les annexes A et B, respectivement.

3.1 Recommandations pour la protection des sources d'eau souterraine potable

Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines en vue de la protection de l'eau souterraine potable (RQES_{EP}) sont directement adoptées, selon la plus récente version des Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada (Santé Canada, 2010a). En l'absence d'une recommandation officielle pour la qualité de l'eau potable, une valeur guide provisoire pour les sources d'eaux souterraines établie par Santé Canada pourra être utilisée.

Certaines juridictions pourraient permettre l'exclusion de cette voie d'exposition aux sites où il n'est pas probable que l'eau souterraine soit utilisée comme source d'eau potable. Bien que les critères spécifiques dépendent de l'autorité compétente, cette voie est souvent exclue dans les cas suivants :

- les règlements municipaux interdisent l'utilisation de puits d'eau potable;
- les eaux souterraines peu profondes sont naturellement non potables; ou
- l'absence de connexion hydrologique entre les sols contaminés et les aquifères avec une alimentation suffisante pour permettre leur utilisation comme source d'eau potable.

3.2 Recommandations pour la protection de la qualité de l'air intérieur

La contamination de l'air intérieur par volatilisation à partir de l'eau souterraine contaminée est une voie d'exposition potentiellement critique pour les composés organiques volatils. Les

recommandations pour la qualité des eaux souterraines en fonction de la santé humaine pour les contaminants organiques volatils doivent donc protéger la qualité de l'air intérieur.

La relation entre les concentrations de contaminant dissous dans l'eau souterraine et en phase vapeur est évaluée en fonction de la constante de Henry pour la substance chimique, laquelle dépend de la pression de vapeur et de la solubilité dans l'eau.

Une fois en phase vapeur, les composés organiques volatils migrent dans les bâtiments par diffusion et advection, causée par la différence de pression barométrique entre les vapeurs du sol et l'air intérieur. La migration vers l'air intérieur dépend également de plusieurs facteurs, notamment le type de sol, la profondeur ou la distance de la zone contaminée par rapport à la fondation du bâtiment, le type de fondation, le taux de renouvellement de l'air dans le bâtiment et les dimensions du bâtiment. Ces processus sont évalués à l'aide d'un modèle analytique élaboré par Johnson et Ettinger (1991) et présentés en détail à l'annexe E du protocole relatif aux sols (CCME, 2006). D'autres facteurs qui ne sont pas explicitement considérés par le modèle, y compris la stratigraphie hétérogène, la variation de pression atmosphérique, la température, les précipitations et l'humidité dans le sol, pourraient aussi avoir un effet sur la migration de la vapeur vers les bâtiments; les hypothèses du modèle sélectionnées par défaut sont jugées aptes à assurer une protection adéquate pour des variations normales des paramètres de ces sites dans la plupart des cas.

Une hypothèse envisagée dans le calcul des recommandations pour la qualité des eaux souterraines relatives à la protection de la qualité de l'air intérieur ($RQES_{QAI}$) fondée sur le modèle de Johnson et Ettinger (1991) est que la source de contamination n'est pas très proche du bâtiment. **Il doit y avoir un minimum de 1 mètre de sol propre entre la frange capillaire et la fondation du bâtiment à votre site pour permettre l'utilisation des $RQES_{QAI}$, et ce, quelle que soit l'utilisation du terrain (voir la Figure 4).** Il faut tenir compte des niveaux de nappe phréatique élevés en saison pour assurer une distance de séparation minimale de 1 mètre par rapport à la frange capillaire en tout temps. En l'absence d'une telle distance de séparation, on recommande de ne pas utiliser les $RQES_{QAI}$ calculées au moyen du modèle de Johnson et Ettinger. Il est plutôt recommandé d'évaluer la voie d'exposition par l'air intérieur à l'aide de l'approche selon le niveau 2, qui utilise un facteur d'atténuation par défaut de 0,01 pour un bâtiment commercial et de 0,03 pour un bâtiment résidentiel. Les méthodes d'élaboration et d'utilisation détaillées des facteurs d'atténuation par défaut sont présentées à l'annexe C du Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des vapeurs des sols en vue de prévenir leur inhalation par l'humain (CCME, 2014). La partie A, section 3.3 de CCME (2014) décrit d'autres hypothèses qui invalideraient le recours aux $RQES_{QAI}$ (p. ex., bâtiments élevés, voies d'exposition préférentielles présentes).

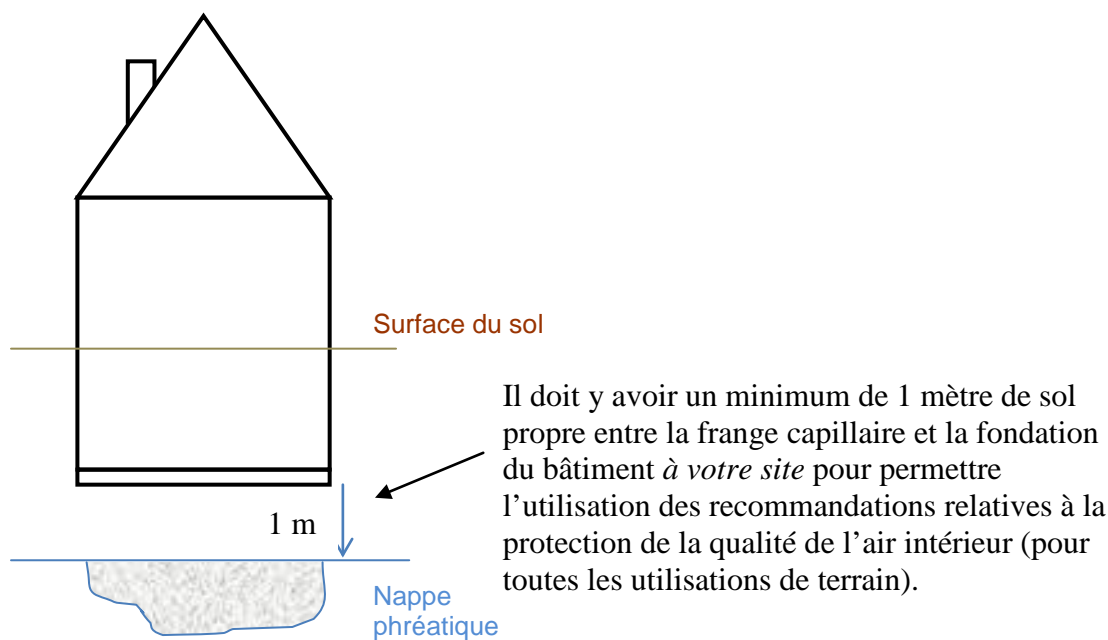


Figure 4. Conditions entre la source et le bâtiment permettant l'utilisation des recommandations relatives à la qualité de l'air intérieur

On notera que le Standard pancanadien relatif aux hydrocarbures pétroliers dans le sol (CCME, 2008b) comprend la multiplication par un facteur d'ajustement de 10 pour les recommandations pour la qualité des sols relatives aux hydrocarbures pétroliers. Bien que ce facteur d'ajustement ait tenu compte de la biodégradation, il reflète principalement un ajustement tenant compte de la relation de partage conservatrice du sol à la vapeur pour les hydrocarbures pétroliers, basée sur les données empiriques. Un facteur d'ajustement de 10 est employé dans le calcul des $RQES_{QAI}$ relatives aux hydrocarbures pétroliers, quelle que soit l'utilisation du terrain (un facteur d'ajustement de 1 est attribué aux produits autres que des hydrocarbures pétroliers, par exemple aux produits chlorés). S'il n'y a pas 1 mètre de sol propre entre la source de contamination et le bâtiment, l'application d'un facteur d'ajustement de 10 ou du modèle de Johnson et Ettinger servant à dériver les $RQES_{QAI}$ (voir ci-dessus) n'est pas considérée appropriée. Une approche selon le niveau 2 visant les hydrocarbures pétroliers quand la source est à moins de 1 mètre d'un bâtiment ne doit pas comprendre de facteurs de bioatténuation génériques (p. ex., facteur de 10) relatifs aux hydrocarbures pétroliers.

Certaines instances pourraient autoriser l'élimination de cette voie d'exposition en l'absence de récepteurs potentiels présents ou futurs à proximité de la zone contaminée. Les conditions pour l'exclusion de cette voie et la distance requise des récepteurs dépendent des orientations de la juridiction concernée, mais devraient normalement tenir compte de la distance potentielle de migration des vapeurs et le potentiel de transport des eaux souterraines vers des récepteurs situés en aval.

Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines relatives à la protection de la qualité de l'air intérieur ($RQES_{QAI-R}$ pour les bâtiments résidentiels et $RQES_{QAI-C}$ pour les bâtiments

commerciaux) est calculée à l'aide des équations présentées à l'annexe A et des paramètres d'entrée des modèles présentés à l'annexe B. Bien que les bâtiments résidentiels donnent lieu à des recommandations plus rigoureuses, les recommandations sont calculées pour les deux types de bâtiments pour permettre une exclusion propre au site des recommandations pour les bâtiments résidentiels lorsque les exigences des autorités compétentes pour l'élimination de cette voie sont respectées. La concentration admissible dans l'air intérieur associée à la contamination de l'eau souterraine est la concentration admissible (CA) moins la concentration de fond dans l'air intérieur pour les substances chimiques à seuil d'effet, ou la concentration correspondant à un risque spécifié (CCRS) pour les substances chimiques sans seuil d'effet. Si l'on ne dispose que d'une dose journalière admissible (DJA) ou d'une dose correspondant à un risque spécifié (DCRS), une valeur de référence de toxicité par inhalation peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$CA = \frac{DJA \times MC}{TA} \quad \text{ou} \quad CCRS = \frac{DCRS \times MC}{TA}$$

Où :

DJA	=	dose journalière admissible (mg/kg/jour)
DCRS	=	dose correspondant à un risque spécifié (mg/kg-jour)
MC	=	masse corporelle (kg) du récepteur critique (annexe I)
TA	=	taux d'inhalation d'air (m ³ /jour) du récepteur critique (annexe I)

On notera qu'une CA ou une CCRS extrapolée à partir d'une valeur de référence de toxicité orale peut comporter d'énormes incertitudes, car les organes cibles et les mécanismes de toxicité peuvent varier selon qu'il s'agit d'une exposition par inhalation ou d'une exposition par voie orale. Toutefois, en l'absence de valeur de référence sur la toxicité par inhalation, l'utilisation d'une valeur de référence de toxicité extrapolée est jugée préférable à l'exclusion de la voie d'exposition pour la protection de la qualité de l'air intérieur pour un composé organique volatil.

PARTIE D

1. Élaboration de la recommandation définitive pour la qualité des eaux souterraines

1.1 Élaboration de la recommandation définitive

La recommandation définitive proposée pour la qualité des eaux souterraines ($RQES_D$) devra protéger aussi bien l'environnement que la santé humaine. La plus basse des recommandations propres à une voie d'exposition élaborées dans les parties B et C du présent protocole sera proposée comme $RQES_D$, sous réserve des restrictions exposées à la section D.1.2 ci-dessous. La figure 5 présente un aperçu général du processus d'élaboration des recommandations qui décrit les principales étapes menant à la recommandation définitive pour la qualité des eaux souterraines.

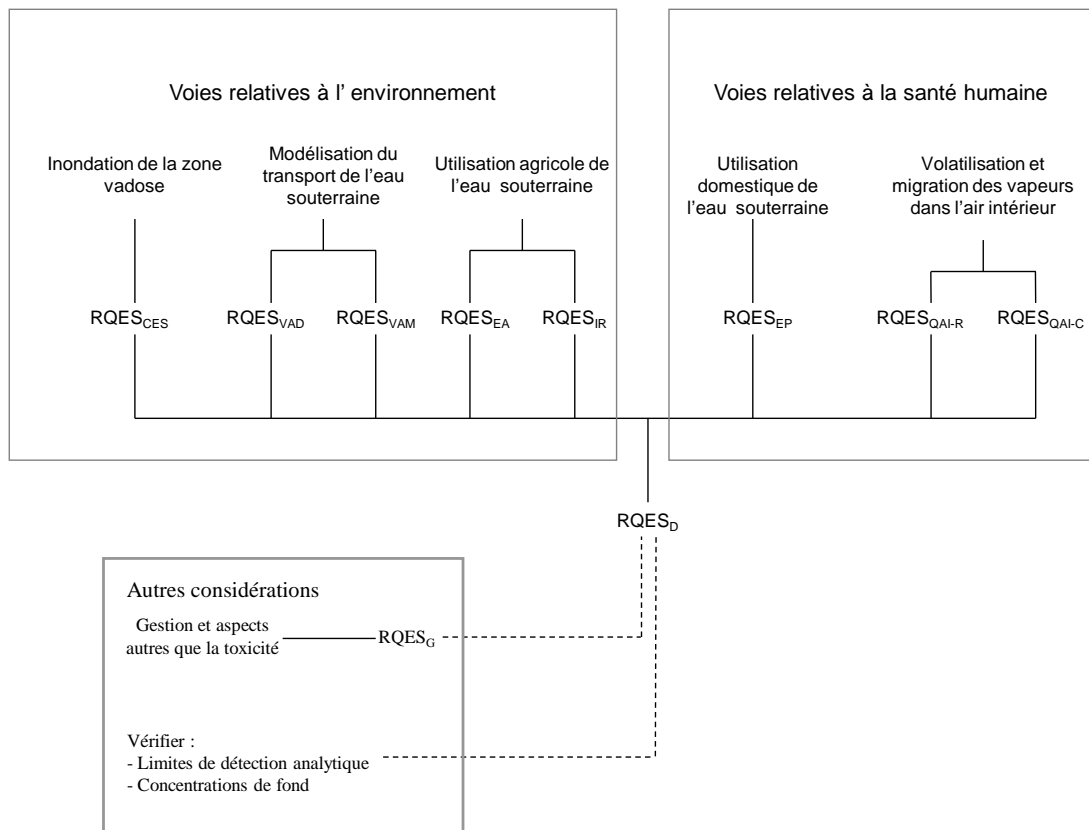


Figure 5 : Aperçu des étapes menant à l'élaboration d'une recommandation définitive pour la qualité des eaux souterraines

Les recommandations pour la protection de l'eau potable ($RQES_{EP}$) et pour la protection de la vie aquatique ($RQES_{VAD}$ et $RQES_{VAM}$) sont considérées être des voies obligatoires; si une ou

l'autre de ces recommandations ne peut être établie, alors la RQES_D est considérée être une recommandation provisoire.

L'élaboration des recommandations canadiennes pour la qualité des eaux souterraines est un processus complexe qui doit prendre en compte de nombreux paramètres. Certains de ces paramètres se mesurent avec une grande précision, mais la plupart sont des estimations qui se caractérisent par une très grande variabilité. Compte tenu de ce problème et des autres facteurs d'incertitude qui influent sur le processus d'élaboration de la recommandation, la valeur de la RQES_D est arrondie à un maximum de deux chiffres significatifs aux fins de présentation dans les documents d'évaluation.

Il peut arriver qu'une recommandation propre à une voie d'exposition dépasse 1 000 000 mg/L (c.-à-d. une concentration supérieure à 100 % en poids). Dans ce cas, la recommandation pour la voie d'exposition en question sera désignée par l'abréviation « S.O. ».

1.2 Considérations autres que la toxicité – Limites liées à la gestion

Outre les risques de toxicité qu'ils présentent pour les humains et les récepteurs écologiques, les contaminants peuvent présenter d'autres effets indésirables, notamment des problèmes de nature esthétique (p. ex., des odeurs), un risque d'explosion, la formation de liquide en phase libre ou l'endommagement des équipements et des infrastructures. De plus, certaines voies d'exposition pourraient être pertinentes pour une substance chimique, mais être sujettes à un élément d'incertitude ou ne pas disposer de méthodes bien définies pour son évaluation (p. ex., l'exposition de la main-d'œuvre travaillant dans les sites d'excavation ou dans les tranchées destinées aux services publics).

Si certains éléments donnent à conclure qu'un contaminant quelconque risque d'avoir une incidence significative sur l'environnement en plus de la toxicité pour les humains et les récepteurs écologiques telle que décrite pour les voies d'exposition détaillées aux parties B et C du présent document, il conviendra d'en faire l'évaluation. On élabore une recommandation pour la qualité des eaux souterraines tenant compte des aspects liés à la gestion (RQES_G) pour tenir compte de toute préoccupation supplémentaire que pourrait susciter un contaminant. À l'heure actuelle, il n'existe pas de méthodes normalisées pour calculer les limites liées à la gestion; il convient donc d'évaluer chaque substance chimique au cas par cas. Cependant, quelques considérations sont énumérées ci-dessous.

À tout le moins, l'élaboration de la RQES_G doit prendre en compte la limite de solubilité d'une substance chimique puisque des concentrations chimiques approchant de la solubilité pourraient potentiellement donner lieu à des liquides en phase non aqueuse (LPNA) pouvant constituer une source de contamination continue. De façon générale, la RQES_G ne devrait pas excéder 50 % de la limite de solubilité aqueuse d'une substance chimique. Cette limite liée à la gestion sert d'alerte quant à la présence potentielle, en amont, de sources en phase libre, et non pas à empêcher la formation de sources en phase libre. Il convient de s'en remettre au jugement professionnel pour les substances chimiques présentant des limites de solubilité relativement faibles qui se retrouveront principalement en phase adsorbée. Pour les substances caractérisées par une grande masse moléculaire, les concentrations dissoutes ne doivent pas dépasser 10 % de

la limite de solubilité théorique. En général, cette règle ne devrait normalement pas être utilisée pour abaisser les recommandations en deçà de la limite pratique de quantification et, normalement, la $RQES_G$ fondée sur la solubilité ne devrait pas être inférieure à la recommandation la plus basse relative aux effets sur la santé humaine ou l'environnement.

Dans le cas où une substance chimique pourrait être associée à une odeur perceptible à une concentration inférieure au niveau de toxicité, il pourrait être approprié de tenir compte de la possibilité d'odeurs dans l'air intérieur. À cette fin, on pourra utiliser le même modèle et les mêmes hypothèses que pour la voie d'exposition par inhalation de vapeurs à l'intérieur (annexes A et B) en remplaçant la CA par le seuil d'odeur de la substance. Ce calcul devra être effectué avec un facteur de répartition de 1.

L'élaboration de cette $RQES_G$ pourrait être associée à une incertitude considérable et certaines des préoccupations suscitées par les contaminants pourraient de ce fait se prêter uniquement à une évaluation qualitative. Il conviendra donc de faire appel au jugement professionnel pour déterminer s'il y a lieu d'ajuster la $RQES_D$ en fonction de la $RQES_G$ si elle est plus basse que les recommandations élaborées pour d'autres voies d'exposition. Si la $RQES_G$ est plus élevée que les recommandations pour d'autres voies d'exposition, il pourrait être approprié d'utiliser la $RQES_G$ comme limite supérieure pour les recommandations propres à un site lors d'une évaluation du deuxième niveau.

1.3 Produits de dégradation

Certains contaminants peuvent se dégrader en substances chimiques plus toxiques ou plus mobiles (p. ex., la dégradation du trichloréthylène en chlorure de vinyle). Comme divers facteurs propres au site influencent les taux de dégradation, les recommandations pour la qualité des eaux souterraines ne prévoient pas, à l'heure actuelle, une méthode officielle pour tenir compte de la dégradation en composés plus toxiques. Toutefois, lorsque cela est justifié par les données disponibles, il conviendra de rendre compte de la dégradation en sous-produits plus toxiques pour des substances chimiques précises. De plus, les principaux sous-produits de la dégradation devraient être mentionnés dans les documents scientifiques justificatifs et dans le feuillet d'information afin que les utilisateurs soient conscients de ces produits de dégradation et que les évaluations de site en tiennent compte, en particulier dans le cadre de l'élaboration de stratégies de surveillance à long terme.

1.4 Évaluation en fonction des concentrations de fond et des limites pratiques de quantification

Recommandations devraient être raisonnables, pratiques et utilisables. Il élabore les recommandations en utilisant des informations obtenues par la recherche scientifique, soutenues par le jugement professionnel lorsque les données présentent certaines lacunes. Occasionnellement, une recommandation numérique pourrait néanmoins être inférieure aux concentrations de fonds ou aux limites pratiques de quantification.

Là où la $RQES_D$ est inférieure aux concentrations de fond typiques en territoire canadien, le CCME recommande de remplacer la $RQES_D$ générée à l'aide du présent protocole par la

concentration de fond acceptable. Plus souvent, la $RQES_D$ risque plutôt d'être supérieure à la concentration de fond typique pour l'ensemble du Canada, mais certains sites spécifiques pourraient présenter des concentrations de fond anormalement élevées et dépassant la recommandation de la $RQES_D$. Dans ces cas, les juridictions peuvent établir des recommandations régionales ou propres à un site qui tiennent compte des concentrations de fond.

La $RQES_D$ proposée devrait aussi être comparée à la limite pratique de quantification actuellement mesurable au Canada selon les méthodes d'analyse disponibles (équivalant en général à cinq fois la limite de détection analytique). Lorsque la $RQES_D$ est inférieure à la limite pratique de quantification, il conviendra d'ajouter une note à la recommandation définitive indiquant que « les laboratoires pourraient être dans l'impossibilité de mesurer d'une manière fiable des concentrations de ce niveau ». Toutefois, la $RQES_D$ ne devrait pas être ajustée en fonction de la limite pratique de quantification, bien que les différentes instances puissent inclure des limites pratiques de quantification lors de la mise en œuvre de la recommandation.

Comme les recommandations sont d'abord fondées sur les effets biologiques et que l'exposition de fond est, dans la mesure du possible, incorporée à la procédure d'élaboration, on prévoit que très peu des $RQES_D$ proposées devront être ajustées. Toutefois, s'il s'avère qu'une $RQES_D$ doit être ajustée (selon l'une des procédures d'évaluation susmentionnées), il conviendra d'ajouter une note explicative au rapport d'évaluation de la substance chimique.

1.5 Présentation des recommandations pour la qualité des eaux souterraines

Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines seront présentées dans un tableau qui indiquera en détail les valeurs recommandées pour chaque voie d'exposition et la valeur définitive. Le tableau ci-dessous est proposé à titre d'exemple (des tableaux distincts seront préparés pour les sols à texture grossière et les sols à texture fine et pour les substances chimiques sans seuil d'effet, pour des niveaux de risque additionnel de 1×10^{-5} et 1×10^{-6}) :

Tableau 2. Exemple de présentation des recommandations pour la qualité des eaux souterraines

Recommandation ($RQES_D$)	Type de sol	
	Texture grossière	Texture fine
Recommandation ($RQES_D$)	##	##
Contact écologique avec l'eau souterraine ($RQES_{CES}$)	##	##
Protection de la vie aquatique en eau douce ($RQES_{VAD}$)	##	##
Protection de la vie aquatique en eau marine ($RQES_{VAM}$)	##	##
Protection de l'eau d'abreuvement ($RQES_{EA}$)	##	##
Protection de l'eau d'irrigation ($RQES_{IR}$)	##	##
Protection de l'eau potable ($RQES_{EP}$)	##	##
Protection de la qualité de l'air intérieur – résidentiel ($RQES_{QAI-R}$)	##	##
Protection de la qualité de l'air intérieur – commercial ($RQES_{QAI-C}$)	##	##
Considérations relatives à la gestion ($RQES_G$)	##	##

1.6 Documents scientifiques justificatifs

Les documents scientifiques justificatifs et les feuillets d'information requis sont décrits à la section D.1.6 du protocole relatif aux sols (CCME, 2006). Pour les substances chimiques qui bénéficient déjà d'une recommandation pour la qualité des sols, la recommandation pour la qualité des eaux souterraines devra se fonder sur le document scientifique justificatif existant (ou le mettre à jour); le document devra être ajusté pour refléter la recommandation pour la qualité des eaux souterraines ou le processus d'élaboration de la recommandation pour la qualité des eaux souterraines sera décrit dans un addenda. En l'absence de recommandation existante pour la qualité des sols, un nouveau document scientifique justificatif devra être élaboré; il est prévu que dans de tels cas, les recommandations pour la qualité des eaux souterraines seront élaborées en parallèle avec les recommandations pour la qualité des sols.

RÉFÉRENCES

- Bannan, M.W, 1940. « The Root Systems of Northern Ontario Conifers Growing in Sand », *American Journal of Botany* 27(2): 108-114.
- Borg, H. et D.W. Grimes, 1986. « Depth development of roots with time: an empirical description », *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 29(1): 194-196.
- Burns, R.M., et B.H. Honkala, 1990a. *Silvics of North America: vol. 1. Conifers*. US Department of Agriculture, Washington, DC, Agricultural Handbook no. 654.
- Burns, R.M., et B.H. Honkala, 1990b. *Silvics of North America: vol. 2. Hardwoods*. US Department of Agriculture, Washington, DC, Agricultural Handbook no. 654.
- Canadell, J., R.B. Jackson, J.R. Ehleringer, H.A. Mooney, O.E. Sala, E.-D. Schulze, 1996. « Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale », *Oecologia* 108: 583-595.
- CCME, 1993a. Guide pour l'échantillonnage, l'analyse des échantillons et la gestion des données des lieux contaminés – Volume I : Rapport principal. CCME, Winnipeg.
- CCME, 1993b. Guide pour l'échantillonnage, l'analyse des échantillons et la gestion des données des lieux contaminés – Volume II : Sommaire des méthodes d'analyse. CCME, Winnipeg.
- CCME, 1996a. 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. CCME, Winnipeg.
- CCME, 1996b. Cadre pour l'évaluation du risque écotoxicologique : orientation générale. Le programme national d'assainissement des lieux contaminés. PN 1196. CCME, Winnipeg.
- CCME, 1997. Cadre pour l'évaluation du risque écotoxicologique : annexes techniques. PN 1274. CCME, Winnipeg.
- CCME, 1999 (et mis à jour). Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement. CCME, Winnipeg.
- CCME, 2003. Guide concernant l'application propre à un lieu des Recommandations pour la qualité des eaux au Canada : procédures d'établissement d'objectifs numériques de qualité de l'eau. CCME, Winnipeg.
- CCME, 2006. Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des sols en fonction de l'environnement et de la santé humaine. PN 1333. CCME, Winnipeg.
- CCME, 2008a. Standard pancanadien relatif aux hydrocarbures pétroliers dans le sol : guide d'utilisation. Élaboré par O'Connor Associates Environmental Inc. (2001) et Meridian Environmental Inc. (2001, 2007) pour le Conseil canadien des ministres de l'Environnement. PN 1492. CCME, Winnipeg.
- CCME, 2008b. Canada-wide Standard for Petroleum Hydrocarbons (PHC) in Soil: Scientific Rationale. Scientific Technical Document. PN 1399 (en anglais seulement). CCME, Winnipeg.
- CCME, 2014. Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des vapeurs des sols en vue de prévenir leur inhalation par l'humain. CCME, Winnipeg.

- Dardanelli, J.L., O.A. Bachmeier, R. Sereno, et R. Gil, 1997. « Rooting depth and soil water extraction patterns of different crops in a silty loam Haplustoll », *Field Crops Research* 54: 29-38.
- Domenico, P.A., 1987. « An analytical model for multidimensional transport of a decaying contaminant species », *Journal of Hydrology*, 91 49-58.
- Environnement Canada, 1999. Les eaux souterraines – Trésors cachés de la nature. <https://www.ec.gc.ca/eau-water/38703C44-0A00-4075-8C64-3B7546676833/topic5-f.pdf> (consulté le 05 jan. 2015).
- Gerwitz, A., et E.R. Page, 1974. « An empirical mathematical model to describe plant root systems », *Journal of Applied Ecology* 11: 773-781.
- Gouvernement du Canada, 2003. Cadre canadien de collaboration en matière d'eau souterraine. Comité ad hoc national sur l'eau souterraine.
- Santé Canada, 2010a. Recommandation pour la qualité de l'eau potable au Canada. Tableau sommaire. Élaboré par le Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable du Comité fédéral-provincial-territorial sur la santé et l'environnement. Mai 2008.
- Santé Canada, 2010b. L'évaluation des risques pour les sites contaminés fédéraux au Canada, Partie I : L'évaluation quantitative préliminaire des risques (ÉQPR) pour la santé humaine, version 2.0. Division des sites contaminés, Direction de la sécurité des milieux, Santé Canada, Ottawa.
- Santé Canada, 2010c. L'évaluation des risques pour les sites contaminés fédéraux au Canada, Partie II : les valeurs toxicologiques de référence (VTR) de Santé Canada et les propriétés physico-chimiques des substances chimiques, version 2.0. Division des sites contaminés, Direction de la sécurité des milieux, Santé Canada, Ottawa.
- Santé Canada, 2010d. L'évaluation des risques pour les sites contaminés fédéraux au Canada, Partie V : L'évaluation quantitative détaillée des risques pour la santé humaine associés aux substances chimiques (ÉQDR_{chim}). Division des sites contaminés, Direction de la sécurité des milieux, Santé Canada, Ottawa.
- Horton, K.W., 1958. Rooting habits of lodgepole pine (Forest Research Division technical note 67). Ministère du Nord canadien et des Ressources naturelles.
- Hulzebos, E.M., D.M.M. Adema, E.M. Dirven-van Breeman, L. Henzen, W.A. van Dis, H.A. Herbold, J.A. Hoekstra, R. Baeselman et C.A.M. van Gestel, 1993. « Phytotoxicity studies with *Lactuca sativa* in soil and nutrient solution », *Environmental Toxicology and Chemistry*, 12:1079-1094.
- Johnson, P.C. et R.A. Ettinger, 1991. « Heuristic model for predicting the intrusion rate of contaminant vapours into buildings », *Environ. Sci. Tech.* 25:1445-1452.
- Johnston, A.M., D.L. Tanaka, P.R. Miller, S.A. Brandt, D.C. Nielsen, G.P. Lafond, et N.R. Riveland, 2002. « Oilseed Crops for Semiarid Cropping Systems in the Northern Great Plains », *Agronomy Journal*, 94:231-240.
- Lawrence Livermore National Laboratory, 1999. Historical Case Analysis of Chlorinated Volatile Organic Compound Plumes. University of California, Livermore, Californie. Rapport UCRL-AR-133361.
- MEO (ministère de l'Environnement de l'Ontario), 2009. Technical Update. Use of BIOCHLOR v.2.2 in risk assessments submitted under the Record of Site Condition Regulation (O. Reg. 153/04).
- SABCS (Science Advisory Board for Contaminated Sites in British Columbia), 2006. Report on: Hydrogeological Assessment Tools to Determine the Rate of Biodegradation for Organic Contaminants in Groundwater.
- Startsev, A., et J. Battigelli, , 2008. Validation of the subsoil PHC criteria for stratified remediation of upstream oil and gas facilities. Présenté au Forum annuel sur le sol et les eaux souterraines de 2008 de la Petroleum Technology Alliance Canada (PTAC), Calgary, 10 mars 2008.
- Statistique Canada, 2011. Enquête sur les usines de traitement de l'eau potable; n° de catalogue. 16-403-XWE.
- Strong, W.L., et G.H. La Roi, 1983. « Root-system morphology of common boreal forest trees in Alberta, Canada », *Canadian Journal of Forest Research* 13(6): 1164–1173.
- Van Gestel, C.A.M., et W. Ma, 1988. « Toxicity and bioaccumulation of chlorophenols in earthworms in relation to bioavailability in soil », *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 15:289-291.
- Van Gestel, C.A.M., et W. Ma, 1990. « An approach to quantitative structure-activity relationships (QSARs) in earthworm toxicity studies », *Chemosphere* 21:1023-1033.
- Van Gestel, C.A.M., W. Ma, et C.E. Smit, 1991. « Development of QSARs in terrestrial ecotoxicology: Earthworm toxicity and soil sorption of chlorophenols, chlorobenzenes, and dichloroaniline », *Sci. Tot. Environ.* 109/110:589-604.
- Weaver, J.E., 1926. *Root Development of Field Crops*, 1^{re} édition. McGraw-Hill Book Company Inc.
- Weaver, J.E., et W.E. Bruner, 1927. *Root Development of Vegetable Crops*. 1^{re} édition. McGraw-Hill Book Company Inc.

- West, M.R., B.H. Kueper, et M.J. Unga, 2007. « On the Use and Error of Approximation in the Domenico (1987) Solution », *Groundwater*, 45(2): 126-135.
- Wiedemeier, T.H., H.S. Rifai, C.J. Newell, et J.T. Wilson, 1999. Natural Attenuation of Fuels and Chlorinated Solvents in the Subsurface. John Wiley and Sons, New York.

ANNEXE A - RÉSUMÉ DES MODÈLES ET DES ÉQUATIONS UTILISÉS AUX FINS DE L'ÉLABORATION DES RECOMMANDATIONS POUR LA QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES

VOIES D'EXPOSITION ENVIRONNEMENTALES

Recommandations pour la qualité des eaux souterraines relatives au contact des végétaux et des invertébrés avec l'eau souterraine

Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines relatives à cette voie d'exposition sont calculées à l'aide des équations suivantes. Les détails relatifs à l'élaboration de ces équations sont fournis à la section B.4.2.

$$RQES_{CES} = \frac{RQS_{CS}}{FD1} \quad (\text{Équation A-1})$$

$$FD1 = K_{co} \times f_{co} + \frac{(\theta_h + H' \times \theta_a)}{\rho_a} \quad (\text{Équation A-2})$$

Où :

$RQES_{CES}$	=	recommandation pour la qualité des eaux souterraines fondées sur le contact avec l'eau souterraine pour les organismes inféodés (plantes et les invertébrés) du sol (mg/L)
RQS_{CS}	=	recommandation pour la qualité des sols fondées sur le contact avec le sol pour les organismes (plantes et les invertébrés) inféodés au sol pour les terrains à vocation <u>agricole</u> (mg/kg)
$FD1$	=	facteur de dilution numéro 1 (L/kg)
K_{co}	=	coefficient de partage carbone organique-eau (L/kg)
f_{co}	=	fraction de carbone organique (g/g)
θ_e	=	porosité en eau dans la zone vadose (sans unité)
H'	=	constante de Henry sans unité (sans unité)
θ_a	=	porosité en air dans la zone vadose (sans unité)
ρ_a	=	densité apparente du sol dans la zone vadose (base sèche) (g/cm ³)

Il convient de noter que la RQS_{CS} pour les terrains à vocation agricole est utilisée pour établir les valeurs du premier palier de la $RQES_{CES}$ pour toutes les utilisations de terrain. Pour calculer le coefficient de distribution (Kd) pour les contaminants organiques dissociables, voir annexe A du protocole relatif aux sols.

Recommandations pour la qualité des eaux souterraines en vue de la protection de la vie aquatique

Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines fondées sur cette voie d'exposition sont calculées en fonction du modèle variable en fonction du temps pour les concentrations dans l'axe du panache de Domenico (1987). L'équation a été modifiée pour refléter l'hypothèse conservatrice de l'absence de toute dispersion dans la direction verticale (z). Le modèle est conforme au modèle du CCME correspondant (transport dans la zone saturée) pour les recommandations pour la qualité des sols (en supposant que la valeur arbitraire de temps « t » dans le modèle des recommandations pour les sols est suffisamment longue pour assurer l'état d'équilibre) et se présente comme suit :

$$RQES_{VAD/VAM} = \frac{4 \times RQESurface}{\exp(A) \times \operatorname{erfc}(B) \times [\operatorname{erf}(C) - \operatorname{erf}(D)]} \quad (\text{Équation A-3})$$

$$A = \frac{x}{2\partial_x} \left\{ 1 - \left(1 + \frac{4L_s \partial_x}{v} \right)^{1/2} \right\}$$

$$B = \frac{x - vt \left(1 + \frac{4L_s \partial_x}{v} \right)^{1/2}}{2(\partial_x vt)^{1/2}}$$

$$C = \frac{y + Y/2}{2(\partial_y x)^{1/2}} \quad D = \frac{y - Y/2}{2(\partial_y x)^{1/2}}$$

Où :

$RQES_{VAD \text{ ou } VAM}$ = recommandation pour la qualité des eaux souterraines en vue de la protection de la vie aquatique (d'eau douce ou marine) (mg/L)

$RQESurface$ = recommandation pour la qualité des eaux de surface pour la protection de la vie aquatique (d'eau douce ou marine) (mg/L) (c'est-à-dire, les *Recommandations canadiennes pour la qualité des eaux : protection de la vie aquatique*, si disponible)

A, B, C, D = valeurs intermédiaires dans le calcul

x = distance de la source au récepteur (m)

∂_x = tenseur de la dispersivité longitudinale = $0,1x$ (m)

∂_y = tenseur de la dispersivité latérale = $0,1\partial_x$ (m)

L_s = constante de décomposition (an^{-1}) dans la zone saturée :

$$L_s = \frac{0,693}{t_{1/2s}} (e^{-0,07d})^{\frac{1}{2}}$$

d	=	profondeur entre la surface et la surface des eaux souterraines (m)
t _{1/2s}	=	demi-vie de biodégradation dans la zone saturée (y)
v	=	vitesse de circulation du contaminant (m/an)
$v = \frac{K_H i}{n_e R_f}$		
K _H	=	conductivité hydraulique dans la zone saturée (m/an)
i	=	gradient hydraulique latéral (sans unité)
n	=	porosité totale de la zone saturée = 1 - ρ _a /2,65 (sans unité)
n _e	=	coefficient de porosité effective de la zone saturée (sans unité); en général, présumé être le même que la porosité totale du sol (n)
t	=	moment de l'évaluation de la recommandation (années, voir discussion dans l'annexe B)
y	=	coordonnée cartésienne reliant la source au récepteur (m); valeur présumée de y = 0
Y	=	largeur de la source de contamination (m) perpendiculairement à l'axe de l'écoulement de l'eau souterraine
R _f	=	facteur de retardement (sans unité)
$R_f = 1 + \frac{\rho_a}{n} K_d$		
ρ _a	=	densité apparente du sol dans la zone saturée (g/cm ³)
K _d	=	coefficient de distribution (cm ³ /g) – voir annexe A du protocole relatif aux sols pour les composés organiques qui se dissocient; pour les composés organiques qui ne se dissocient pas, utilisez :
$K_d = K_{co} f_{co}$		
K _{co}	=	coefficient de partage carbone organique-eau (L/kg)
F _{co}	=	fraction de carbone organique (g/g)

Recommandations pour la qualité des eaux souterraines en vue de la protection de l'eau d'abreuvement du bétail et de l'eau d'irrigation

Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines pour ces voies d'exposition sont adoptées directement des Recommandations canadiennes pour la qualité de l'eau en vue de protéger les utilisations de l'eau à des fins agricoles (CCME, 1999).

VOIES D'EXPOSITION RELATIVES À LA SANTÉ HUMAINE

Recommandations pour la qualité des eaux souterraines en vue de la protection de l'eau potable

Les recommandations pour la qualité des eaux souterraines pour cette voie d'exposition sont adoptées directement des Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada ou les valeurs guides provisoires pour les sources d'eaux souterraines élaborées par Santé Canada.

Recommandations pour la qualité des eaux souterraines en vue de la protection de la qualité de l'air intérieur

Substances chimiques à seuil d'effet :

$$RQES_{QAI} = \frac{(TC - C_a) \times FR \times FD_i \times F.aj.}{H' \times TE \times 10^3 \text{ L/m}^3} + CFES \quad (\text{Équation A-4})$$

Substances chimiques sans seuil d'effet :

$$RQES_{QAI} = \frac{CCRS \times FD_i \times F.aj.}{H' \times TE \times 10^3 \text{ L/m}^3} + CFES \quad (\text{Équation A-5})$$

Où :

RQES _{QAI}	=	recommandation pour la qualité des eaux souterraines relative à la protection de la qualité de l'air intérieur (mg/L)
CA	=	concentration admissible ou concentration de référence (mg/m ³)
CCRS	=	concentration correspondant à un risque spécifié (mg/m ³)
C _a	=	concentration de fond dans l'air intérieur/extérieur (mg/m ³)
FR	=	facteur de répartition (sans unité)
H'	=	constante de Henry sans unité = H/RT
H	=	constante de Henry (atm·m ³ /mol)
R	=	constante des gaz (8,2 x 10 ⁻⁵ atm·m ³ /mol·K)
T	=	température moyenne annuelle de l'eau souterraine (K; 288 K = 15 °C)
FD _i	=	facteur de dilution entre les vapeurs du sol et l'air intérieur (sans unité) : <i>voir l'élaboration ci-dessous</i>
F.aj.	=	facteur d'ajustement (sans unité) = 10 au niveau 1 pour les hydrocarbures pétroliers (F1, F2, BTEX et alcanes à chaîne courte); = 1 pour les hydrocarbures non pétroliers
TE	=	terme d'exposition (sans unité)
CFES	=	concentration de fond de l'eau souterraine (mg/L)

Calcul du FD pour la voie d'infiltration dans les bâtiments

$$FD_i = \frac{1}{\alpha} \quad (\text{Équation A-6})$$

FD _i	=	facteur de dilution entre les vapeurs du sol et l'air intérieur (sans unité)
α	=	facteur d'atténuation

= (concentration de vapeur du contaminant dans le bâtiment)/(concentration de vapeur à la source du contaminant)

$$\alpha = \frac{\left[\frac{D_T^{eff} A_B}{Q_B L_T} \right] \exp \left[\frac{Q_{sol} L_{fiss.}}{D^{fiss.} A_{fiss.}} \right]}{\exp \left(\frac{Q_{sol} L_{fiss.}}{D^{fiss.} A_{fiss.}} \right) + \left(\frac{D_T^{eff} A_B}{Q_B L_T} \right) + \left(\frac{D_T^{eff} A_B}{Q_{sol} L_T} \right) \left[\exp \left(\frac{Q_{sol} L_{fiss.}}{D^{fiss.} A_{fiss.}} \right) - 1 \right]} \quad (\text{Équation A-7})$$

- D_T^{eff} = coefficient de diffusion effective en milieu poreux (cm²/s) – voir ci-dessous
 A_B = superficie du bâtiment – planchers et murs de fondation (cm²)
 Q_B = taux de ventilation du bâtiment (cm³/s) – voir ci-dessous
 L_T = distance séparant la source de contaminant des fondations (cm)
 Q_{sol} = débit volumétrique du gaz souterrain vers un bâtiment (cm³/s) (voir ci-dessous)
 $L_{fiss.}$ = épaisseur des fondations (cm)
 $D^{fiss.}$ = coefficient de diffusion effective des vapeurs par les fissures (cm²/s)
 $A_{fiss.}$ = superficie des fissures par lesquelles les contaminants gazeux pénètrent dans le bâtiment (cm²)

Calcul du coefficient de diffusion effective en milieu poreux dans la zone non saturée (D_T^{eff}) :

$$D_T^{eff} = D_a \cdot \left(\frac{\theta_a^{10/3}}{n^2} \right) + \left(\frac{D^{eau}}{H'} \right) \cdot \left(\frac{\theta_w^{10/3}}{n^2} \right) \quad (\text{Équation A-8})$$

- D_T^{eff} = coefficient de diffusion effective globale en milieu poreux fondé sur les concentrations en phase vapeur pour la région située entre la source et la fondation (cm²/s)
 D_a = diffusivité moléculaire du composé pur dans l'air (cm²/s)
 D^{eau} = diffusivité moléculaire du composé pur dans l'eau (cm²/s)
 H' = constante de Henry (sans unité) à la température du sol (p. ex., 15 °C)
 θ_w = porosité en humidité (sans unité)
 θ_a = porosité en vapeur (sans unité)
 n = porosité totale du sol (sans unité)

Calcul du coefficient de diffusion effective par les fissures ($D_{fiss.}$) :

$$D_{fiss.} \approx D_a \left(\frac{\theta_a^{10/3}}{n^2} \right) \quad (\text{Équation A-9})$$

$D_{fiss.}$	=	coefficient de diffusion effective des vapeurs par les fissures (cm^2/s) (on présume que le sol dans les fissures est sec et de texture grossière)
D_a	=	diffusivité moléculaire du composé pur dans l'air (cm^2/s)
θ_a	=	porosité en vapeur (sans unité) – supposé être égal à la porosité totale du sol, n
n	=	porosité totale du sol (sans unité)

Pour le coefficient de diffusion effective par les fissures ($D_{fiss.}$), il est présumé qu'une matière grossière et granulée est utilisée comme base pour les planchers et les fondations. On suppose donc que les fissures sont remplies de particules grossières, même si le sol naturel est de texture fine ou moyenne, quelle que soit la texture des particules de sol environnantes.

Calcul du taux de ventilation du bâtiment (Q_B) :

$$Q_B = L_B W_B H_B (CAH) / (3600s/h) \quad (\text{Équation A-10})$$

Q_B	=	taux de ventilation du bâtiment (cm^3/s)
L_B	=	longueur du bâtiment (cm)
W_B	=	largeur du bâtiment (cm)
H_B	=	hauteur du bâtiment, y compris le sous-sol (cm)
CAH	=	changement d'air par heure (h^{-1})

Calcul du débit volumétrique des vapeurs du sol (Q_{sol}) :

Le Q_{sol} n'est plus calculé à partir des propriétés du sol ou du bâtiment (c'est-à-dire le modèle du périmètre des fissures), mais a plutôt une valeur fixe basée sur la texture du sol et l'utilisation des terrains (voir l'annexe B pour des précisions).

ANNEXE B - PARAMÈTRES PAR DÉFAUT DE L'ÉLABORATION DES RECOMMANDATIONS

Cette annexe présente les valeurs par défaut utilisées pour calculer les recommandations pour la qualité des eaux souterraines, de même que des informations pertinentes de base. Ces valeurs peuvent être mises à jour selon les besoins; il convient de préciser que les recommandations pour la qualité des eaux souterraines ne sont généralement pas révisées lorsque les valeurs par défaut sont modifiées.

Tableau B.1 Caractéristiques du récepteur humain^a

Paramètre	Symbole	Nourrisson (0 à 6 mois)	Tout-petit (7 mois à 4 ans)	Enfant (5 à 11 ans)	Adolescent (12 à 19 ans)	Adulte (20 ans et +)
Poids corporel (kg)	MC	8,2	16,5	32,9	59,7	70,7
Taux d'inhalation d'air (m ³ /jour)	TA	2,2	8,3	14,5	15,6	16,6
Taux d'ingestion d'eau (L/jour)	TIE	0,3	0,6	0,8	1,0	1,5

a – Source de toutes les données : Santé Canada (2004)

Poids corporel

Santé Canada (2004) a recommandé des poids corporels moyens en s'appuyant sur des études réalisées en 1981 pour les adultes (ICRCP, 1981) et de 1970 à 1972 pour les enfants (DHM, 1992). On a observé une augmentation du poids moyen des sujets au sein de la population canadienne de 1970 à 1988 (Richardson, 1997).

Taux d'inhalation

Les valeurs du taux d'inhalation ont été obtenues en utilisant des données sur le temps consacré à des activités par la population canadienne, combinées aux taux de renouvellement d'air spécifiés pour différents niveaux d'activité (Richardson, 1997, et données mises à jours sur les nourrissons, les tout-petits, les adolescents et les adultes dans Allan *et al.*, 2008).

Taux d'ingestion d'eau

Les valeurs du taux d'ingestion d'eau sont tirées d'une étude de la consommation canadienne d'eau de robinet réalisée de 1977 à 1978 (MSNB, 1981) aux fins de laquelle on a utilisé des questionnaires et des journaux personnels de consommation d'eau.

Tableau B.2 Paramètres pédologiques et hydrogéologiques

Paramètre	Symbole	Type de sol	
		À texture grossière	À texture fine
Conductivité hydraulique à saturation (m/an)	K_H	320	32
Gradient hydraulique	i	0,028	0,028
Fraction de carbone organique (g/g)	f_{co}	0,005	0,005
Densité apparente du sol (g/cm^3)	ρ_a	1,7	1,4
Porosité totale du sol	n	0,36	0,47
Porosité en vapeur (RQES _{CES})	θ_a	0,241	0,302
Porosité en humidité (RQES _{CES})	θ_e	0,119	0,168
Porosité en vapeur (RQES _{QAI})	θ_a	0,31	0,302
Porosité en humidité (RQES _{QAI})	θ_e	0,05	0,168
Débit volumétrique des vapeurs du sol (cm^3/s) ^a	Q_{sol}	167	16,7

a – basé sur un taux de transfert de 10 L/min pour les sols à texture grossière et de 1 L/min pour les sols à texture fine.

Conductivité hydraulique à saturation

Les valeurs par défaut de la conductivité hydraulique ont été choisies pour refléter les aquifères typiques qui existent au Canada. La valeur correspondant aux sols à texture grossière (320 m/an) est représentative des sables silteux (Freeze et Cherry, 1979); elle a été choisie parce que les valeurs plus faibles sont plus conservatrices (c.-à-d. qu'elles produisent des recommandations plus basses) pour les voies où il n'existe pas de distance de recul entre la source de contamination et le récepteur de l'eau souterraine. Cette valeur risque de ne pas être conservatrice pour les voies de transport en zone saturée; toutefois, des valeurs plus élevées de la conductivité hydraulique à saturation seraient probablement compensées, du moins partiellement, par les gradients hydrauliques plus faibles correspondants. Une conductivité hydraulique de 3,2 m/an est représentative du silt (Freeze et Cherry, 1979); toutefois, pour un sol à texture fine, on utilise une valeur de 32 m/an pour refléter les valeurs de la partie supérieure de l'intervalle pour les sols à texture fine.

Gradient hydraulique

Le gradient hydraulique est une quantité sans unité qui sert à décrire la pente du gradient du potentiel hydrique. Dans les aquifères libres, il équivaut en gros au gradient de la nappe phréatique. On recommande d'utiliser un gradient hydraulique de 0,028 comme valeur par défaut (CCME, 2006); il existe une corrélation inverse entre la valeur de ce paramètre et la conductivité hydraulique à saturation. Il convient de noter que là où le gradient hydraulique d'un site est connu pour différer de manière significative de 0,028, pour le calcul des valeurs de la recommandation de niveau 2, le gradient hydraulique propre au site devrait être utilisé dans les calculs de transport en zone saturée pour toutes les voies d'exposition à l'eau souterraine pertinentes.

Fraction de carbone organique

Les valeurs par défaut de la fraction de carbone organique correspondant aux sols à texture grossière et à texture fine sont fondées sur un examen des teneurs en carbone organique de divers sols de sous surface du Canada réalisé dans le cadre de l'élaboration du Standard pancanadien relatif aux hydrocarbures pétroliers dans le sol (SP-HCP) (CCME, 2008b).

Densité apparente et teneur en humidité du sol

Les valeurs par défaut de la densité apparente et de la teneur en humidité ont été choisies pour représenter un sol sableux (sols à texture grossière) et un sol argileux (sols à texture fine) typiques. La porosité en humidité des sols à texture grossière a été modifiée de manière à correspondre aux recommandations de Santé Canada quant aux valeurs d'entrée dans le modèle de Johnson et Ettinger (SC, 20102) et aux valeurs par défaut du protocole visant les vapeurs des sols du CCME (2014).

Porosité

La porosité totale du sol se calcule à partir de sa densité apparente, en supposant une densité des particules de $2,65 \text{ g/cm}^3$. La porosité chargée d'humidité s'obtient en multipliant la densité apparente du sol par la teneur en humidité (en supposant une densité de l'eau de 1 g/cm^3). La porosité en vapeur s'obtient en soustrayant la porosité en humidité de la porosité totale.

Débit volumétrique minimum des vapeurs du sol vers le bâtiment

Dans le protocole relatif aux sols du CCME (2006), le débit volumétrique des vapeurs a été calculé en fonction de la perméabilité à la vapeur du sol et des différences de pression; compte tenu des difficultés liées à l'obtention de mesures fiables pour ces paramètres et des études plus récentes menées sur cette voie d'exposition, le débit volumétrique des vapeurs est maintenant défini directement. Voir annexe C du Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des vapeurs des sols en vue de prévenir leur inhalation par l'humain pour plus de détails (CCME 2014).

Tableau B.3 **Caractéristiques du site et autres paramètres**

<i>Paramètre</i>	SYMBOLE	VALEUR
Largeur de la source de contaminant (m)	Y	10
Distance de la surface de l'eau (m)	x	10
Distance de l'utilisateur d'eau potable (m)	x	0
Distance de l'utilisateur de l'eau pour l'agriculture (m)	x	0
Distance de l'eau souterraine à la dalle (cm)	L _T	100
Moment où le modèle d'eau souterraine est évalué (années)	t	≥100

Largeur de la source

Les dimensions de la zone contaminée sont déterminées à partir des dimensions des sites contaminés typiques du Canada. La largeur est mesurée perpendiculairement à l'axe de l'écoulement de l'eau souterraine.

Distance de l'eau de surface

On suppose, aux fins de l'élaboration des recommandations génériques, qu'un plan d'eau de surface pourrait se trouver à 10 m des sols assainis. On considère qu'il est possible de déterminer une distance de recul pour cette voie d'exposition puisque l'emplacement des plans d'eau de surface est normalement peu variable.

Distance des utilisateurs de l'eau aux fins de la consommation et de l'agriculture

On suppose que des utilisateurs de l'eau potable et des eaux aux fins agricoles se trouvent en aval, aux abords du terrain assaini. L'inclusion d'une distance de recul aux fins d'une recommandation générique pour ces voies d'exposition risque de donner des restrictions inadéquates ou impossibles à gérer. Toutefois, on pourra y avoir recours au cas par cas, selon les besoins.

Distance de l'eau souterraine à la dalle

Une distance de séparation minimale de 100 cm entre la frange capillaire et la dalle du bâtiment est présumée présente.

Moment de l'évaluation du modèle pour les eaux souterraines

Dans la plupart des cas, 100 ans sera une période de temps suffisamment longue pour garantir que les recommandations calculées reflètent un état d'équilibre. Toutefois, un test devrait toujours être effectué pour s'assurer que la recommandation calculée représente effectivement un état d'équilibre en insérant une valeur de « t » supérieure pour vérifier si cela change la valeur de la recommandation. Il convient d'être particulièrement prudent dans le cas où le taux de dégradation présumé est très bas, ou égal à zéro, ou lorsque le K_{co} de la substance chimique est élevé. Certaines instances pourraient juger approprié d'inclure une limite supérieure sur la durée de temps maximale considérée.

Profondeur de l'eau souterraine

Le modèle conceptuel initial du site du CCME suppose que l'eau souterraine se situe à une profondeur de 3 m.

Tableau B.4 Paramètres de construction

Paramètre	Symbole	Résidentiel	Commercial
Longueur du bâtiment (cm)	L_B	1225	2000
Largeur du bâtiment (cm)	W_B	1225	1500
Superficie du bâtiment (cm ²)	A_B	$2,7 \times 10^6$	$3,0 \times 10^6$
Hauteur du bâtiment (cm) ^a	H_B	360	300
Épaisseur des fondations (cm)	$L_{fiss.}$	11,25	11,25
Superficie des fissures (cm ²)	$A_{fiss.}$	994,5	1846
Nombre de renouvellement d'air par heure (1/h)	CAH	0,5	0,9

a – y compris le sous-sol.

Les paramètres de construction s'inspirent des normes du CCME (2008b) et s'appuyaient à l'origine sur les résultats d'une étude des caractéristiques typiques des bâtiments et des codes du bâtiment.

Il convient de souligner qu'un bâtiment résidentiel comportant une dalle directement sur le sol (dalle sur terre-plein) est généralement plus sensible qu'un bâtiment résidentiel comportant un sous-sol, avec les paramètres par défaut, à cause d'un flux d'advection plus élevé. Néanmoins, il est conseillé de calculer les recommandations pour la qualité des eaux souterraines en vue de la protection de la qualité de l'air intérieur pour les deux scénarios d'utilisation des terrains à vocation résidentielle afin de s'assurer que la voie d'exposition la plus sensible est considérée. Pour les utilisations à vocation commerciale, seule une construction à dalle sur terre-plein sera considérée. Les paramètres correspondant à un bâtiment muni ou non d'un sous-sol sont indiqués dans le tableau B.4.

Propriétés chimiques requises

- Dose journalière admissible ou dose correspondant à un risque spécifié
- Concentration admissible ou concentration correspondant à un risque spécifié (substances chimiques volatiles)
- Dose journalière estimée (substances chimiques avec seuil)
- Concentration de fond de l'eau souterraine (présumée être 0 en l'absence d'autres données pertinentes)
- Concentration de fond dans l'air (substances chimiques volatiles avec seuil d'effet)
- Constante de Henry (substances chimiques volatiles)
- Coefficient de diffusion dans l'air (substances chimiques volatiles)
- Demi-vie dans la zone saturée (substances chimiques solubles)
- Solubilité dans l'eau (substances chimiques solubles)
- Coefficient de partage carbone organique-eau
-

Références

- Allan, M., G.M. Richardson et H. Jones-Otazo. 2008. Probability Density Functions Describing 24-Hour Inhalation Rates for Use in Human Health Risk Assessments: An Update and Comparison. *Human and Ecological Risk Assessment*, 14: 372-391, 2008.
- CCME (Conseil canadien des ministres de l'Environnement), 2006. Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des sols en fonction de l'environnement et de la santé humaine. PN 1333. CCME, Winnipeg.
- CCME, 2008b. Canada-wide standards for petroleum hydrocarbons (PHC) in soil: Scientific rationale – Supporting technical document. CCME, Winnipeg.
- CCME, 2014. Protocole d'élaboration de recommandations pour la qualité des vapeurs des sols en vue de prévenir leur inhalation par l'humain. CCME, Winnipeg.
- ICRCP (Institut canadien de la recherche sur la condition physique et le mode de vie), 1981. Données non publiées. ICRCP, Ottawa.
- DHM (Direction de l'hygiène du milieu), 1992. Valeurs de référence pour les populations canadiennes. Santé et Bien-être social Canada, DHM, Groupe de travail sur les valeurs de référence, Ottawa.
- Freeze, R.A., et J.A. Cherry, 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, NJ.
- Santé Canada, 2004. L'évaluation du risque pour les lieux contaminés fédéraux au Canada – Partie I : L'évaluation quantitative préliminaire des risques (ÉQPR) pour la santé humaine. Programme de la sécurité des milieux, Services d'évaluation de la santé environnementale, Santé Canada, Ottawa.
- Santé Canada, 2010. L'évaluation des risques pour les sites contaminés fédéraux au Canada, Partie VII : Guide d'orientation pour l'évaluation de l'intrusion de vapeurs du sol sur les sites contaminés. Division des sites contaminés, Direction de la sécurité des milieux, Santé Canada, Ottawa.
- Morris, D.A., et A.I. Johnson, 1967. « Summary of Hydrologic and Physical Properties of Rock and Soil Materials, as Analyzed by the Hydrologic Laboratory of the U.S. Geological Survey, 1948-60 », Geological Survey Water Supply Paper 1839-D.
- SBE (Santé nationale et Bien-être social), 1981. Tap water consumption in Canada. Rapport 82-EHD-80. SBE, Ottawa.
- Richardson, G.M., 1997. Compendium des facteurs d'exposition humaine pour l'évaluation du risque au Canada. O'Connor Associates Environmental Inc., Ottawa.
- Yu, C., C. Louriero, J.J. Cheng, L.G. Jones, Y.Y. Wang, Y.P. Chia, Y.P., et E. Faillance, 1993. Data Collection Handbook to Support Modelling Impacts of Radioactive Material in Soil. Environmental Assessment and Information Sciences Division, Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois..